

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Termoplasty využívané v elektroizolačních systémech a
jejich dielektrické vlastnosti**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik ČERNÝ**
Osobní číslo: **E12B0465P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Termoplasty využívané v elektroizolačních systémech a jejich dielektrické vlastnosti**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Charakterizujte termoplasty jako podskupinu polymerních materiálů a uveďte základní postupy výroby termoplastických prekurzorů. Uveďte souhrn technologií využívaných při formování finálních výrobků z prekurzorů.
2. Vytvořte přehled termoplastů včetně jejich základních vlastností.
3. Vymenujte oblasti využití termoplastů v elektrotechnice se zaměřením na elektroizolační systémy a zařaďte do těchto oblastí konkrétní zástupce termoplastů.
4. Charakterizujte chování termoplastů v elektrickém poli. Zaměřte se na mechanismy relaxačních polarizací a odlišnost polárních a nepolárních polymerů.
5. Realizujte měření minimálně dvou polárních a dvou nepolárních termoplastů s využitím dielektrické spektroskopie ve vhodném frekvenčním a teplotním rozsahu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. F. CARDARELLI. Materials handbook: A Concise Desktop Reference. 2. vyd. London: Springer, 2008, 1339 s. ISBN 978-184-6286-698.
2. E. KUČEROVÁ. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
3. T. A. OSSWALD a G. MENGES. Material science of polymers for engineers. 3. vyd. Munich: Hanser, 2012, xix, 595 s. ISBN 978-1-56990-514-2.
4. J. G. DROBNY. Polymers for electricity and electronics: Materials, properties, and applications. Hoboken, N. J.: Wiley, 2012, xviii, 332 s. ISBN 978-0-470-45553-1.
5. V. DUCHÁČEK. Polymery: Výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 3. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Kadlec

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

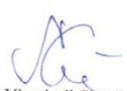
15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce:

2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na využití termoplastů v elektroizolačních systémech. V práci je shrnuto základní dělení polymerů a postupy jejich výroby. Dále jsou podrobněji rozvedeny základní technologie zpracování termoplastů. Významná část bakalářské práce je věnována typickým zástupcům termoplastů, přičemž pozornost je věnována především termoplastům uplatňovaným v elektroizolačních systémech. Další část pojednává o chování termoplastů v elektrickém poli. Na teoretický rozbor chování termoplastů v elektrickém poli navazuje část praktická, v rámci které bylo realizováno měření dielektrických vlastností vybraných vzorků polárních a nepolárních termoplastů.

Klíčová slova

Dielektrikum, dielektrická spektroskopie, elektroizolační systém, izolant, nepolární termoplast, polymer, termoplast, polyetylen, polyvinylchlorid, polarizace, polární termoplast, relativní permitivita

Abstract

The bachelor thesis presents the thermoplastic utilization in an electrical insulation systems. This work summarizes the basic division of polymers and their manufacturing. Furthermore there are described basic technologies used for the thermoplastic processing. A substantial part of my thesis is focused on typical representatives of thermoplastics, which are used for electrical insulation systems. Another part is about the behavior of thermoplastic in an electrical field. The theoretical part of my work results in the practical part of this thesis, in which there were measured dielectric properties of chosen polar and non-polar thermoplastics.

Key words

Dielectric, dielectric spectroscopy, electrical insulation system, insulation, non-polar thermoplastic, polymer, thermoplastic, polyethylene, polyvinyl chloride, polarization, polar thermoplastic, relative permittivity

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Patrik Černý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kadlecovi za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce, poskytnuté zdroje, informace a také za vřelou a včasnou pomoc. Tato práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 POLYMERY	12
1.1 DĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.1.1 Rozdělení podle teplotního chování	13
1.1.2 Rozdělení podle tvaru polymerních makromolekul	14
1.1.3 Rozdělení podle uspořádání makromolekulárních řetězců	15
2 SYNTÉZA POLYMERŮ	16
2.1 ZÁKLADNÍ REAKCE POLYMERŮ	16
2.1.1 Polymerace	16
2.1.2 Polykondenzace	16
2.1.3 Polyadice	17
2.2 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY VÝROBY POLYMERŮ	17
2.2.1 Polymerace samotného polymeru	17
2.2.2 Roztoková polymerace	18
2.2.3 Suspenzní polymerace	18
2.2.4 Emulzní polymerace	18
3 HLAVNÍ ZÁSTUPCI TERMOPLASTŮ	20
3.1 POLYETYLEN (PE)	20
3.2 POLYPROPYLEN (PP)	21
3.3 POLYBUTEN (PB)	21
3.4 POLYVINYLCHLORID (PVC)	22
3.5 POLYVINYLACETÁT (PVAC)	23
3.6 POLYVINYLALKOHOL (PVAL)	23
3.7 POLYSTYREN (PS)	23
3.8 POLYETYLENTEREFTALÁT (PETP)	24
3.9 POLYAMIDY (PA)	24
3.10 POLYURETANY (PUR)	25
3.11 POLYKARBONÁTY (PC)	25
3.12 POLYIMIDY (PI)	25
4 ZPRACOVÁNÍ TERMOPLASTŮ	27
4.1 VSTŘIKOVÁNÍ	27
4.2 VYTLAČOVÁNÍ	28
4.3 VÁLCOVÁNÍ	28
4.4 LISOVÁNÍ	29
5 POUŽITÍ TERMOPLASTŮ V ELEKTROTECHNICE	30
5.1 IZOLACE V KABELOVÉM PRŮMYSLU	30
5.1.1 Polyvinylchlorid (PVC)	32
5.1.2 Polyetylen (PE)	32
5.1.3 Polyuretan (PUR)	33
5.1.4 Polypropylen (PP)	33
5.1.5 Polytetrafluoroetylen (PTFE)	33
5.1.6 Testování v kabelovém průmyslu	34
5.2 IZOLACE ELEKTRICKÝCH STROJŮ	34
5.2.1 Nomex®	34
5.2.2 Kapton®	35

5.3	ZALÉVÁNÍ A ZAPOUZDŘENÍ	37
5.4	KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	38
6	TERMOPLASTY V ELEKTRICKÉM POLI.....	39
6.1	INTERAKCE ELEKTRICKÉHO POLE A LÁTEK	39
6.1.1	<i>Makroskopické hledisko.....</i>	<i>39</i>
6.1.2	<i>Mikroskopické hledisko.....</i>	<i>40</i>
6.2	ROZDĚLENÍ PODLE POLÁRNOSTI.....	40
6.2.1	<i>Polární dielektrika.....</i>	<i>40</i>
6.2.2	<i>Nepolární dielektrika.....</i>	<i>41</i>
6.2.3	<i>Závislost relativní permitivity na teplotě a frekvenci</i>	<i>42</i>
6.3	DRUHY POLARIZACÍ	43
6.3.1	<i>Migrační polarizace.....</i>	<i>44</i>
6.3.2	<i>Deformační polarizace.....</i>	<i>44</i>
6.3.3	<i>Relaxační polarizace.....</i>	<i>46</i>
7	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	48
7.1	MĚŘENÉ MATERIÁLY	48
7.2	MĚŘÍCÍ SYSTÉM	50
7.3	POSTUP MĚŘENÍ	51
7.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	52
7.5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	56
	ZÁVĚR.....	57
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	58

Úvod

Ačkoliv se polymery řadí mezi relativně nové materiály, které se před 100 lety téměř nepoužívaly, tak si bez nich dnešní svět už těžko dokážeme představit. Jejich celková produkce ve světě rok od roku roste a nachází nová využití. Jsou všude kolem nás a mají velký potenciál i do budoucna. Oblasti možného využití určitě ještě nejsou vyčerpány.

V oblasti elektroizolačních materiálů patří termoplasty mezi nejdůležitější materiály vůbec, o čemž svědčí např. i skutečnost, že ne jeden příklad jejich využití nalezneme v každé domácnosti. Jen těžko si dokážeme představit, že bychom v dnešní době nahradili například izolace kabelů nějakým jiným, stejně vhodným materiálem, jako jsou termoplasty.

Vzhledem k tomu, že hlavním úkolem elektroizolačních materiálů je zabránit průchodu elektrického proudu mezi dvěma místy s různým potenciálem, tak se na elektroizolační materiály kladou vysoké nároky. Mnohdy se totiž musí vypořádat i s různými nepříznivými faktory, přičemž musí být zachována bezpečnost a spolehlivost celého izolačního systému.

Bakalářská práce je zaměřena na termoplasty využívané v elektroizolačních systémech a jejich dielektrické vlastnosti. První část práce se zabývá základním dělením polymerů, vznikem a postupy výroby polymerů. Další část je věnována základním technologiím zpracování termoplastů. Poté následuje kapitola s typickými zástupci termoplastů. Na to navazuje využití termoplastů v elektroizolačních systémech. Značná část práce je věnována chováním termoplastů v elektrickém poli. Poslední část práce je experimentální, zde je realizováno měření dvou polárních a dvou nepolárních termoplastů.

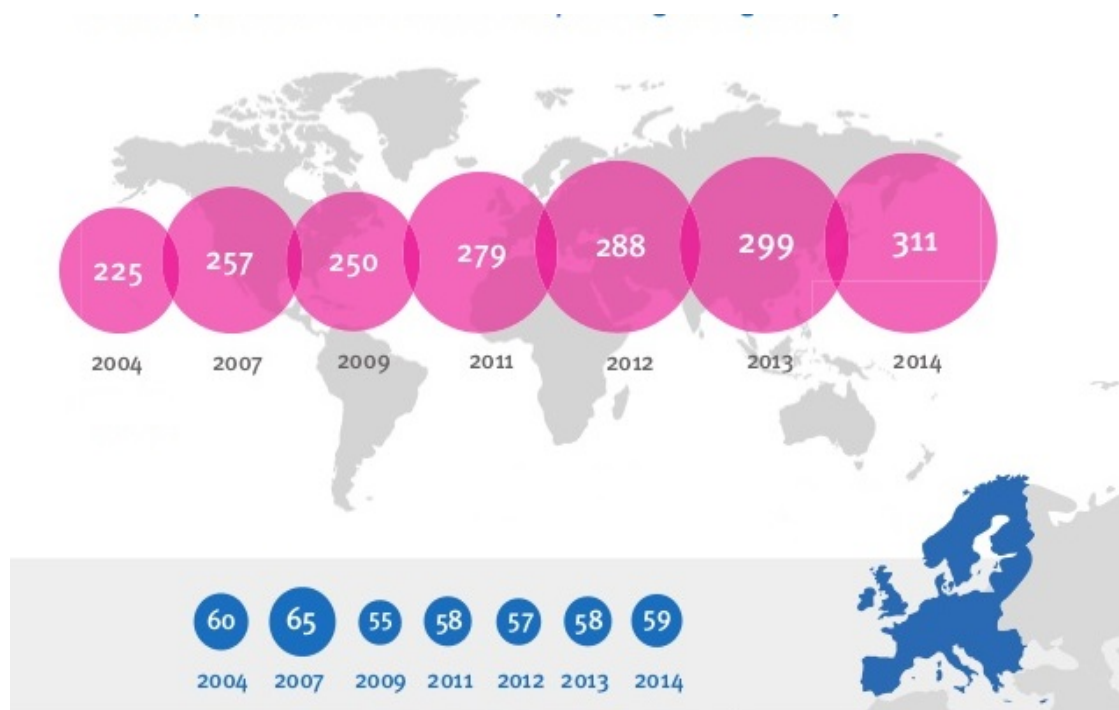
Seznam symbolů a zkratk

T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_m	[°C]	Teplota tání
T	[°C]	Teplota
α	[K ⁻¹]	Součinitel teplotní roztažnosti
\vec{P}	[C·m ⁻²]	Vektor polarizace
ϵ_r	[-]	Relativní permitivita
ϵ'	[-]	Reálná složka relativní permitivity
ϵ''	[-]	Imaginární složka relativní permitivity
$tg \delta$	[-]	Ztrátový činitel
W	[kJ·mol ⁻¹]	Velikost potenciálové bariéry
f	[Hz]	Kmitočet

PE	Polyetylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PA	Polyamid
PMMA	Polymethylmetakrylát
PC	Polykarbonát
PB	Polybuten
PVAC	Polyvinylacetát
PVAL	Polyvinylalkohol
PETP	Polyethylentereftalát
PUR	Polyuretan
PI	Polyimid
PTFE	Polytetrafluoretylen
PAI	Polyamid-imid
PPS	Polyfenylsulfid
PPO	Polypropylenoxid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PEI	Polyeterimid
XLPE	Zesítný polyetylen

1 Polymery

Polymery jsou přírodní nebo syntetické makromolekulární látky, které mohou vykazovat velmi rozmanité vlastnosti a většinou ve svých makromolekulách obsahují atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, dále také dusíku, chloru či jiných prvků. Polymery se při zpracování v určitém stádiu dostávají v podstatě do kapalného stavu, většinou za zvýšené teploty a tlaku, aby je bylo možné tvarovat do nejrůznější tvarů, dle předpokládaného použití. V konečné fázi výrobku jsou polymery v prakticky tuhém stavu. Přírodní polymery začali lidé využívat již před několika staletími. Jednalo se především o přírodní kaučuk, který našel uplatnění při výrobě nepromokavého plátna a obuvi. Syntetické polymery se začaly vyrábět výrazně později. Začátek syntetických polymerů začíná před první světovou válkou, kdy Američan Baekeland připravil fenolformaldehydovou pryskyřici. Velký rozmach ve výrobě pak nastal během druhé světové války a po ní. Široké uplatnění nacházejí dnes ve většině průmyslových odvětví a v některých aplikacích jsou polymery nenahraditelné. [1–3]



Obr. 1: Produkce plastů v letech 2004-2014 ve světě (růžová) a v Evropě (modrá) v milionech tun (převzato z [4] a upraveno)

1.1 Dělení polymerů

Polymery lze dělit podle různých hledisek. Mezi nejdůležitější rozdělení patří: podle teplotního chování, podle uspořádání makromolekulárních řetězců, podle tvaru makromolekul. [5]

1.1.1 Rozdělení podle teplotního chování

Dle teplotního chování lze polymerní materiály rozdělit na termoplasty, reaktoplasty a případně lze samostatně uvést i elastomery. [1, 3]

Termoplasty představují polymerní materiály, které za zvýšené teploty přechází z tuhého do plastického stavu, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat dalšími technologiemi. Z plastického do tuhého stavu je lze převést ochlazením. Jelikož při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, je možno proces měknutí a následního tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Mezi termoplasty patří většina zpracovávaných hmot, jedná se například o polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atd. [1, 5]

Reaktoplasty jsou polymerní materiály, dříve označované jako termosety, které v první fázi zahřívání stejně jako termoplasty měknou a lze je tvářet, ovšem pouze po omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dojde k chemické reakci - prostorovému zesíťování struktury, k tzv. vytvrzování. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze vrátit do původního stavu. Při dalším zahřívání dojde k degradaci hmoty. Mezi zástupce reaktoplastů patří epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, fenolformaldehydové hmoty, atd. [1, 5]

Elastomery označujeme polymerní materiály, které jsou jak název napovídá velice elastické. Za normálních podmínek můžeme elastomery malou silou deformovat, přičemž deformace je převážně vratná. Mezi elastomery patří hlavně kaučuky, z kterých se vyrábí pryž. [3, 5]

Tab. 1: Rozdělení polymerů dle teplotního chování [1]

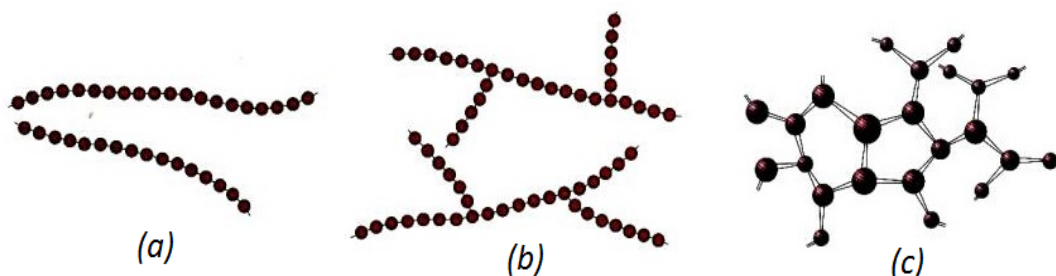
Polymery		
Kaučuky	Termoplasty	Reaktoplasty
Elastomery	Plasty	

1.1.2 Rozdělení podle tvaru polymerních makromolekul

Lineární makromolekuly mají monomerní molekuly řazené jednu vedle druhé, z prostorových důvodů mohou být blíže jedna ke druhé a vyplnit tak efektivněji prostor. Polymery se poté vyznačují vyšší hustotou. Plasty s lineárními molekulami jsou většinou dobře tavitelné a rozpustné (molekuly mají dobrou pohyblivost), v tuhém stavu se vyznačují houževnatostí a ve formě tavenin se dobře zpracovávají. [1, 5]

Rozvětvené makromolekuly mají na základním řetězci vázány krátké boční větve, které zhoršují jejich pohyblivost. Vzhledem k rozvětvení makromolekul jsou vzájemně oddáleny, výsledkem je pokles sil mezi jednotlivými makromolekulami a tím i zhoršení mechanické pevnosti, tvrdosti, modulu pružnosti a dalších vlastností polymeru. [1, 6]

Makromolekulární sítě vznikají z lineárních makromolekul při spojení sousedních řetězců na různých místech příčnými chemickými vazbami. Výsledkem zesíťování je omezení pohyblivosti makromolekul jako celku. Polymery ztrácí rozpustnost, tavitelnost, zhoršuje se houževnatost a naopak se zvyšuje tvrdost, modul pružnosti a teplotní odolnost. Výsledné vlastnosti závisí na hustotě zesíťování vytvořených uzlů mezi makromolekulami. Sítě jsou jak husté (reaktoplasty), tak i řídké (elastomerní kaučukovité polymery). [1, 6, 7]



Obr. 2: Tvary makromolekul a) lineární b) rozvětvené c) zesíťované (převzato z [8] a upraveno)

1.1.3 Rozdělení podle uspořádání makromolekulárních řetězců

Na základě uspořádání makromolekulárních řetězců lze polymery rozdělit na amorfni a krystalické. Toto dělení lze také označit za dělení podle nadmolekulární struktury (morfologie). [5]

Amorfní polymery lze charakterizovat jako polymery s vysokou tvrdostí, pevností a křehkostí. Vzhledem k nízkému indexu lomu (1,4 až 1,6) jsou průhledné. Součinitel teplotní roztažnosti α je menší než u semikrystalických polymerů. Amorfní polymery se dají používat do teploty zesklnění (teplota skelného přechodu T_g). Mezi zástupce patří polystyren, polymetylmetakrylát (PMMA), polykarbonát (PC) apod. [1, 5]

Krystalické (semikrystalické) polymery vykazují vyšší houževnatost a pevnost. Jsou mléčně zakalené, index lomu je větší a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Vykazují určitý stupeň uspořádanosti, označován jako stupeň krystalinity (v rozmezí od 40 do 90 %). Stupeň krystalinity vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, které jsou uloženy mezi oblastmi amorfními. Nikdy nelze dosáhnout 100% uspořádané krystalické struktury a krystalické plasty se proto přesněji označují jako semikrystalické. Použitelnost semikrystalických polymerů je do teploty tání T_m . Mezi zástupce patří polyetylen, polypropylen, polyamid atd. [1, 5]

2 Syntéza polymerů

Syntézu polymerů můžeme všeobecně rozdělit na dvě podkapitoly, kterými jsou: základní reakce polymerů a základní způsoby výroby polymerů.

2.1 Základní reakce polymerů

Syntetické polymery vznikají třemi základními typy tzv. polyreakcí: řetězovými polymeracemi, stupňovitými polyadicemi a polykondenzacemi. [1]

2.1.1 Polymerace

Jedná se o řetězovou chemickou reakci velkého počtu molekul monomeru, při níž vznikají dlouhé makromolekuly polymeru. Chemické složení monomeru je totožné se složením polymeru. Při polymeraci se neuvolňuje žádný vedlejší produkt. Makromolekula narůstá velkou rychlostí, rychlost je dána jednotlivými ději ze kterých je polymerace složena a to konkrétně z iniciace (počátek reakce), propagace (růst) a terminace (konečná fáze reakce). [1, 3]

Tak jako u každé chemické reakce je pro zahájení procesu nutno přivést do systému energii, tzv. aktivační energii která převádí částice reagující látky do aktivní formy, v níž jsou schopny příslušné chemické reakce. Dané molekuly monomeru můžeme aktivovat účinkem tepla, záření či snadno se aktivující látkou, tzv. iniciátorem. Podle druhu aktivních částic rozlišujeme polymeraci radikálovou, iontovou a koordinační. [1, 3]

2.1.2 Polykondenzace

Polykondenzace je řada stejných opakujících se reakcí funkčních skupin výchozích látek. Podmínkou pro vznik polymeru je, aby výchozí sloučeniny měly potřebný počet funkčních skupin. V případě že v každé molekule jsou dva vzájemně reagující komponenty vzniká lineární polymer, pokud má některá výchozí látka více funkčních skupin v molekule než jsou tomu dva, vznikají polymery se strukturou prostorové sítě. Polykondenzace je stupňovitá reakce, při které ze dvou nízkomolekulárních látek vzniká výsledný polymer a k tomu jiná nízkomolekulární látka, většinou voda. Dalším důležitým rozdílem mezi polymerací a polykondenzací je fakt, že produkt polykondenzace má

chemické složení odlišné od nízkomolekulární látky, ze které vznikl. Mezi hlavní produkty polykondenzace patří polyamidy a polyestery. [1, 3]

2.1.3 Polyadice

Sloučeniny, jejichž molekuly obsahují násobné vazby nebo jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, mohou být mimo řetězení schopny adičních reakcí se sloučeninami, jejichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny. V případě, že sloučeniny obsahují ve svých molekulách alespoň dvě funkční skupiny, může mnohonásobnou adicí vzniknout polymer. Takto popsaná reakce se nazývá polyadice. Složení výchozí směsi se neliší od složení konečného produktu. Avšak struktura výchozích látek je u polyadice odlišná od struktury základního článku. [1, 3]

2.2 Základní způsoby výroby polymerů

Výroba polymerů se průmyslově provádí několika základními způsoby. Nejjednodušším způsobem je polymerace samotného monomeru dříve známá jako bloková polymerace (v dnešní době už se tento výraz používá jen zřídka). V případě, kdy je polymer v monomeru rozpustný, se stává s postupující polymerací roztok stále viskóznější až do stavu, kdy roztok ztuhne na blok a zaujme tvar reakční nádoby. Dalším způsobem výroby polymerů je polymerace roztoková. Jedná se o způsob výroby, kdy se vznikající polymer v samotném monomeru nerozpouští. K monomeru je třeba přidat vhodné rozpouštědlo, které zapříčiní vznik roztoku polymeru. Daleko častějšími způsoby vzhledem k technologickým výhodám je polymerace v emulzi (emulzní polymerace) a polymerace v suspenzi (suspenzní polymerace). [1, 3]

Výběr způsobu polymerace je ovlivněn požadavky na vlastnosti výsledného produktu, jelikož každý způsob nám dává odlišné vlastnosti. Dalším důležitým faktorem je to, že jen velmi malý počet monomerů může být polymerován všemi způsoby. [1, 3]

2.2.1 Polymerace samotného polymeru

Nevýhodou této polymerace je těžký odvod reakčního tepla. Obecně je polymerace doprovázena zmenšováním objemu. Postupným úbytkem monomeru proto dochází ke smršťování výrobku a vzhledem k malé pohyblivosti makromolekul dochází k pnutí a u velkých předmětů může dojít až k trhlinám. Polymerací v monomerní fázi se provádí

iontová a radikálová polymerace, radikálovou polymerací se vyrábějí např. desky z polymethylmetakrylátu (plexisklo). Dalším příkladem s využitím polymerace v monomerní fázi je výroba kontaktních čoček. [1, 3]

2.2.2 Roztoková polymerace

Reakční teplo lze u roztokové polymerace odvádět již snadněji. Stejně jako u polymerace v monomerní fázi se také jedná o způsob provádění iontové a radikálové polymerace, avšak vzhledem k tomu, že je rozpouštědlo přenašečem, je molekulová hmotnost výsledného produktu za jinak stejných podmínek vždy nižší než při polymeraci v monomerní fázi. [1, 3]

Příkladem použití roztokové polymerace je výroba homopolymerů a kopolymerů etylenu a propylenu za použití prostředí benzínu, cyklohexanu a xylenu. Dále se tímto způsobem vyrábí butadienový či izoprenový kaučuk. [1, 3]

2.2.3 Suspenzní polymerace

Suspenzní polymerace již zaručuje dobrý odvod reakčního tepla. Monomer obsahující iniciátor je vzhledem k míchání ve vodě rozptýlen na malé částice. Velikost částic je ovlivněna podmínkami míchání. S postupující konverzí (monomeru na polymer) stoupá lepkavost a viskozita částic, proto stoupá nebezpečí jejich slepení ve velké shluky. Tomuto problému se čelí za pomoci přídavku látky, která zvyšuje viskozitu vodní fáze (polyvinylalkohol, želatina). Suspenzně vyráběné polymery jsou dobrými elektroizolačními materiály, jelikož obsahují málo příměsí, dále mají tyto polymery lepší mechanické vlastnosti než polymery vyrobené v monomerní fázi. Suspenzní polymerací se vyrábí např. polyvinylchlorid nebo polystyren. [1, 3]

2.2.4 Emulzní polymerace

Stejně jako u polymerace suspenzní se polymerace emulzní vyznačuje dobrým odvodem reakčního tepla za pomoci disperzního prostředí (vody). Emulzní polymerace je pochod, kdy polymer vzniká z částic monomeru mechanicky rozptýlených ve vodě. Vzniku se účastní emulgátor (např. mýdlo) a také iniciátor. Hlavní odlišností od suspenzní polymerace je přítomnost iniciátoru ve vodní fázi. Emulzní polymerace se na rozdíl od

ostatních polymerací vyznačuje vysokou rychlostí celého děje. Emulzně se polymeruje mnoho syntetických kaučuků, polyvinylacetát či emulzní typy polyvinylchloridu. [1, 3]



Obr. 3: Hala firmy zabývající se výrobou polymerů (převzato z [9])

3 Hlavní zástupci termoplastů

Termoplasty jsou polymery, které lze za pomoci zvýšené teploty uvést ze stavu tuhého do stavu plastického, přičemž tato změna je vratná (opakovatelná). [1]

3.1 Polyetylen (PE)

Polyetylen patří do skupiny polyolefinů. V roce 1999 dosáhla celosvětová spotřeba PE na 38,8 mil. tun. Polyetylen se připravuje polymerací etylenu (C_2H_4). Strukturální vzorec polyetylenu je symetrický, což ukazuje, že polymer je nepolární. Etylen se získává z rafinace či z parního krakování ropy nebo zemního plynu. V dnešní době se používají dva průmyslové procesy pro výrobu etylenu: syntéza za vysoké tlaku a syntéza za nízkého tlaku. Za vysokého tlaku pro vysokou čistotu se lisuje při tlaku 150 MPa až 300 MPa a při teplotě 300 °C za přítomnosti stop kyslíku, který funguje jako katalyzátor. [2, 7, 10]

Polymerační reakce je velmi jednoduchá a lze jí zapsat následovně [7]:



Polyetylen rozdělujeme na několik typů. Dříve se dělil podle postupu použitého při výrobě a to na polyetylen nízkotlaký a vysokotlaký. Postupem času se ukázalo, že toto rozdělení není postačující. Při výrobě za vysokého tlaku se podařilo dosáhnout vlastností, které původně dosahoval polymer připravený za nízkého tlaku a naopak. Z toho důvodu se za základní kritérium pro rozdělení začalo používat rozvětvení makromolekul. Na tomto základě rozlišujeme typ polyetylenu na lineární a rozvětvený. [1, 2]

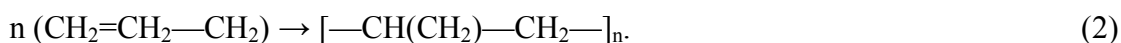
Jedná se o tuhou látku, která je elastická a na omak má voskovitý charakter. Za normálních podmínek je polyetylen bílý, v tenčí vrstvě průhledný. Teplota tání se pohybuje v rozmezí od 105 °C do 136 °C. Veškeré typy mají vysokou krystalinitu. Dále má vysokou tažnost a houževnatost. Velmi stálý proti chemickým činidlům. Za běžných teplot odolný proti vodě, neoxidujícím chemikáliím včetně kyselin, zásad, solí a jejich roztoků a polárním rozpouštědlům. Vůči nepolárním rozpouštědlům je však odolnost PE značně omezena, především za zvýšené teploty. [1, 2]

Použití polyetyleny je široké. Nachází uplatnění jak pro technické výrobky (trubky, fólie), tak pro spotřební zboží (hračky, výrobky pro domácnost). Dále je také nejrozšířenějším obalovým materiálem. [1, 2]

3.2 Polypropylen (PP)

Další zástupce ze skupiny polyolefinů. Radikálovou nebo kationtovou polymerací propylenu je možno získat jen nízkomolekulární produkt, který se skládá z rozvětvených, ataktických molekul. Teprve až roku 1954 zjistil Giulio Natta, že za přítomnosti některých katalyzátorů Zieglerova typu vzniká z monomeru vysokomolekulární izotaktický polypropylen s pravidelnou strukturou a dobrými mechanickými vlastnosti. Od té doby se z polypropylenu stal významný polymer se širokým využitím. Polypropylen se průmyslově připraví polymerací propylenu (C_3H_6) za nízkého tlaku. [1, 2, 7]

Polymerační reakce je jednoduchá a vypadá následovně [7]:



Stupeň krystalinity polypropylenu je v rozmezí od 60 % do 75 % a polymer je neprůhledný. Čistý izotaktický polypropylen má teplotu tání 176 °C, produkty pro komerční účely 160 °C až 170 °C. Ve srovnání s polyetylenem je lépe odolný vůči chemikáliím, má větší pevnost, tvrdost, avšak je méně odolný proti oxidaci a mrazu. [1, 2]

Použití polypropylenu je rozsáhlé. V automobilovém průmyslu jsou z něj vyráběny ventilátory či dílce na přístrojových deskách, ve spotřebním průmyslu slouží pro výrobu např. součástí vysavačů či hraček. Díky odolnosti vůči sterilizačním teplotám se používá na dílce injekčních stříkaček. Čím dál významnější, avšak náročná, je aplikace PP pro výrobu kondenzátorů. Dále je široké využití v textilním průmyslu při výrobě vláken. [2]

3.3 Polybuten (PB)

Jedná se o typ, který patří mezi nové druhy plastů. Další ze skupiny polyolefinů. Přesněji se polybuten označuje jako poly-1-buten, jelikož jeho dvojná vazba v molekule monomeru (1-butenu) vychází z prvního uhlíkového atomu. Poprvé byl izotaktický polybuten syntetizován v roce 1954, avšak dalších 10 let trvalo, než začala první

průmyslová výroba. Pod názvem Vestolen BT byl na trh uveden německou firmou Chemische Werke Huls. Výroba se podobá polypropylenu, vzniká převážně izotaktický propylen. Zvláště vysoká molekulová hmotnost spolu s krystalinitou je příčinou vynikající odolnosti poly-1-butenu vůči korozi za napětí a tečení. Tato vlastnost umožňuje ve srovnání s PE a PP zmenšit u trubek tloušťku stěn. Filmy z PB jsou velmi odolné proti přetržení. Elektroizolační vlastnosti a chemická odolnost je obdobná jako u ostatních polyolefinů. Také použití se od ostatních polyolefinů příliš neliší, hlavní uplatnění nachází při výrobě trubek a fólií z kterých se vyrábí těžké pytle. Ke konci 20.století se očekával rychlý nárůst výroby a spotřeby. Dnes už ovšem můžeme říci, že v dohledné době se spotřebě polypropylenu a polyetyleny zdaleka ani nepřiblíží. [1, 2, 11]

3.4 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid je společně s polypropylenem a polyetylenem nejmasověji vyráběným polymerem. Patří mezi nejdůležitější termoplasty. Šířka spektra využití je velká a žádný jiný polymer se mu v tomto ohledu nemůže rovnat. Kromě výhodných vlastností je důležitým faktorem jeho mimořádného rozšíření poměrně levná výroba a možnost zpracování prakticky všemi základními postupy výroby. PVC se připravuje reakcí plynu acetyleny s kyselinou chlorovodíkovou za přítomnosti vhodného katalyzátoru. Je velmi odolný vůči silným minerálním kyselinám, z toho důvodu byl široce využíván již před více jak čtyřiceti lety jako potrubí pro studenou vodu a chemikálie. Polyvinylchlorid může být zdraví škodlivý. Z tohoto důvodu jsou některé výrobky z PVC, kde dochází k přímému styku s poživatinami (lahve, obaly apod.) zakázány. Ačkoliv ve světě převládá zpracování neměkčeného PVC, tak v naší republice se zpracovává převážně PVC měkčený. Neměkčený PVC se používá hlavně na trubky a armatury na odpadní a pitnou vodu. Další využití najde neměkčený PVC například ve stavebnictví (profily oken), na výrobu fólií a desek k obkládání fasád nebo k výrobě dutých výrobků (láhve na čisticí prostředky). Měkčený PVC se používá na fólie, desky, na vstřikované výrobky, těsnění atd. [1, 2, 7, 12]

Nevýhodou PVC je jeho toxicita, obsahuje totiž halogenní prvek (chlór). V dnešní době je již známo, že při hoření PVC vzniká hustý dým, který je jedovatý a karcinogenní. Proto vypukne-li požár v místě, kde jsou použity izolace z PVC není největší hrozbou samotný požár, ale již zmiňovaný jedovatý dým. Z tohoto důvodu je snaha omezit PVC v

místech se zvýšeným rizikem požáru, v uzavřených prostorech (např. v tunelech) a v místech se zvýšenou koncentrací lidí (např. nákupní centra). [13]

3.5 Polyvinylacetát (PVAC)

Polyvinylacetát je v průmyslu hojně používaný polymer. Připravuje se polymerací vinylacetátu, který se vyrábí z kyseliny octové a acetylénu. Na trhu můžeme PVAC najít v pevném stavu jako prášek či transparentní hmotu, ve formě roztoků v organických rozpouštědlech nebo jako latex. Hlavní oblastí použití je především výroba lepidel, dále také roztokových nátěrových hmot nebo latexů. [1, 2]

3.6 Polyvinylalkohol (PVAL)

Vzhledem k tomu, že neexistuje vinylalkohol tak se polyvinylalkohol nezískává z monomeru. V průmyslovém měřítku se získává hydrolyzou polyvinylacetátu. Z tohoto důvodu polyvinylalkohol vždy obsahuje určitě množství acetátových skupin. Příčinou přítomnosti acetátových skupin jsou proměnné vlastnosti, který polymer modifikují. PVAL je krystalického charakteru. Odolnost proti rozpouštědlům závisí na střední molekulové hmotnosti, teplotě a obsahu nezhydrolyzovaného polyvinylacetátu. [1, 12]

Chováním připomíná PVAL želatinu. Používá se proto v potravinářství na přípravu ovocného želé. Další využití je jako zahušťovadlo pro nátěrové hmoty, k výrobě olejů, tuků, rozpouštědel nebo lepidel. Můžeme ho také najít jako obalové fólie, textilní vlákna, různá těsnění a mnoho dalších výrobků. [1]

3.7 Polystyren (PS)

Polystyren patří mezi nejstarší syntetické polymery. Polymeraci styrenu provedl Simon již roku 1839. Avšak aplikace polystyrenu v průmyslu se objevila až před II. světovou válkou. Polystyren patří spolu s polyvinylchloridem a polyolefiny k nejvyužívanější polymerům. Je možné ho velmi snadno připravit všemi polymeračními způsoby. Polymerace monomerního styrenu je snadná. Probíhá zvolna již za normální teploty bez přítomnosti inhibitorů, za takových podmínek styren samovolně zpolymeruje na 80 %. Výrazné urychlení procesu polymerace způsobuje světlo, iniciátory a teplo. Ačkoliv styren polymeruje snadno všemi polymeračními mechanismy, tak se při výrobě používá převážně radikálový mechanismus. Pro standardní polystyren je nejdůležitější

technologie bloková a suspenzní polymerace. Jelikož je styren zdravotně závadný, tak se v ČR udává maximální přípustná koncentrace na pracovišti ($200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Kromě standardního polystyrenu máme ještě modifikace a to polystyren zpěnovatelný a polystyren houževnatý. Nejrozšířenější technologií pro zpracování PS je vstřikování. [1, 2, 12]

Polystyren se vyznačuje tvrdostí, křehkostí, průzračností, vysokým leskem a výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Disponuje dobrou odolností proti alkoholům, vodě, minerálním olejům, hydroxidům a kyselinám. V aromatických a chlorovaných uhlovodících se rozpouští. Důležitou vlastností, kterou využívají hlavně aplikace pro elektrotechniku a elektroniku je téměř nulová nasákavost. [1, 2, 12]

Využití PS je rozsáhlé, pěnový polystyren je široce využíván hlavně ve stavebnictví (tepelná a zvuková izolace) a v obalové technice. Dále se PS používá na výrobu elektrotechnických součástek, měkčených fólií či nátěrových hmot odolných vůči kyselinám a zásadám. [1]

3.8 Polyethyltereftalát (PETP)

Polyethyltereftalát je nejvýznamnější zástupce skupiny polyesterů. Jedná se o polykondenzát kyseliny tereftalové a etylenglykolu. Výroba je rozdělena do dvou fází. V první fázi se tzv. transesterifikuje dimethyltereftalát etylenglykonem za uvolňování metylalkoholu. Ve druhé fázi poté vzniká polymer za vydestilování přebytečného etylenglykolu. Při transesterifikaci se teplota pohybuje mezi $190 \text{ }^\circ\text{C}$ až $195 \text{ }^\circ\text{C}$. [1, 2]

Hlavním využití PETP je k výrobě vláken (spotřební textilie, technické tkaniny, lana) nebo v menším měřítku na výrobu lahví (balení kapalného zboží) či fólií, které dříve sloužily v elektrotechnice jako podložky pro výrobu magnetofonových a videorekordérových pásků a filmů. [1, 2]

3.9 Polyamidy (PA)

Polyamidy jsou lineární polymery, které ve svých řetězcích obsahují amidové skupiny $-\text{CONH}-$. První zmínka o syntetickém polyamidu se datuje do roku 1899. Gabriel a Maas získali zahříváním ω -aminokapronové kyseliny 6-kaprolaktam malé množství želatiny. Polyamidy vznikají polymerací nebo polykondenzací. Procesy se liší mechanismem,

zatímco polymerací převádíme laktamy na polymer, tak aminokyseliny převádíme výhradně polykondenzací. U polymerace i polykondenzace se převážně používá bloková polymerace, v některých případech i polymerace roztoková. Typy polyamidů se rozdělují na základě použitých surovin a využitých výrobních metod. Nejdůležitější polyamidy jsou: polyamidy na bázi ω -aminokyselin a jejich laktamů, polyamidy na bázi dikraboxylových kyselin a diaminů, polyamidy s aromatickým jádrem a polyamidy vícesložkové. Praxí osvědčené polyamidy jsou z hexametylendiaminu a kyseliny adipové (PA 66) nebo kyseliny sebakové (PA 610). Vlastnosti PA jsou závislé na výchozím monomeru. Polyamidy se využívají pro výrobu vláken a plastů. [2, 12]

3.10 Polyuretany (PUR)

Polyuretany jsou polymery, které jsou z hlediska šíře dosažitelných vlastností a tudíž i jejich aplikací unikátní. Připravit je lze z látek obsahující hydroxylové skupiny a různých vícefunkčních izokyanátů. Nejznámější využití polyuretanů, známé pro širokou veřejnost je k výrobě měkkých lehčených hmot (pěnových materiálů). Pěna vzniká za reakce diizokyanátu, polyhydroxysloučenin a vody. PUR je možno vyrobit tuhé, měkké, lineární i síťované, díky čemuž mají širokou škálu uplatnění. Používají se jako lehčené i nelehčené plasty a vlákna. Mezi základní vlastnosti patří extrémní odolnost vůči oděru, stálost v prostředí vody a dobrá adheze k mnoho materiálům. [1, 2]

3.11 Polykarbonáty (PC)

Obecně jsou polykarbonáty polyestery kyseliny uhličitě a dihydroxysloučenin. V průmyslové praxi se polykarbonáty vyrábějí na základě tzv. dianu, neboli 2,2-bis(4hydroxyfenyl)propanu. PC disponují vysokou rázovou houževnatostí i při nízkých teplotách, dobrými elektroizolačními vlastnostmi, vysokou mechanickou vlastností a také například dobrou rozměrovou stabilitou až do 140 °C. PC se používají například jako vnitřní součásti automobilů, v elektrotechnice, ve farmaceutickém průmyslu jako nástroje a přístroje a relativně nově také jako kompaktní disky. [1, 2, 10]

3.12 Polyimidy (PI)

Polyimidy jsou materiály s vynikající tepelnou stabilitou. Jejich světová roční produkce se s nejvyužívanějšími polymery nedá rovnat. Ovšem v oblasti vysoce tepelně odolných polymerů se jedná o jeden z nejlepších polymerů. Využití PI je rozsáhlé, ovšem

vždy jen ve speciálních a náročných případech, např. na vesmírné lodi Apollo 9, kde hliníkem vrstvené fólie z Kaptonu chránily loď před slunečním zářením a působením tepla z pohonných motorů a také izolovaly obleky kosmonautů. [2, 12]

Tab. 2: Přehled elektroizolačních vlastností vybraných termoplastů [14]

Polymer	Relativní permitivita	Ztrátový činitel	Vnitřní rezistivita [$\Omega \cdot m$]	Povrchová rezistivita [Ω]	Elektrická pevnost [$kV \cdot mm^{-1}$]
PP	2,27	$< 4 \cdot 10^{-4}$	$> 10^{15}$	10^{13}	40 až 60
PS	2,5	$1 \text{ až } 4 \cdot 10^{-4}$	$> 10^{14}$	$> 10^{13}$	70
PVC	3,5	$150 \text{ až } 170 \cdot 10^{-4}$	10^{13}	10^{13}	60
PTFE	$< 2,1$	$< 2 \cdot 10^{-4}$	$> 10^{16}$	10^{17}	35 až 50
PC	3	$7 \cdot 10^{-4}$	$> 10^{15}$	$> 10^{15}$	35 až 38
PI	3,5	$20 \cdot 10^{-4}$	$> 10^{14}$	$> 10^{15}$	56
PE lineární	2,35	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$> 10^{15}$	10^{14}	42
PE rozvětvený	2,29	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$> 10^{15}$	10^{14}	380

Tab. 3: Přehled mechanických vlastností vybraných termoplastů [10]

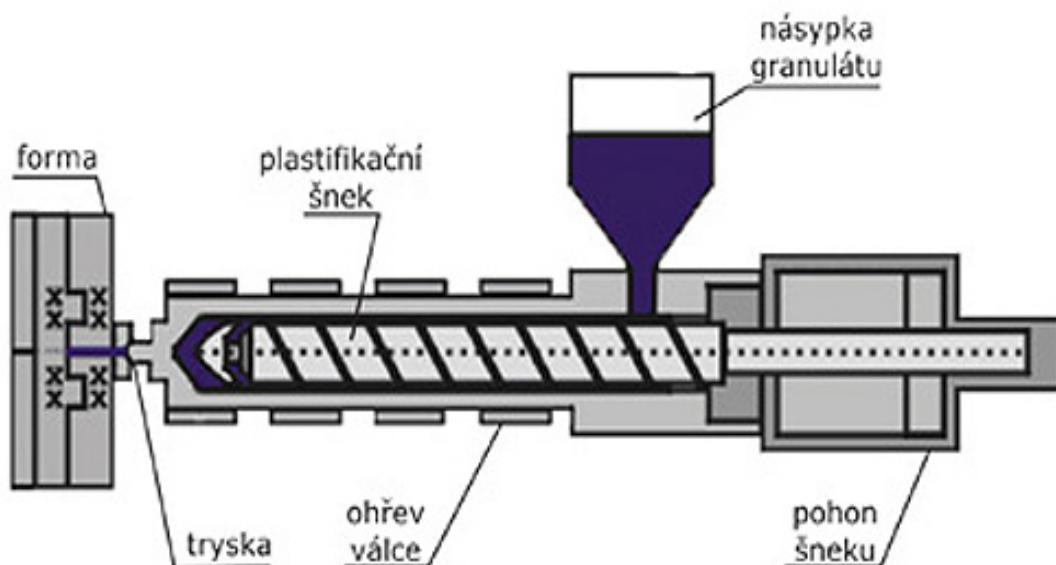
Polymer	Hustota [$kg \cdot m^{-3}$]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Tažnost [%]
PP	900	30	45	600
PS	1050	50	80	1,3
PVC neměkčený	1380	60	110	5,7
PVC měkčený	1300	20	-	200 až 300
PC	1420	70	100	15
PA	1140	40 až 80	30 až 110	20 až 300
PE	910 až 960	10 až 20	12 až 40	150 až 600
PTFE	2100	20 až 120	18	200 až 600
PUR	1210	-	30 až 70	10 až 150

4 Zpracování termoplastů

Využitím různých tvářecích technologií získávají termoplasty svůj finální tvar. Zpracovatelnost termoplastů je poměrně snadná. Ke zpracování jsou termoplasty dodávány většinou ve formě prášku nebo granulátu. Výhoda termoplastů je, že při jejich zahřátí neprobíhají chemické reakce, které by ovlivňovaly konzistenci taveniny. Je tedy možné udržet termoplasty v plastickém stavu daleko déle než reaktoplasty nebo kaučukové směsi. Nutné je ovšem poté termoplast v plastickém stavu před vyjmutím z formy ochladit, jinak by mohlo dojít k deformaci. [1, 12, 15]

4.1 Vstřikování

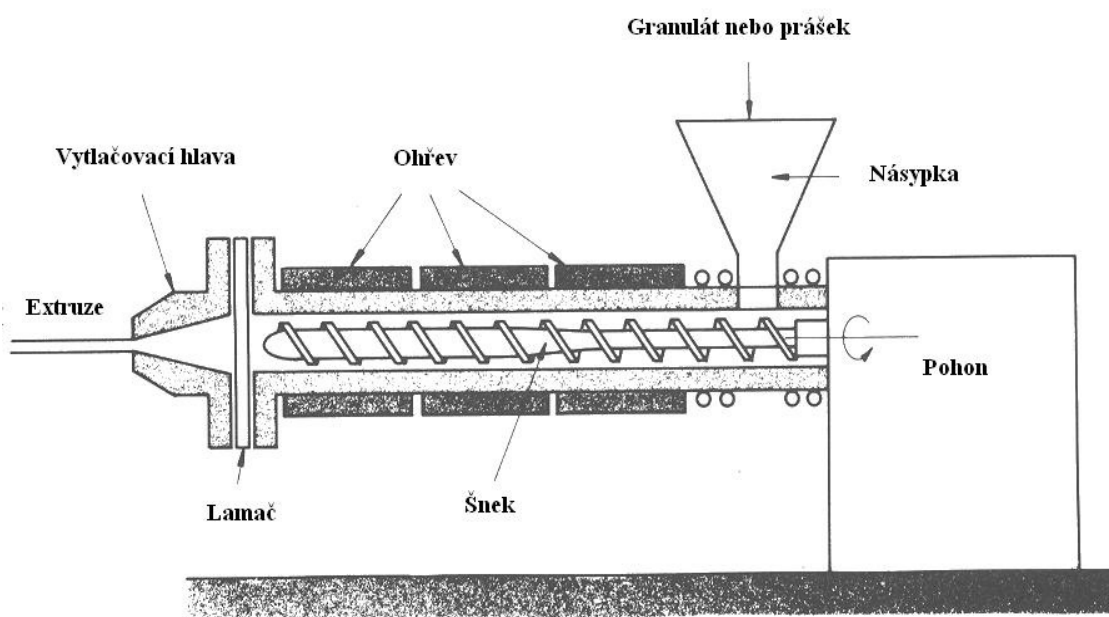
Vstřikování je jeden z hlavních způsobů zpracování termoplastů. Provádí se za pomoci vstřikovacích strojů. Vstřikovací stroj je složen z tavicí komory, dávkovacího zařízení, mechanismu pro vstřikování a uzavíratelné formy. Celá technologie spočívá ve vstřikování materiálu v plastickém stavu pod tlakem do formy. Následně se po vyplnění formy materiál ochladí. Po ztuhnutí se forma otevře a vylisek vyjme. Zbytkový materiál je možno rozezlít a znovu vstřikovat, ztráty polymeru jsou tudíž minimální. [1, 10, 12]



Obr. 4: vstřikovací stroj (převzato z [16])

4.2 Vytlačování

Zpracování vytlačováním je další hospodárnou technologií. Vytlačování se provádí ve šnekových vytlačovacích strojích. Tato technologie je vhodná pro výrobu fólií, desek, trubek, profilovaných částí nebo pro izolování a opláštění kabelů a vodičů. Často se při této technologii setkáváme i s pojmem extruze. Z latinského slova extrudere neboli vyhánět. Tímto slovem se rozumí kontinuální výroba polotovarů nebo fólií z plastů. Princip extruderu je stejný jako strojku na mletí masa, z tohoto důvodu se proto označuje jako šnekový stroj. Hlavní částí vytlačovacího šnekového stroje je pracovní válec, který je vyhříván topnými pásy. Ve válci se otáčí šnek, který dopravuje plastickou hmotu do vytlačovací hlavy. Hmotu se dle tvaru vytlačovací hmoty různě tváří. Plochá hlava se používá pro výrobu plochých desek a fólií, příčná hlava pro vyfukování fólií a vytlačování trubek, přímá hlava zase k vytlačování tyčí a profilů. [1, 10, 12, 15]



Obr. 5: Vytlačovací šnekový stroj (převzato z [5] a upraveno)

4.3 Válcování

Válcování, které je často označováno také jako kalandrování, je technologie sloužící především na výrobu fólií a desek. Válcovací stroje se nazývají kalandry. Kalandry mají různou konstrukci a liší se např. v počtu a uspořádání válců. Nejpoužívanější typy jsou čtyřválcové. Vyhřívání válce je možno uskutečnit za pomoci páry. Vzhledem ke snaze dosažení plynulého výrobního pochodu s využitím mechanizace a automatizace dochází k

budování výrobních linek. Linky obsahují hnětací stroje s doplňkovým zařízením, kde hnětací stroje zásobují kalandry. [1, 10, 12]



Obr. 6: Linka na výrobu fólií za pomoci válcování (převzato z [5] a upraveno)

4.4 Lisování

Lisování je převážně technologie pro zpracování reaktoplastů, ale v určitých případech ji lze využít i pro termoplasty. Technika pro zpracování termoplastů se nazývá přímé lisování, tato technika se provádí v tzv. etážových (několikapatrových) lisech. Nejčastěji se používá k výrobě PVC desek nebo silných desek a fólií z PE. Mezi hlavní parametry etážových lisů patří rozměr desek, počet etáží a lisovací tlak. Lisy jsou zpravidla opatřeny 10 až 15 etážemi, vzdálenost mezi etážemi bývá při otevření 100 mm. [1, 10, 12]

5 Použití termoplastů v elektrotechnice

Termoplasty se v elektronice využívají hned v několika oblastech. Největší množství termoplastů se používá v elektrotechnických aplikacích, kde tvoří izolační vrstvy a systémy. Z celkové objemu použitých polymerů v elektrotechnických aplikacích je celých 75 % termoplastů. Využití najdou v kabelovém průmyslu, u konektorů, lisovaného elektrického příslušenství, transformátorů, cívek, pouzder, integrovaných obvodů, tranzistorů atd. [17]

Většina termoplastů sloužících jako izolant může vykonávat svoji funkci při různých napětích a při stejnosměrném i střídavém proudu. Využitelné frekvence se pohybují standardně až do 10^5 MHz. Napětí se může při běžném provozu pohybovat od několika mikrovoltů (komunikační zařízení) až do stovek kilovoltů (distribuční síť). Proudů se mohou pohybovat v rozmezí od pikoampérů až po kiloampéry. [17]

Standardní termoplasty jsou termoplasty (běžně označovány jen jako plasty) mezi které patří např. PE, PVC, PP, PS, PA, PMMA. Tyto materiály se používají v mnoha elektrotechnických aplikacích, jsou to izolace vodičů, pláště kabelů, konektory, jádra, cívky, izolační fólie a desky, pouzdra, kryty. Do většiny z nich je za pomoci míchání možno přidat retardéry hoření. [17]

Termoplasty pro extrémní podmínky jsou polymerní materiály, které typicky vykazují vysokou odolnost proti zvýšené teplotě, chemikáliím, vysokou pevnost, vysokou elektrickou pevnost a různé stupně odolnosti proti hoření. Do této skupiny patří např. PC, PI, PAI (polyamid-imid), PTFE, PPS (polyfenylensulfid), PPO (polypropylenoxid), PVDF (polyvinylidenfluorid), PEI (polyeterimid). Tyto materiály se používají pro izolaci vodičů, pláště kabelů, filmy a fólie při zvýšených teplotách (typicky okolo 250 °C i výše), pro specializované zařízení (např. palivové články), elektretové zařízení atd. [17]

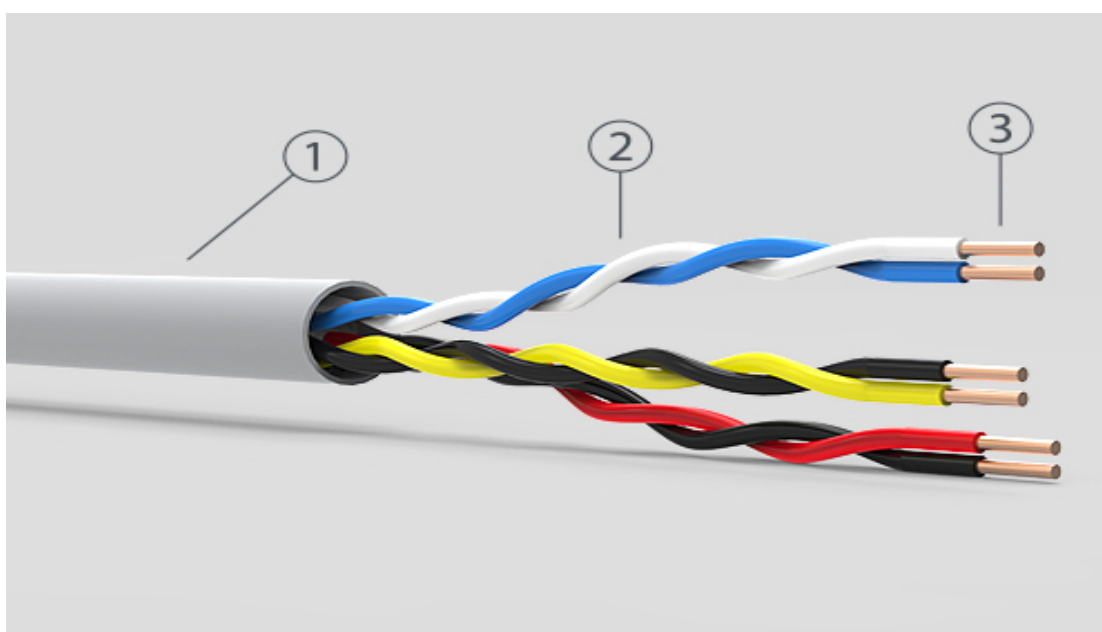
5.1 Izolace v kabelovém průmyslu

V kabelovém průmyslu se produkuje velké množství vodičů. V drtivé většině případů se jedná o vodiče z mědi či hliníku. Primární funkcí polymerních materiálů je poskytnout elektrickou izolaci vodičů, která je vzhledem k bezpečnosti velmi důležitá. Důležitý je také

vnější plášť, který chrání kabely před účinky chemikálií, vlhkostí, ozonu, dalších faktorů životního prostředí a od oděru a řezu. Speciální polymery zlepšují nehořlavost kabelů. Materiály použité pro izolace musí vykazovat dostatečné fyzické a stárnuocí vlastnosti, aby odolaly různým prostředím a přitom zachovaly jejich elektrickou integritu po dlouhou dobu (typicky okolo čtyřiceti let). [17]

V současné době si termoplasty udržují jednoznačné prvenství v oblasti izolování vodičů a výrobě kabelových plášťů. Hlavními důvody jsou jejich výborné izolační schopnosti, příznivá cena a velice snadná zpracovatelnost. Mezi termoplasty, které se v kabelovém průmyslu používají, patří: PVC, PE, zesítěný PE (XLPE), pěnový PE, PUR, PTFE atd. [18]

Za působení tepla a mechanického tlaku se materiál převádí z tuhého do plastického stavu, po dosažení požadovaného tvaru se zpět převádí do tuhého tvaru. Na vodič se polymer nanáší pomocí šnekových vytlačovacích strojů (extrudérů). PVC a PE izolace se po nanesení pouze ochladí, u izolace XLPE je potřeba ještě provést zesítnění látky, které se provádí chemicky. Ještě před zpracováním na výtlačném stroji se do materiálu přidá určité množství katalyzátoru, který při působení vodní páry při zvýšené teplotě nastartuje síťování. Tato varianta se nazývá tzv. hydrolytický způsob zesítnění PE. [18]



Obr. 7: Izolace vodičů a plášť kabelu 1)PVC plášťová izolace 2)PVC žilová izolace 3)měděný vodič (převzato z [19] a upraveno)

5.1.1 Polyvinylchlorid (PVC)

PVC je velmi univerzální a nejpoužívanější polymer využívaný v kabelovém průmyslu. PVC disponuje dobrou kombinací vlastností, což vysvětluje, proč je tak často využívaný. PVC je trvanlivý, odolný vůči UV záření a vykazuje dobrou odolnost vůči chemikáliím, olejům, povětrnostním vlivům a vodě. Typické hodnoty relativní permitivity se pohybují od 3,5 do 6,5 dle druhu PVC. Využívá se jako izolace žilová tak i jako izolace plášťová. [20, 21]

Tab. 4: Příklad PVC formulace pro kabelový průmysl [17]

Označení složky	Množství (hmotnostní díly)	Název složky/funkce
PVC	100	základní polymer
DRAPEX 6.8	5	epoxidovaný sojový olej / změkčovadlo
Mark 6734	5	baryum-zinkový stabilizátor
DIDP	40	diisodecylftalát / změkčovadlo
Atomite whitening	75	uhličitan vápenatý / výplň
Hydral 710	45	trihydrát hliníku / retardér hoření
Elvaloy HP 411	80	etylene terpolymer / nemigrační změkčovadlo
Irganox 1010	0,8	fenolický primární antioxidant
DLTDP	0,32	thioester sekundární antioxidant
TiPure	3	bílý pigment
Celkem	354,12	

5.1.2 Polyetylen (PE)

PE je forma termoplastické izolace, která se vyskytuje v různých formách. Může se jednat o pevnou (běžnou formu), pěnovou nebo zesítěnou formu. Jeden z elektrických rozdílů mezi běžnou a pěnovou formou je relativní permitivita. Relativní permitivita pěnového PE je nižší než u běžného PE, v číslech je to konkrétně 2,3 pro pevnou izolaci a 1,6 pro pěnovou. Běžný PE se používá jako izolace žilová a nikoli jako izolace plášťová. Vzhledem k odolnosti PE proti vlhkosti se obvykle používá ve vlhkém prostředí. Všeobecně lze říci, že je PE izolace tuhá. Tuhost lze měnit v závislosti na formách s vysokou a nízkou hustotou (HDPE a LDPE). Pěnový PE se používá jako dielektrikum u kabelů, protože má lepší dielektrické vlastnosti. Samozhášecí varianty PE jsou k dispozici, ale mají bohužel horší elektrické vlastnosti. [20–22]

Tab. 5: Formulace izolačního pláště chemicky zesíťovaného polyetyleny [17]

Označení složky	Množství (hmotnostní díly)	Název složky/funkce
PE s nízkou hustotou	100	základní polymer
Substituovaný chinolin	0,5	antioxidant
N990 Black	60	MT (středně termální saze)
Dikumylperoxid	7	síťovadlo
Celkem	167,5	

5.1.3 Polyuretan (PUR)

PUR se vzhledem ke špatným elektrickým vlastnostem používá běžně jako plášťová izolace. O PUR je známo, že je velmi trvanlivý a odolný proti UV záření. PUR je také odolný vůči oxidaci, chemikáliím a vodě. Unikátní vlastností je flexibilita. Díky své pružnosti a vynikajícím "paměťovým" vlastnostem se PUR používá jako materiál pro opláštění kroucených kabelů a v trvale pružných aplikacích. [20, 21]

5.1.4 Polypropylen (PP)

PP se obvykle používá jako izolace vodičů, je podobný PE, s rozdílem, že PP je tvrdší. Vzhledem k tomu, že je tvrdší, může být PP použit na tenkostěnné aplikace. Relativní permitivita se pro pevný PP pohybuje okolo 2,25. [20, 21]

5.1.5 Polytetrafluoroetylen (PTFE)

Polytetrafluoroetylen, označovaný také jako PTFE a Teflon® je syntetický fluoropolymer. Používá se obvykle v extrémních prostředích. Vydrží velmi vysoké teploty, je extrémně odolný a vykazuje vynikající vlastnosti. [20, 21]

Tab. 6: Tabulka materiálů používaných v kabelovém průmyslu [21]

Materiál	Rozsah teplot	Odolnost proti ohni	Chemická odolnost	Odolnost proti UV	Trvanlivost	Pružnost
PE	-60 °C až 80 °C	špatná	ucházející	výborná	dobrá	ucházející
PP	-40 °C až 105 °C	špatná	výborná	výborná	ucházející	špatná
PUR	-55 °C až 80 °C	špatná	výborná	dobrá	výborná	výborná
PTFE	-60 °C až 200 °C	výborná	výborná	výborná	dobrá	dobrá
PVC	-20 °C až 105 °C	dobrá	dobrá	výborná	dobrá	dobrá

5.1.6 Testování v kabelovém průmyslu

Všechny zkoušky prováděné na hotových výrobcích reprezentují určitou míru kvality použitých materiálů a výrobních technik. Každá zkouška dokáže rozpoznat specifické problémy (špatná disperze plniv, vytlačování za nesprávných teplot, nesprávná rychlost vytlačování, rychlost chlazení, stupeň zesílení atd.). Kabel se podrobí několika testům životnosti včetně řady testů, které začínají v továrně a potenciálně přetrvávají po celou dobu životnosti kabelu. Testování kabelů se provádí v různých fázích, kdy se testuje samotný materiál, testuje se během výroby a později se testuje i v terénu. Typy testů se odvíjejí od typu kabelu, Parametry testování jsou nastaveny také v závislosti na maximálním napětí, pro které jsou kabely konstruovány, a např. zda-li je kabel stíněný či nikoliv. [17]

5.2 Izolace elektrických strojů

Izolace elektrických strojů je velice důležitá oblast, kde naleznou své uplatnění i termoplasty. Používají se zde např. aromatické polyamidy, které známe pod obchodním názvem Nomex nebo polyimidy, kde se používá obchodní název Kapton.

5.2.1 Nomex®

Nomex je syntetický materiál vyrobený z krátkých vláken a malých vláknitých částí aromatického polyamidu. Částičky jsou zpracovány do podoby papíru běžnými papírenskými technologiemi. Papír je poté zpevňován za pomoci kalandrování (válcování mezi válci s vysoce lesklým povrchem) při vysokých teplotách. Nomex je nehořlavý, samozhášecí, odolává účinkům chemikálií, rozpouštědel (při běžné teplotě) a záření, působením tepla netaje, má vysokou pevnost v tahu, odolává vysokým teplotám a má výborné elektrické vlastnosti. [23]

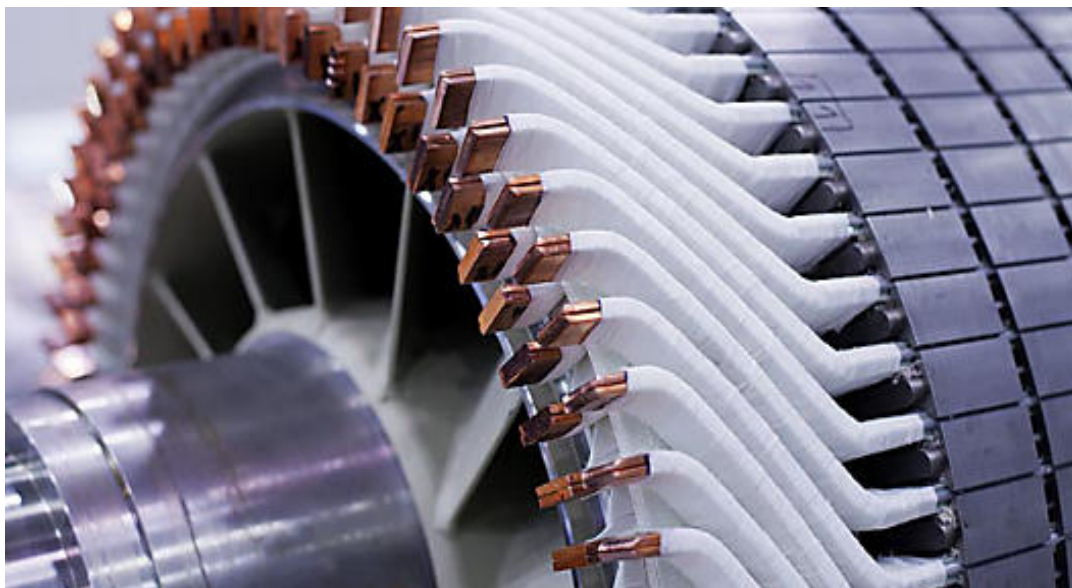
Tab. 7: Elektrické vlastnosti Nomexu [23]

	Rozsah teploty	Relativní permitivita	Vnitřní rezistivita [Ω·m]	Elektrická pevnost [kV·mm ⁻¹]
Nomex®	až do 220 °C	2,5	> 10 ¹⁶	40

Nomex je snášlivý se všemi systémy na bázi laků a pryskyřic používanými v elektrotechnickém průmyslu. Problém mu nedělají ani minerální a syntetické oleje

používané v transformátorech. Při dlouhodobém vystavování vysokým teplotám se jeho výborné vlastnosti nemění a z tohoto důvodu je ideální pro aplikace v elektrických strojích. Velmi dobře se dá laminovat do více vrstev, případně kombinovat s jinými materiály. Na povrch je možno nanášet pryskyřice, které umožňují výborné spojení s jinými materiály. Provedení je v různých tloušťkách a liší se způsobem zpracování (kalandrovaný a nekalandrovaný materiál). [23]

Využití nalezne jak u točivých strojů (vodiče, drážky, cívky, vývody motorů i generátorů) tak i u transformátorů (izolace závitů, vrstev, sekcí a přívodů) nebo jiné elektrotechnické výrobě (kostry cívek, páskové potenciometry atd.). [23]



Obr. 8: Izolace elektrického stroje z materiálu Nomex (převzato z [24])

5.2.2 Kapton®

Kapton je polyimid, který vzniká bipolykondenzační reakcí aromatického dianhydridu a aromatického diaminu. Dodává se ve formě fólie, uplatnění nachází ve zvláště exponovaných případech izolování vinutí elektrických strojů. Aplikací Kaptonu lze snížit hmotnost vinutí trakčních strojů až o 5 % při zvýšení výkonu až o 8 %. Kapton má vynikající teplotní odolnost, 300 °C po dobu 3 měsíců, případně 250 °C po dobu až dokonce 8 let, krátkodobě může pracovat při teplotách v rozmezí od -120 °C do 350 °C. Působením tepla nehoří, netaje, není známé žádné organické rozpouštědlo, které by narušovalo jeho strukturu, je ale náchylný na poškození poškrábáním, z tohoto důvodu se

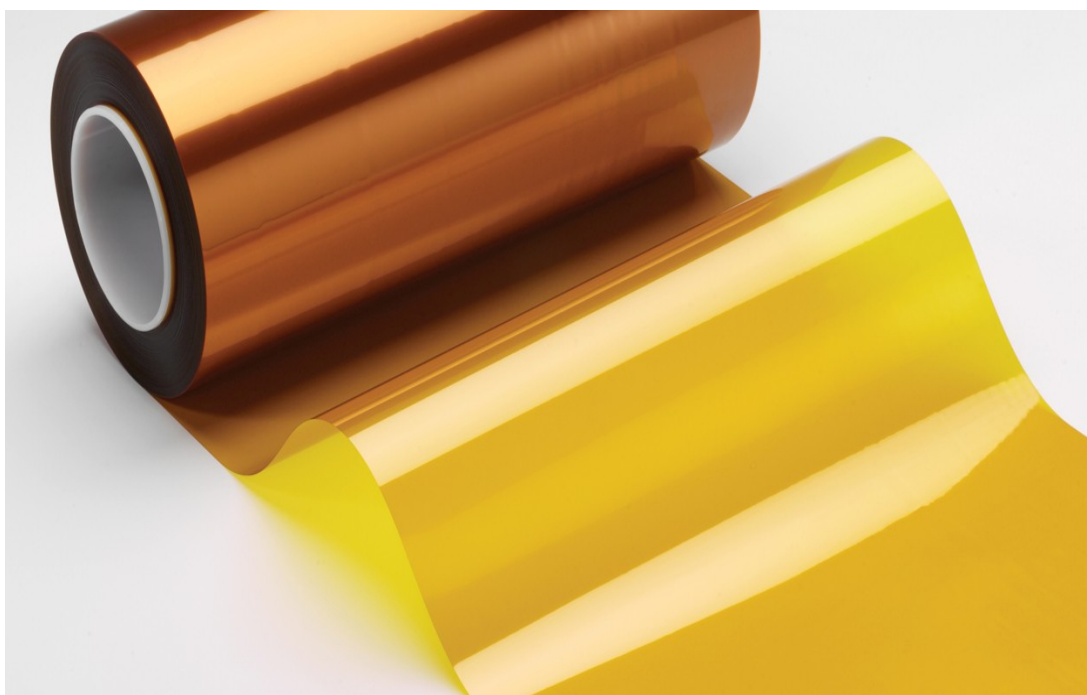
používá v kombinaci s jiným materiálem, který ho chrání. Kapton má vynikající elektrické vlastnosti. [23]

Tab. 8: Elektrické vlastnosti Kaptonu [23]

	Relativní permitivita	Ztrátový činitel	Vnitřní rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Elektrická pevnost při $d=1\text{mm}$ [$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$]	Elektrická pevnost $d=3\text{mm}$ [$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$]
Kapton®	3 až 3,5	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	7,7	5,2



Obr. 9: Izolační pásy z materiálu Kapton (převzato z [24])



Obr. 10: Návin izolační fólie z materiálu Kapton (převzato z [24])

5.3 Zalévání a zapouzdření

Ochrana elektronického systému je zásadně důležitá. Elektronický plošný spoj obsahuje různé choulostivé komponenty (tranzistory, diody, kondenzátory, polovodiče atd.). V důsledku jakéhokoliv poškození některého z komponentů dojde k selhání celého zařízení. Proto je důležitá spolehlivá ochrana, která počítá s vlhkostí, tepelnými šoky, chemikáliemi nebo mechanickými otřesy. Řešení které odstraní nebo výrazně omezí tyto faktory je zalévání a zapouzdření. Z oblasti termoplastů se v této oblasti využívají polyuretany (obr. 11). [17]

Typické aplikace zahrnují relé, napájecí zdroje, zesilovače, transformátory, zapalovací cívky nebo vysokonapěťové transformátory. Kapalně systémy jsou injekčně aplikovány přímo do elektronických komponentů bez poškození citlivého vedení nebo jiných částí. Obecně platí, že použité materiály musí vykazovat následující atributy: malé smrštění - materiál musí vykazovat minimální smrštění při vytvrzování, absenci nebo minimální množství těkavých látek - jsou preferovány systémy bez rozpouštědel, pevnost v tahu, v ohybu a v tlaku, chemickou odolnost, nízké náklady. [17]

Množství kapalného materiálu je závislé na rozměrech součástí. Zalévání obvykle znamená použití většího množství ochranné kapalně látky. Typickými příklady jsou transformátory, zapalovací cívky, relé a napájecí zdroje. Jemnější díly (desky plošných spojů) jsou chráněny konformním povlakem. Vytvrzení zalévací hmoty je téměř vždy založeno na chemických reakcích. Materiály se při zapouzdřování nanášejí nástřikem, štětcem nebo namáčením. [17]



Obr. 11: Dvousložková polyuretanová zalévací hmota v praxi (převzato z [25])

5.4 Kompozitní materiály

Kompozitní materiál je specifický materiál, který je kombinací dvou nebo více komponentů, přičemž se u nich výrazně liší mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Konečné vlastnosti kompozitu jsou určeny vlastnostmi všech obsažených složek a jejich objemových podílů. Kompozitní materiály se skládají ze základních dvou složek. Jedná se o matici a výztuž. Hlavním účelem matrice je především spojovat výztuž a vytvářet výsledný tvar profilu. Účelem výztuže je převedení hlavního zatížení na matici. Uplatnění kompozitních materiálu je široké, používají se např. v automobilovém průmyslu nebo u desek plošných spojů. [26, 27]

Nejrozšířenějším druhem kompozitních materiálů jsou kompozity s polymerní maticí. Právě zde naleznou své uplatnění termoplasty. Základní maticí jsou nejčastěji polyamid, polypropylen, polykarbonát nebo termoplastické polyestery. [26, 27]

6 Termoplasty v elektrickém poli

Všeobecně lze říci, že chování jakékoliv látky po vložení do elektrického pole je závislé na koncentraci a druhu nosičů elektrického náboje, které daná látka obsahuje. U termoplastů tomu není jinak. Ačkoliv se jedná o izolant tak přesto obsahuje jako každý reálný izolant určitě množství volných nosičů elektrického náboje. Tudíž je téměř vždy možné změřit určitou vodivost. Po vložení do vnějšího elektrického pole začne na termoplast (dielektrikum) působit pohyb volných nosičů náboje (elektrická vodivost dielektrika) a také posun vázaných nosičů náboje (polarizace). [23, 27]

Nejprve je nutné si vysvětlit dva pojmy (dielektrikum x izolant). V případě dielektrika se jedná o látku, která si je schopna po vložení do elektrického pole vytvořit vlastní vnitřní elektrické pole. Izolanty představují podskupinu dielektrik a jsou to materiály, který mají za úkol zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Každý izolant je dielektrikum, ale ne každé dielektrikum je izolantem. [23, 27]

6.1 Interakce elektrického pole a látek

Interakce elektrického pole a látek začíná vždy po vložení dané látky do elektrického pole. Jedná-li se o dielektrikum (reprezentované termoplastem) začnou v dielektriku v tento okamžik probíhat určité děje. Tyto děje konkrétně nazýváme polarizačními procesy. Jestliže se tedy bavíme o interakci elektrického pole a dielektrika, sledujeme průběh polarizačních procesů, které v dielektriku probíhají po vložení do elektrického pole. Pokud se superponují příspěvky všech dílčích polarizací, tak se získá průběh celkové polarizace. Přítomnost některých polarizací (ztrátových) je úzce souvislá se vznikem dielektrických ztrát. [23]

Sledovat polarizační děje lze dvěma způsoby. Prvním způsobem je sledování polarizačních jevů z hlediska makroskopického. Druhým způsob jak nahlížet na polarizační děje, je z hlediska mikroskopického. [23]

6.1.1 Makroskopické hledisko

Z pohledu makroskopické hlediska se jedná o sledování dielektrika jako celku, neřešíme vnitřní děje ani strukturu látky. Dalo by se říci, že dané dielektrikum sledujeme

"zvenku", dielektrikum bereme jako určitý objekt jasně daných rozměrů. Výsledkem je vznik vázaných nábojů na povrchu, s čímž přímo souvisí vznik dipólového momentu dielektrika jako celku. Můžeme zde tedy definovat vektor polarizace \vec{P} [C·m⁻²], který popisuje zpolarizované dielektrikum. Pro vektor polarizace poté platí [23]:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (3)$$

$\Delta \vec{M}$ [C·m] je orientovaný dipólový moment látky

ΔV [m³] je objem látky

6.1.2 Mikroskopické hledisko

V případě mikroskopického hlediska se už strukturou zabýváme a podle struktury řešíme fyzikální podstatu polarizačních dějů, které probíhají "uvnitř" dielektrika. Zabýváme se elementárními částicemi - nosiči elektrického náboje a jejich elektrizováním. Díváme-li se na dielektrikum z hlediska mikroskopického, chápeme zde polarizace jako pružné posouvání nosičů vázaného náboje, které je orientované podle směru přiloženého pole, popřípadě jako natáčení dipólových momentů ve struktuře látky do směru působícího elektrického pole. [23]

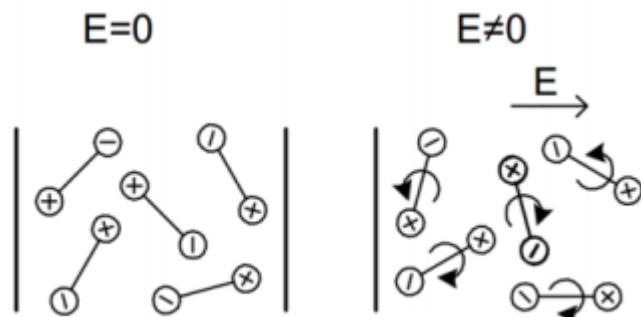
6.2 Rozdělení podle polárnosti

Dle polárnosti můžeme termoplasty rozdělit na polární a nepolární, rozdílná je struktura materiálu a z toho vyplývající i rozdílné chování v elektrickém poli. [23, 28]

6.2.1 Polární dielektrika

Polární dielektrikum obsahuje ve svém objemu permanentní elementární dipólové momenty a to i v případě, že na dielektrikum nepůsobí vnější elektrické pole. Dipólové momenty, které v dielektriku existují jsou důsledkem struktury dané látky. Bez přiloženého vnějšího pole se elementární dipóly vzájemně elektricky ovlivňují, jsou náhodně orientovány a jejich vzájemné působení se vyruší. V tomto důsledku se polární dielektrika jeví celkově neutrálně. Dojde-li ale k působení vnějšího pole na polární dielektrikum, začne na konce dipólů působit točivý moment, který dané dipóly o určitý úhel pootočí a to

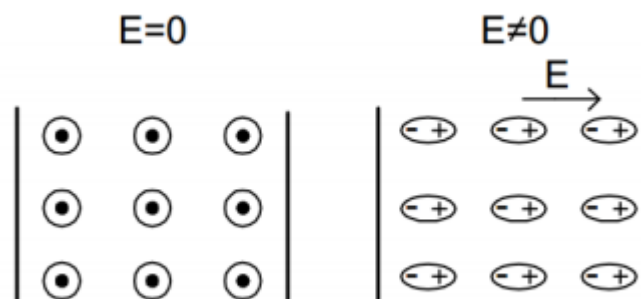
ve směru působícího elektrického pole. Úhel o který se dipóly pootočí je závislý na velikosti elektrického pole. Mezi typické zástupce polárních termoplastů patří např. PVC nebo PA. [23, 28, 29]



Obr. 12: Polární dielektrikum (převzato z [28] a upraveno)

6.2.2 Nepochární dielektrika

Jak už tomu napovídá předchozí kapitola, nepolární dielektrika bez přiložení vnějšího pole žádné vlastní elektrické dipólové momenty nemají. Polarizační děje se totiž odehrávají uvnitř atomu a bez přiloženého vnějšího elektrického pole mají kladné i záporné náboje shodné těžiště ve středu jádra. Jde tedy o nábojové vyvážení a proto nevznikají žádné elementární elektrické dipóly. Bude-li ale na nepolární dielektrikum působit vnější elektrické pole, začne pole vyvolávat malý posun kladného náboje ve směru přiloženého náboje. Posun se samozřejmě začne týkat i záporného náboje, který se začne vychylovat v opačném směru působícího pole. Typický zástupce nepolárního termoplastu je PE. [28, 29]

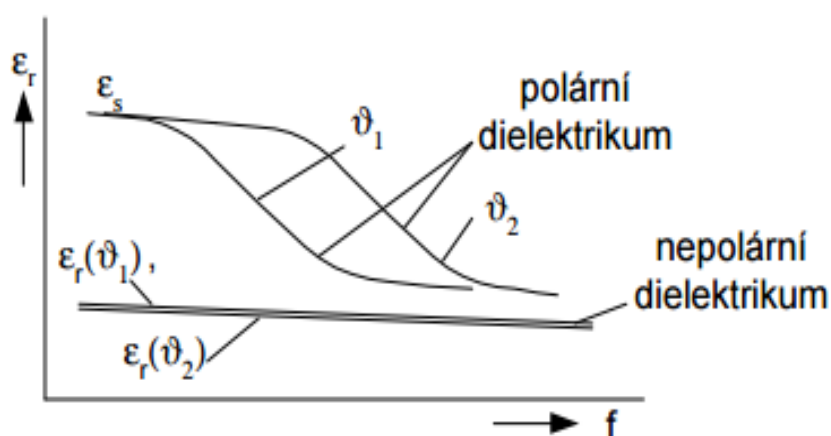


Obr. 13: Nepochární dielektrikum (převzato z [28] a upraveno)

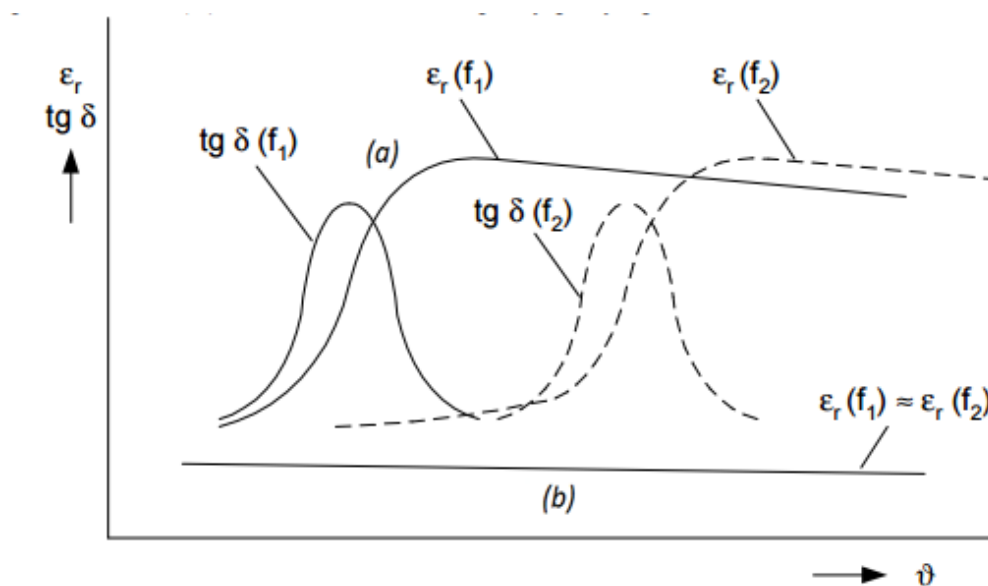
6.2.3 Závislost relativní permitivity na teplotě a frekvenci

U dielektrik existuje velice důležitá fyzikální souvislost mezi teplotními a frekvenčními závislostmi relativní permitivity a ztrátového činitele. Vzhledem ke znalostem z výše uvedeného textu týkajícího se polárních a nepolárních dielektrik víme, že u nepolárního dielektrika jsou polarizace způsobeny deformacemi elektronových drah atomů proti směru elektrického pole. Tento děj je velice rychlý a také energeticky nenáročný. To se poté projeví i makroskopicky, kdy je relativní permitivita a ztrátový činitel ideálního nepolárního dielektrika frekvenčně i teplotně nezávislý. [23, 28]

U polárních dielektrik je tomu ale úplně jinak. Zde jsou časové a energetické nároky, které jsou zapotřebí k natočení dipólů do krajních poloh, velmi významně závislé na prostředí, v němž se dané procesy odehrávají. Hlavní roli zde sehrává vnitřní viskozita. Vnitřní viskozita je silně závislá na teplotě a udává možnost posunu elektrických dipólů do směru vnějšího pole. Další faktor ovlivňující natáčení dipólů je frekvence. Při nízkých frekvencích, kdy je doba půlperrody dostatečně dlouhá se elektrické dipóly stíhají natočit do krajních poloh. Při nárůstu frekvence však doba půlperrody klesá a dipóly se do krajních poloh přestávají stíhat natáčet. S růstem teploty dochází ke snížení vnitřní viskozity a dipóly jsou schopně rychlejšího sledování změny pole. U frekvenčních závislostí se to projeví posunutím vrcholů křivek polarizačních dějů do oblasti vyšších frekvencí. [23, 28]



Obr. 14: Frekvenční závislost relativní permitivity u polárního a nepolárního dielektrika pro dvě různé teploty (převzato z [28])



Obr. 15: Teplotní závislost relativní permitivity a ztrátového činitele pro dva různé kmitočty ($f_1 < f_2$) u polárního dielektrika (a) a u nepolárního dielektrika (b) (převzato z [28] a upraveno)

6.3 Druhy polarizací

Polarizací je hned několik druhů. Hlavní rozdělení spočívá v působení či nepůsobení vnějšího elektrického pole na dielektrikum. Nepůsobí-li na dielektrikum vnějšího elektrického pole dělíme polarizace na spontánní, piezoelektrické a pyroelektrické. [23]

V případě působení vnějšího elektrického pole je dělení mnohem složitější. Záleží na skutečnosti, zda jsou nosiče elektrického náboje volné či vázané. V případě volných nosičů se jedná o polarizaci migrační. Jedná-li se ale o nosiče elektrického náboje vázané, záleží dále jsou-li vázány silně nebo slabě. V momentu kdy jsou vázány silně nazýváme polarizace deformačními a patří sem polarizace elektronová, iontová a pružná dipólová. Naopak při vazbě slabé nazýváme polarizace relaxačními a dělíme je na iontovou relaxační a dipólovou relaxační. [23]

V první řadě se podíváme na polarizace bez působení vnějšího elektrického pole, které probereme jen v krátkosti, jelikož jde o polarizace se kterými se tak často nesetkáváme. Zpolarizování v těchto zvláštních případech probíhá jinými vlivy než je elektrické namáhání. Piezoelektrická polarizace probíhá v piezoelektrikách, což jsou látky, které se vlivem mechanického namáhání jsou schopné polarizovat. Dojde-li k mechanickému namáhání krystalu piezoelektrika, proběhne jeho zpolarizování a na povrchu krystalu se objeví vázaný náboj. Další speciální polarizací je polarizace spontánní, tento druh se

vyskytuje u elektretů. Elektrety jsou dielektrika, které mají schopnost udržet ve svém okolí stálé elektrické pole. U elektretů tedy dosahujeme polarizace vhodným tepelným zpracováním dielektrika, kdy ještě zároveň působí elektrické pole nebo světlo. Poté je označujeme jako elektroelektrety, případně fotoelektrety. Pyroelektrická se zase vyskytuje v pyroelektrikách, kde je způsobena zvláštní strukturou pyroelektrik. Jedná se také o spontánní polarizaci a je kompenzována povrchovým nábojem, kde hustota náboje závisí na teplotě. [23]

6.3.1 Migrační polarizace

Polarizace kterých se účastní volně vázané nosiče elektrického náboje. V podstatě se vyskytuje u dielektrik, které obsahují makroskopické nehomogenity. Makroskopickými nehomogenitami rozumíme praskliny, vzduchové bubliny, nečistoty a obdobné strukturální defekty. Na nehomogenitách se po přiložení vnějšího elektrického pole zachytávají migrující volné nosiče náboje, což ve výsledku projeví jako polarizace dielektrika. Ve srovnání s ostatními polarizacemi jsou migrační nejpomalejší. Migrační polarizace jsou ztrátové. Hlavní oblastí kde tyto polarizace můžeme naléznout jsou feroelektrické látky, které jsou charakterizovány vlastní doménovou strukturou. [23]

6.3.2 Deformační polarizace

Jak už bylo zmíněno výše, deformační polarizace probíhají za působení vnějšího elektrického pole a nosiče elektrického náboje jsou vázány silně. Nosičem elektrického náboje jsou v tomto případě polarizace elektrony, ionty či stálé dipóly. Silně vázané nosiče náboje jsou v atomu, molekule či krystalu drženy tak pevně, že je možné posouvání (z rovnovážně polohy) za působení vnějšího elektrického pole jen na minimální vzdálenosti. U deformačních polarizací tedy dochází jen k malým posunům nosičů náboje, ale neznamená to, že by posuny neměly vliv na relativní permitivitu dielektrika, vzhledem k velkému množství posouvaných nosičů může být permitivita zásadně ovlivňována. Deformační polarizace nejsou závislé na tlaku či frekvenci, nemají-li změny za důsledek změnu struktury látky (rozrušení látky nebo fázové přeměny). Další důsledek pevné vazby nosičů náboje je skutečnost, že deformační polarizace jsou bezztrátové. [23]

Elektronová polarizace

V případě že na atom nepůsobí vnější elektrické pole je těžiště kladného náboje (jádro) a těžiště záporného náboje (elektronový obal) v jednom bodě. Nedochozí k polarizaci a tudíž nemá atom ani dipólový moment. Začne-li ale na atom působit elektrické pole, budou na kladný náboj jádra a na záporný náboj elektronového obalu působit elektrostatické síly opačného směru. Elektrony se vůči jádru posouvají a dochází k deformaci původního ("klidového") tvaru elektronového obalu. Těžiště záporného náboje se vzhledem k deformaci o určitou vzdálenost posune. Posunutím těžišť nábojů získává atom indukovaný dipólový moment. Doba ustálení se pohybuje v rozmezí 10^{-16} až 10^{-13} s. Důležitým poznatkem elektronová polarizace je to, že se vyskytuje u všech látek, ve všech skupenstvích a dochází k ní vždy. [23]

Iontová polarizace

Jak už název napovídá, hlavní roli v tomto případě polarizace hrají ionty, které jsou základními prvky iontových krystalů. Odlišnost od elektronové polarizace spočívá v existenci určitých dipólových momentů již bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Důsledkem těchto permanentních dipólových momentů je struktura dielektrika tvořeného iontovými krystaly. Za působení elektrického pole se začnou ionty pružně posouvat. Pružné vzhledem k tomu, že jsou ionty vázány silně v uzlech krystalové mříže. Posunutí má poté za následek změnu velikosti i změnu směru jednotlivých dipólů. Doba ustálení se pohybuje v rozmezí 10^{-13} až 10^{-12} s. Na iontovou polarizaci můžeme narazit u látek s čistě iontovou vazbou, případně pak i u látek s jistou přechodnou vazbou mezi iontovou a kovalentní vazbou. [23]

Pružná dipólová polarizace

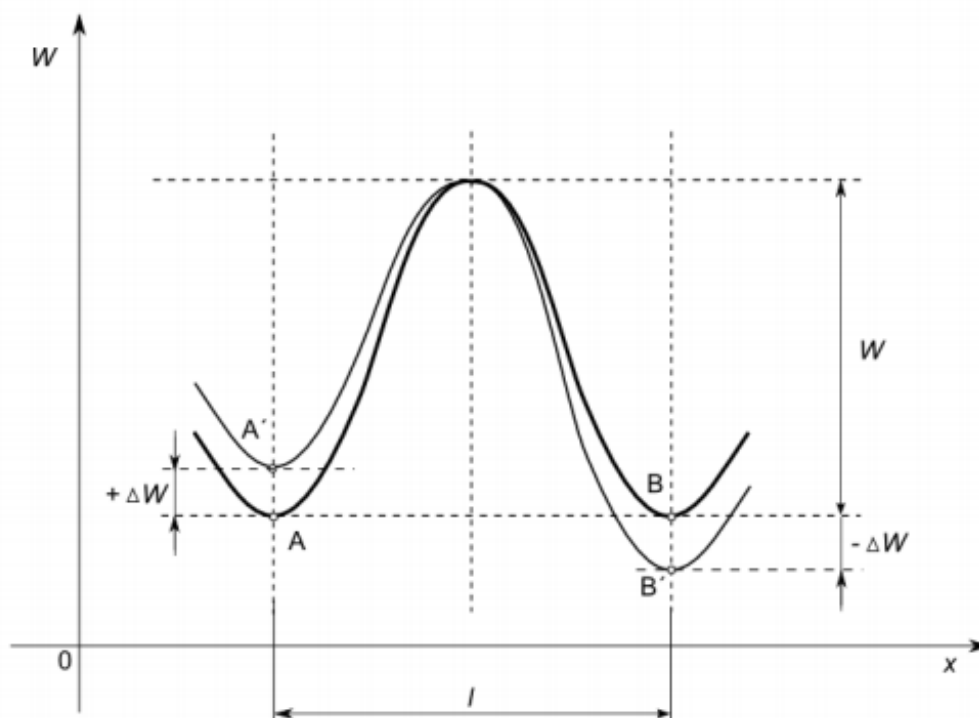
Polarizace vyskytující se v pevných látkách, kde jsou sice molekuly vázány pružnými vazbami, ale může vzhledem k silné vazbě dojít jen k malým posunům. Za působení elektrického pole dochází ke změně velikosti a směru dipólových momentů. Doba ustálení je totožná jako u polarizace iontové. [23]

6.3.3 Relaxační polarizace

Hlavním rozdílem relaxační polarizace od polarizace deformační je doba a forma průběhu. Relaxační polarizace je charakteristická relaxačními pochody a doba je značně delší než u deformační. Relaxační polarizaci dělíme na iontovou a dipólovou. Důležitý faktor při těchto polarizacích je teplota, přesněji tepelný pohyb nosičů elektrického náboje. V důsledku tepelnému pohybu slabě vázané částice relativně snadno překonávají potenciálové bariéry mezi jednotlivými polohami. Tepelný pohyb nosičů je chaotický, všechny možné polohy nosičů jsou tedy stejně pravděpodobné a nedochází k nerovnoměrnému rozložení. K polarizaci tudíž bez působení vnějšího elektrického pole nedochází. Změna nastává v momentu, kdy přiložíme elektrické pole, dojde v tomto důsledku totiž ke změně poměru výšek potenciálových bariér, tím se některé nosiče stanou energeticky výhodnějšími a tím pádem i pravděpodobnějšími. Rozložení nosičů náboje se stane v jednotce objemu nerovnoměrné a vzniká asymetrie, ta vede k získání dipólového momentu. Děje se matematicky popisují pomocí modelu dvojité potenciální jámy za pomoci výše zmíněné asymetrie. Při relaxační polarizaci zavádíme tzv. relaxační dobu. Relaxační doba je časová konstanta přechodového děje a je charakteristickou hodnotou relaxační polarizace. Důležitou poznámkou je, že relaxační polarizace jsou ztrátové. [23]

Iontová relaxační polarizace

Iontovou relaxační polarizací se lze zabývat u látek složených z iontů nebo látek obsahující skupiny molekul a atomů, které jsou slabě vázány k sousedním stavebním látkám. Na vnější elektrické pole jsou tedy velice citlivé. Pro popis dějů se zavádí tzv. model potenciálové jámy (obr. 16), který se využívá i pro jiné typy relaxačních dějů. V prvotním okamžiku předpokládáme, že nosiče elektrického náboje obou polarit mohou zaujímat dvě různé energeticky rovnocenné polohy. To platí v případě, že na látku nepůsobí žádné elektrické pole. Vše se ale zásadně změní v okamžiku kdy na látku začne působit vnější elektrické pole. Energetické úrovně jednotlivých poloh se začnou měnit (posouvat). Částice má v poloze A' nižší bariéru než je tomu pro částice v poloze B'. Z toho přímo vyplývá, že přechod nosiče náboje z polohy A' do B' je daleko pravděpodobnější než přechod nosiče náboje v opačném směru. Jelikož jsou časy potřebné k ustálení delší je iontová relaxační polarizace frekvenčně závislá a dále je také silně závislá na teplotě. Čím vyšší teplota tím polarizovatelnost i polarizace klesá. [23]



Obr. 16: Princip dvojité potenciálové jámy (převzato z [23])

Dipólová relaxační polarizace

Dipólové relaxační polarizace se vyskytují v polárních látkách, kde jsou jejich dipólové molekuly vázány slabě a vlivem elektrického pole se mohou snadno natáčet ve směru kterému odpovídají siločáry působícího pole. Toto natáčení je silně ovlivňováno tepelným pohybem částic, kdy pohyb natáčení brání. Polarizace je tedy velmi silně závislá na teplotě a stejně jako iontová relaxační je i ztrátová. Bez působení vnějšího elektrického pole jsou jednotlivé dipólové momenty rozloženy a směřovány chaoticky a náhodně. Při přiložení vnějšího elektrického pole opět k zásadní změně. Znovu tento případ lze popsat pomocí dvojité potenciálové jámy, s rozdílem, že v tomto případě se nejedná o dvě možné polohy nosiče elektrického náboje, ale jedná se o dvě možné orientace elementárního permanentního dipólového momentu. [23]

7 Experimentální část

V experimentální části bylo provedeno měření dielektrických vlastností dvou zástupců polárních a dvou zástupců nepolárních termoplastů. Dielektrické vlastnosti jsou dány strukturou daného materiálu. Cílem měření bylo porovnat změny reálné složky komplexní permitivity a změny imaginární složky komplexní permitivity u polárních a nepolárních termoplastů v závislosti na změnách frekvence a teploty. Měření probíhalo za použití metody širokopásmové dielektrické spektroskopie. Tato metoda je nedestruktivní diagnostická metoda, která se používá k diagnostice elektroizolačních materiálů. Princip metody je založen na zaznamenávání dielektrické odezvy pohybujících se nosičů elektrického náboje v materiálu, jejichž pohyb závisí na změně vnějšího elektrického pole a teplotě prostředí. Využití nachází např. v případech detekce ztrátových polarizací v materiálech (zaznamenání průběhu určité změny uspořádání a orientace dielektrických dipólů a jejich vzájemných interakcí). [30]

7.1 Měřené materiály

Ze zástupců polárních termoplastů byl k měření použit Kapton (obr. 17) a Nomex 410 (obr. 18). Za zástupce nepolárních termoplastů byl vybrán polypropylen (obr. 19) a lineární nízkohustotní polyetylen (obr. 20). Pro měření bylo nutné dodržet několik zásad. Měření probíhalo v ochranných rukavicích, z důvodu aby nedošlo ke znečištění měřených vzorků, mohla by totiž ve výsledku vzniknout určitá chyba měření. Vzorky musely být dostatečně hladké, při případné hrubosti by vzorky nemohly dostatečně přilnout k měřícím elektrodám a opět by ve výsledku vznikala chyba měření. Vzorky dále nesmí přijít do styku s rozpouštědly, pokud není jisté, že rozpouštědla nenarušují struktury daného materiálu. Všechny použité vzorky byly upraveny na rozměr 35x35 mm. Tento rozměr souvisí s velikostí použitých elektrod, které měly průměr 30 mm. Měřené vzorky musí měřící elektrody přesahovat.



Obr. 17: Vzorek Kaptonu



Obr. 18: Vzorek Nomexu



Obr. 19: Vzorek polypropylenu



Obr. 20: Vzorek polyetylenu

7.2 Měřicí systém

Všechna měření v rámci experimentální části probíhala na dielektrickém spektrálním analyzátoru Novocontrol Alpha A s aktivním elektrodovým systémem ZGS a s kryosystémem Quatro. (obr. 21. a obr. 22). Část elektrodového systému, do které se umísťuje měřený vzorek, představuje deskový kondenzátor s válcovými elektrodami. Mezi tyto elektrody se umístí vzorek a elektrody se ke vzorku přitisknou pomocí aretačního šroubu. Kryosystém obsahuje Dewarovu nádobu s tekutým dusíkem a umožňuje tak schlazení vzorku v průběhu měření až na teplotu cca $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poslední součástí měřicí sestavy byl počítač propojený přes rozhraní (IEEE488), ve kterém byl software WinDETA, který řídí průběh měření a průběžně zaznamenává naměřená data. [31]



Obr. 21: Frekvenční analyzátor Alpha A (vlevo) a elektrodový systém ZGS (vpravo)

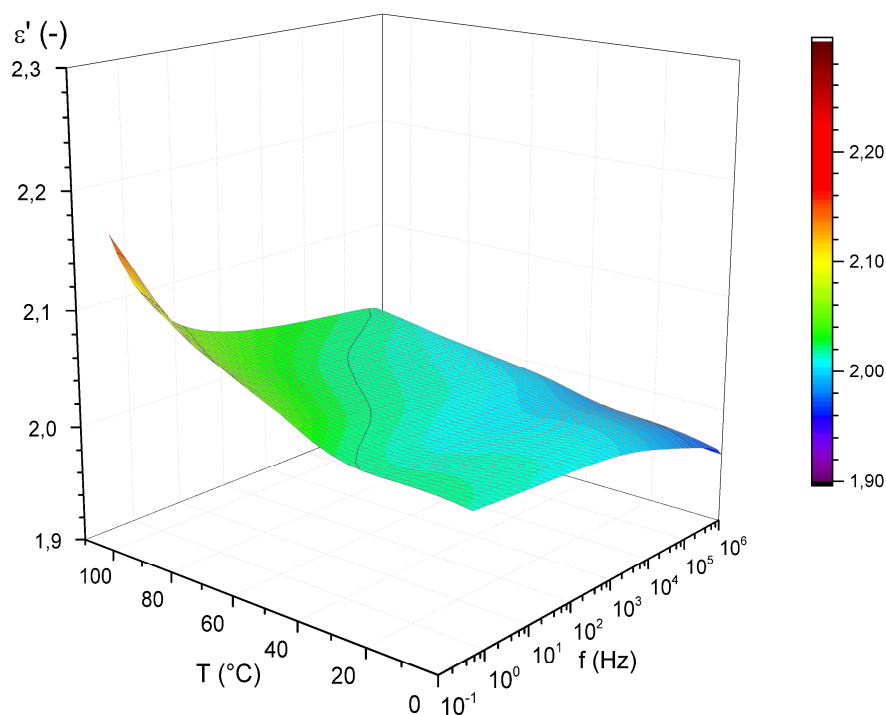


Obr. 22: Zadní strana frekvenčního analyzátoru Alpha A a kryosystem

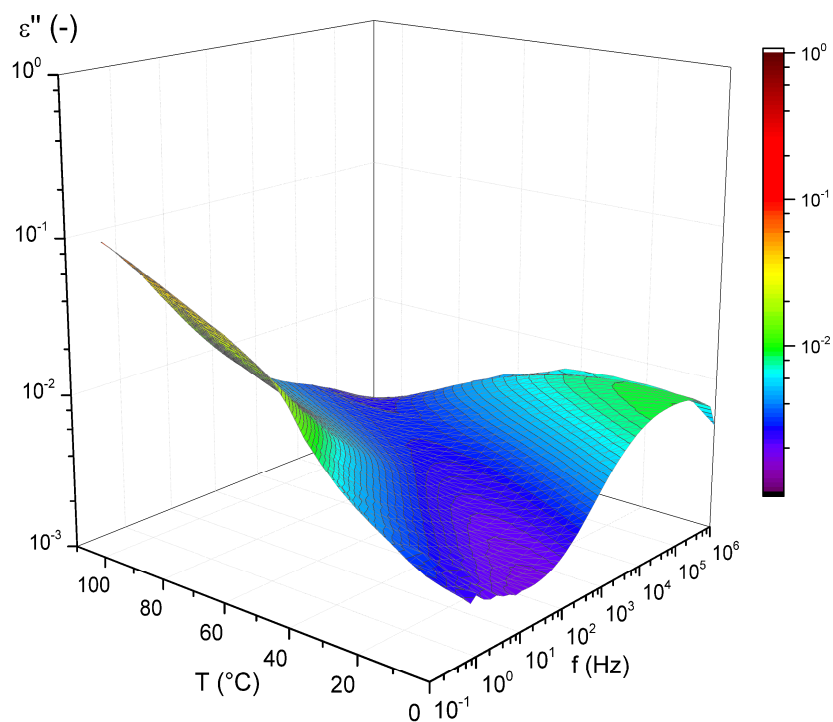
7.3 Postup měření

Vzorky byly před měřením očištěny od viditelných nečistot a při manipulaci se vzorky byly používány gumové rukavice. Vzorky o rozměrech 35x35 mm byly vloženy mezi válcové elektrody o průměru 30 mm. Po každém vložení vzorku mezi elektrody byl elektrodový systém zasunut do kryostatu. Měření všech vzorků probíhalo ve frekvenčním rozsahu od 0,5 Hz do 1 MHz. Teploty se při měření vzorků pohybovali v rozmezí od 0 °C do 110° C. Data byla zaznamenávána od vyšší frekvence k nižší a od nižší teploty k vyšší teplotě. Jak již bylo uvedeno, tak pro získání dat byl využit software WinDETA nainstalovaný v připojeném počítači. Pro nastavení měření je třeba v softwaru zadat zvolený teplotní a frekvenční rozsah. U teplotního rozsahu se zadává krok měření (zvoleno 5 °C). U frekvenčního rozsahu je zadáno automatické logaritmické dělení. Dále je třeba zadat průměr elektrod a průměrnou tloušťku vzorku (stanovena z pěti hodnot tloušťek v různých místech vzorku). Tloušťky vzorků byly změřeny mikrometrem. Průměrná tloušťka vzorku Kaptonu činila 0,026 mm, pro Nomex byla tloušťka 0,778 mm. Tloušťka vzorku polypropylenu byla 0,783 mm a u polyetyleny měla hodnotu 0,285 mm. Po zaznamenání dat bylo možné data z počítače exportovat v txt. souboru na flash disk a následně je zpracovat v softwaru MS Excel a Origin Pro.

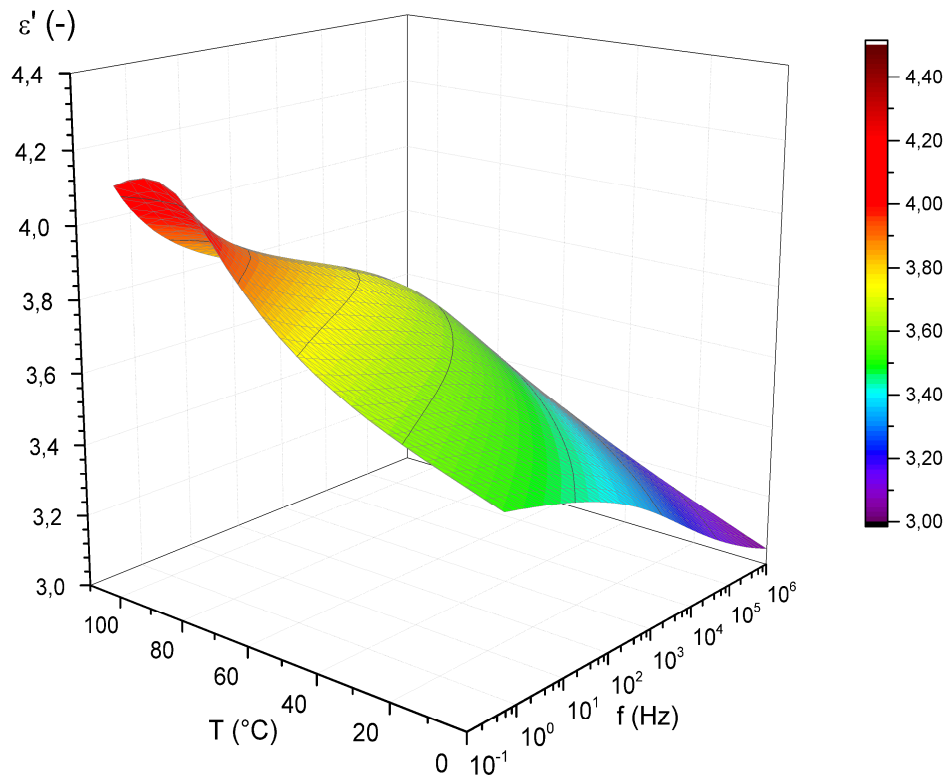
7.4 Výsledky měření



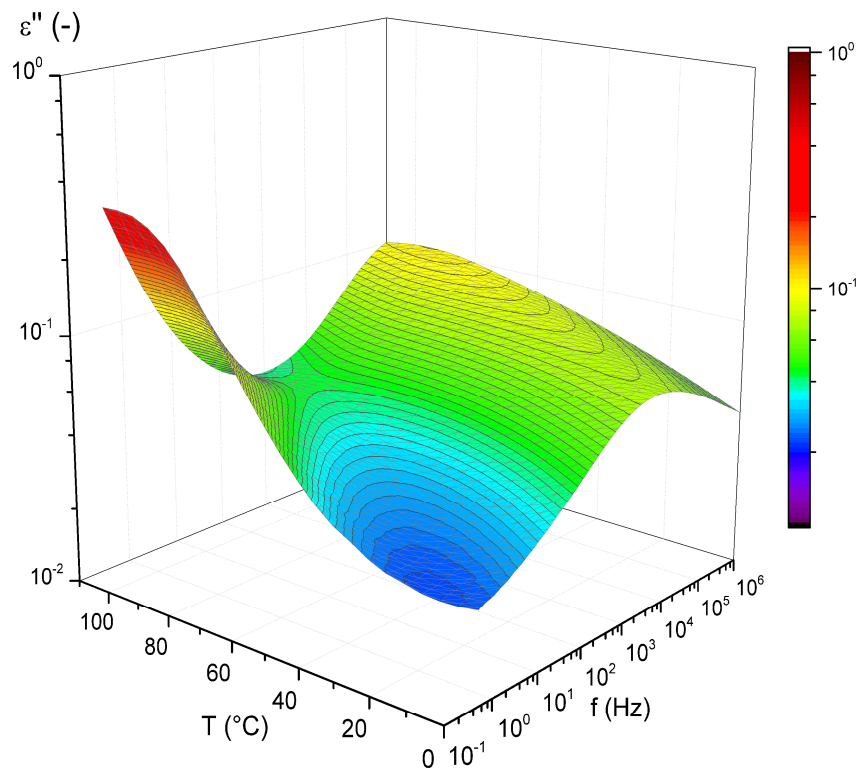
Obr. 23: Závislost reálné složky komplexní permitivity Kaptonu na teplotě a frekvenci



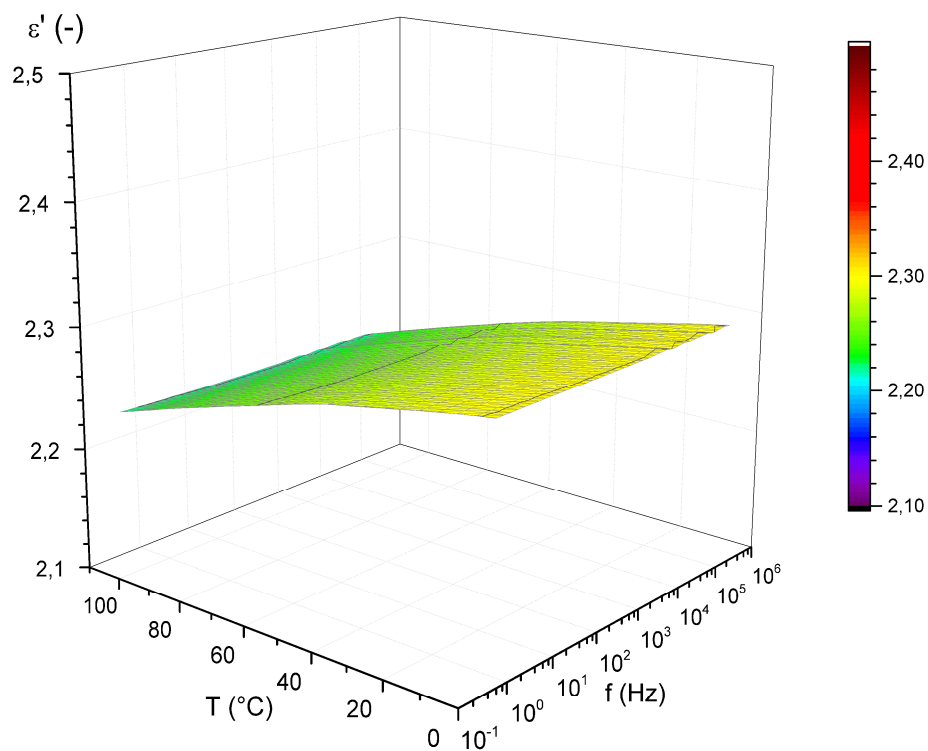
Obr. 24: Závislost imaginární složky komplexní permitivity Kaptonu na teplotě a frekvenci



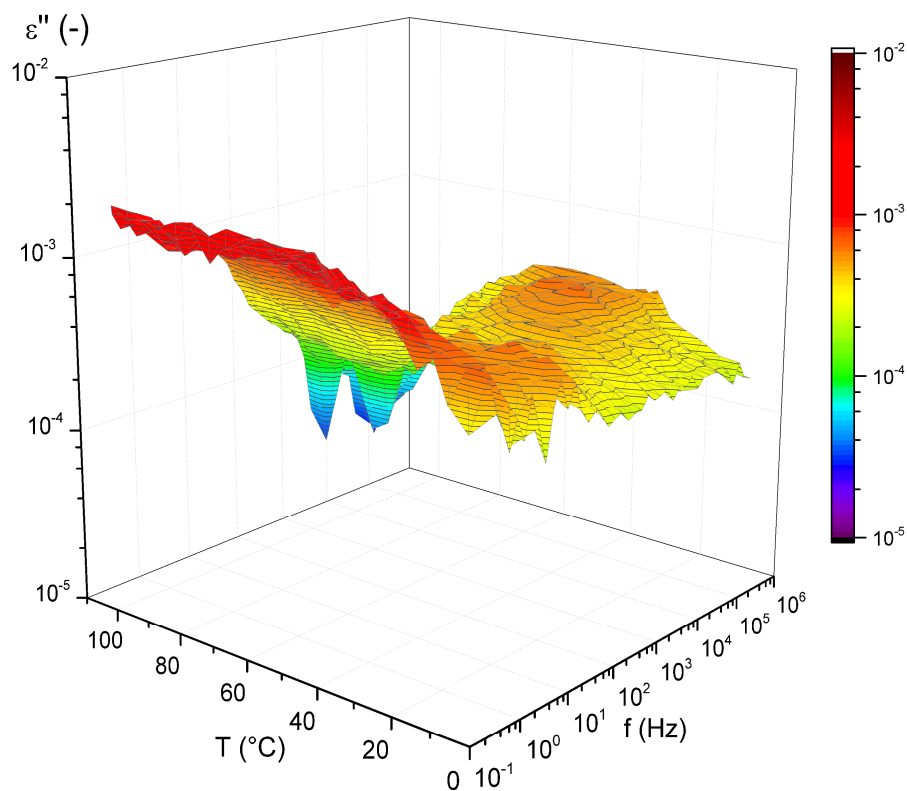
Obr. 25: Závislost reálné složky komplexní permitivity Nomexu na teplotě a frekvenci



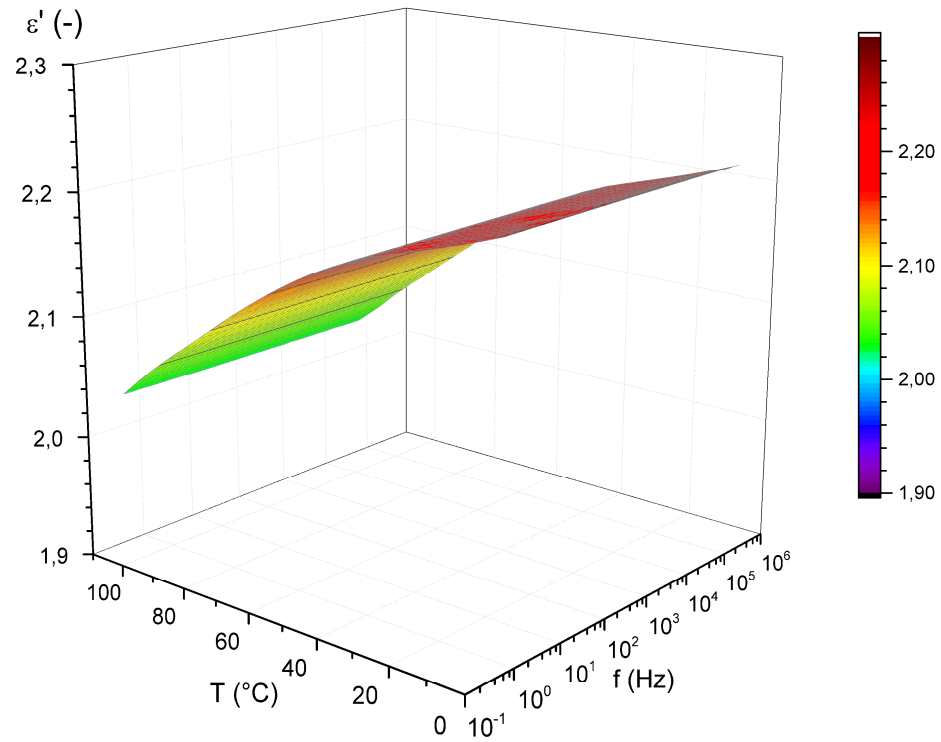
Obr. 26: Závislost imaginární složky komplexní permitivity Nomexu na teplotě a frekvenci



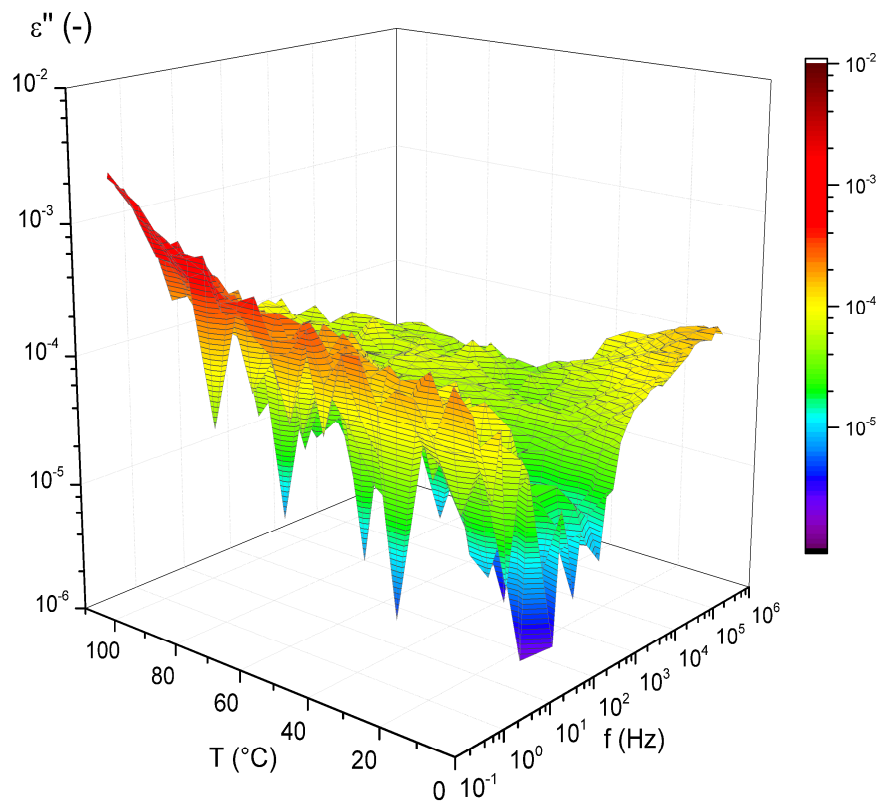
Obr. 27: Závislost reálné složky komplexní permitivity polypropylenu na teplotě a frekvenci



Obr. 28: Závislost imaginární složky komplexní permitivity polypropylenu na teplotě a frekvenci



Obr. 29: Závislost reálné složky komplexní permitivity polyethylenu na teplotě a frekvenci



Obr. 30: Závislost imaginární složky komplexní permitivity polyethylenu na teplotě a frekvenci

7.5 Zhodnocení výsledků měření

V rámci experimentální části byla provedena měření dielektrických vlastností vybraných termoplastů pomocí širokopásmové dielektrické spektroskopie. Jako hodnocený parametr byla zvolena relativní permitivita. Konkrétně byly zjišťovány hodnoty její reálné složky ε' , která má souvislost s kapacitou měřeného vzorku. Dále byly zjišťovány hodnoty imaginární složky relativní permitivity ε'' , které souvisí s mírou dielektrických ztrát v daném materiálu.

Z teplotně-frekvenčních závislostí reálné složky relativní permitivity je u polárních materiálů patrný nárůst změřených hodnot při rostoucí teplotě a klesající frekvenci. U materiálů hodnocených jako nepolární je hodnota ε' frekvenčně v podstatě nezávislá. Dochází však k mírnému snižování hodnoty ε' při nárůstu teploty, což souvisí se změnou hustoty materiálů. Změna hodnoty ε' při nárůstu teploty je výraznější u polyetylenu, který má oproti polypropylenu nižší teplotu tavení. U obou nepolárních materiálů se však pohybuje změny reálné složky relativní permitivity ve zvoleném teplotním a frekvenčním rozsahu pouze v řádu desetin, což je oproti změnám u polárních materiálů zanedbatelné.

Z teplotně-frekvenčních závislostí imaginární složky relativní permitivity je patrné že hodnoty ε'' pro polární materiály jsou u polárních materiálů vyšší než u nepolárních. Především v oblasti nižších teplot jsou u nepolárních materiálů měřené hodnoty na hranici rozlišovací schopnosti měřicího přístroje. Tento fakt souvisí s většími rozdíly v absolutních hodnotách ε'' v průběhu měření při blízkých frekvencích a teplotách. Průběhy závislostí ε'' jsou proto pro nepolární materiály méně vyhlazené než pro materiály polární. U nepolárních materiálů nelze zaznamenat polarizační přechody a lze pouze předpokládat nárůst vodivostní složky při nízkých frekvencích a vysokých teplotách. U polárních materiálů je možné detekovat změny ε'' zapříčiněné ztrátovými polarizacemi. Hodnoty ε'' pro Nomex jsou výrazně vyšší než pro Kapton a je také výraznější polarizační přechod v oblasti vysokých frekvencí. U obou polárních materiálů dochází k výraznému nárůstu hodnot ε'' při nízkých frekvencích a vysokých teplotách. Tento nárůst je způsobený převládající vodivostní složkou. Výsledky měření mohou být do určité míry ovlivněny i tloušťkou vzorku, kdy u tenčího vzorku se více projevuje chování povrchových vrstev.

Závěr

Sepsáním této bakalářské práce jsem se přesvědčil o složitosti problematiky zabývající se termoplasty a polymery všeobecně. Tato bakalářská práce obsahuje jen stručné základy dané problematiky, k podrobnému vysvětlení by bylo potřeba několika knih. Jisté ale je, že termoplasty v dnešním světě zaujímají neotřesitelné místo a v blízkém budoucnu tomu nebude jinak. Jejich specifické vlastnosti dnes už jinými materiály jen těžko nahrazujeme. Hlavní plus je relativně levná výroba a snadné zpracování.

Termoplastů je celá řada, v této práci jsem zmínil jen ty nejzákladnější. Mezi vůbec nejrozšířenější a nejmasověji vyráběné patří polyvinylchlorid a polyetylen. V praxi se k základním termoplastům přidávají různá maziva, změkčovadla, retardéry hoření atd. Případně se termoplasty zesítují, vše v důsledku zlepšení vlastností výsledného termoplastu.

Využitích nacházejí termoplasty v elektroizolačních systémech mnoho, nenahraditelnou oblastí je ale jednoznačně kabelový průmysl. Další důležitou roli hrají termoplasty v oblasti izolování elektrických strojů.

Experimentální část potvrdila poznatky z části teoretické, nepolární termoplasty jsou frekvenčně a teplotě nezávislé. Polární termoplasty jsou naopak frekvenčně a teplotně závislé.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [2] MLEZIVA, J. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1.
- [3] KRATOCHVÍL, B., V. ŠVORČÍK a D. VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [4] PLASTICS EUROPE [online]. [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <http://www.plasticseurope.org/>
- [5] LENFELD, P. *Technologie II: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2015-11-13] Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [6] BĚHÁLEK, L. *Polymery* [online]. [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>
- [7] CARDARELLI, F. *Materials handbook*. 2nd ed. London: Springer, 1998. ISBN 978-184-6286-698.
- [8] PEDAGOGICKÁ FAKULTA MU [online]. [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>
- [9] TEREZ Performance Polymers Sp. z o.o. [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.terez.pl/>
- [10] HASSDENTEUFEL, J. *Elektrotechnické materiály*. 2. preprac. Bratislava: Alfa, 1978.
- [11] BRITISH PLASTICS FEDERATION [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Polymers/Polybutene1.aspx>
- [12] ŠKEŘÍK, J. *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-030-0657-0.
- [13] PINKEROVÁ, M. a R. POLANSKÝ. *Nové trendy v materiálech používaných pro izolaci a opláštění kabelů*. 2012, č.3. [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2012/Cislo3_2012/r6c2c4.pdf
- [14] KUČEROVÁ, E. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-708-2940-0.

- [15] HUGO, J. *Konstrukční plastické hmoty*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [16] ASYNDAR S.R.O. *Princip vstřikování plastů* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.asyndar.com/Pages/vstrikovani-princip.aspx>
- [17] DROBNY, J. G. *Polymers for electricity and electronics: materials, properties, and applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2012. ISBN 9780470455531.
- [18] MORAVEC, J. *Izolování vodivých jader v kabelové technice*. [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/izolovani-vodivych-jader-v-kabelove-technice/>
- [19] GREENCORDS. [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: http://www.greencords.com/images/products/item_15.jpg
- [20] GALAXY WIRE & CABLE, INC. [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.galaxywire.com/>
- [21] ANIXTER. [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.galaxywire.com/>
- [22] SHENK, F. *Jak se dělá kabel*. [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jak-se-dela-kabel--9622>
- [23] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [24] DUPONT [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/>
- [25] ELCHEMCO SPOL. S.R.O. [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zalevací-hmoty-pro-elektroniku-a-elektrotechniku/pu310-ph27/>
- [26] EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [27] BOUDA, V, J. HAMPL, J. LIPTÁK a J. SEDLÁČEK. *Materiály pro elektrotechniku*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-010-2232-3.
- [28] MOLHANEC, M. *Dielektrické vlastnosti tuhých látek* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTVlab_soubory/uloha_4.pdf
- [29] HOFMANN, J. a M. URBANOVÁ. *Fyzika I*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011. ISBN 978-80-7080-777-4.
- [30] KREMER, F., SCHÖNHALS A. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. New York: Springer, 2003. ISBN 978-3-540-43407-8

- [31] NOVOCONTROL TECHNOLOGIES GMBH & CO. KG. [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.novocontrol>.

