

# Radioabsorbéry na bázi magnetoreologických elastomerů

Štěpán Kašík

---

Bakalářská práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Štěpán Kašík
Osobní číslo:	T19205
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Radioabsorbéry na bázi magnetoreologických elastomerů

## Zásady pro vypracování

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerši na zadané téma
2. Příprava magnetoreologických elastomerů dle zadání
3. Materiálová charakterizace připravených systémů
4. Analýza radioabsorbčních vlastností studovaných magnetoreologických elastomerů
5. Vyhodnocení a diskuze získaných výsledků

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

Seznam doporučené literatury:

1. SEDLACIK, M., MRLIK, M., BABAYAN V., PAVLINEK V. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures*, 2016, vol. 135, p. 199-204.
2. CVEK, M., MOUCKA, R., SEDLACIK, M., BABAYAN, V., PAVLINEK, V. Enhancement of radio-absorbing properties and thermal conductivity of polysiloxane-based magnetorheological elastomers by the alignment of filler particles. *Smart Materials and Structures*, 2017, vol. 26, no. 9, 095005.
3. PARK, B.J., FANG, F.F., CHOI, H.J. Magnetorheology: Materials and application. *Soft Matter*, 2010, vol. 6, no. 21, p. 5246-5253.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Robert Moučka, Ph.D.**  
ÚFMI

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2023**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

## PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem 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.

### Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne: 12.5.2023

Jméno a příjmení studenta: Štěpán Kašík

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce bylo vytvořit radioabsorbéry na bázi magnetoreologických elastomerů (MRE) a následně zkoumat jejich stínící vlastnosti s měnící se koncentrací železa jako plniva. V teoretické části byly shrnuty různé typy kompozitních materiálů jako takových, popsána jejich příprava a způsob, jak ovlivnit jejich mechanické a stínící vlastnosti. Práce uvádí základy stínění elektromagnetických vln a princip MRE jako radioabsorbérů. V praktické části bylo vytvořeno několik vzorků MRE na bázi pryže plněné částicemi železa s rozdílnou koncentrací přidaného železa. Následně byly tyto MRE charakterizovány a změřeny jejich stínící a mechanické vlastnosti. Získané výsledky byly diskutovány z hlediska dostatečné stínící účinnosti kompozitů, při zachování svých mechanických vlastností.

Klíčová slova: magnetoreologické elastomery, radioabsorbéry, stínění

## **ABSTRACT**

The aim of this work was to create radioabsorbers based on magnetorheological elastomers (MRE) and then investigate their shielding properties with varying concentration of iron as filler. The theoretical part summarized the different types of composite materials, described their preparation and how to influence their mechanical and shielding properties. Thesis presents the basics of electromagnetic wave shielding and the principle of MRE as radioabsorbers. In the practical part, several samples of MRE based on rubber filled with iron particles with different concentrations of added iron were created. Subsequently, these MRE were characterized and their shielding and mechanical properties were measured. The obtained results were discussed in terms of sufficient shielding efficiency of the composites while maintaining their mechanical properties.

Keywords: magnetorheological elastomers, radioabsorbers, shielding

Zde je místo pro případné poděkování, popř. motto, úryvky knih atp.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ POLYMERACE</b> .....	<b>11</b>
1.1 STUPŇOVITÉ POLYMERACE .....	11
1.2 ŘETĚZOVÉ POLYMERACE .....	11
<b>2 KOMPOZITY</b> .....	<b>13</b>
2.1 MATRICE .....	14
2.1.1 Termosetická (reaktoplastická) matrice .....	14
2.1.2 Termoplastická matrice .....	15
2.1.3 Elastomerní matrice .....	15
2.2 VÝZTUŽE A PLNIVA .....	16
2.2.1 Výztuže .....	16
2.2.2 Plniva .....	18
2.3 MAGNETOREOLOGICKÉ ELASTOMERY .....	21
2.4 TECHNOLOGIE VÝROBY .....	22
<b>3 STÍNĚNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ</b> .....	<b>24</b>
3.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA .....	25
3.2 RADIOABSORBÉRY A JEJICH STÍNICÍ VLASTNOSTI .....	25
3.3 MĚŘENÍ STÍNICÍCH VLASTNOSTÍ A TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	26
3.3.1 Měření stínících vlastností .....	26
3.3.2 Tahová zkouška .....	27
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>30</b>
<b>4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>31</b>
<b>5 PŘÍPRAVA KOMPOZITŮ</b> .....	<b>32</b>
5.1 MATERIÁLY .....	32
5.2 METODY .....	33
<b>6 DISKUZE VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>39</b>
6.1 STÍNICÍ ÚČINNOSTI KOMPOZITŮ .....	39
6.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ .....	42
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>44</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>45</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>49</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>51</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>52</b>





## ÚVOD

Kvůli rychlému rozvoji dnešní doby zahltila elektronická zařízení náš každodenní život. Elektronická zařízení však mohou generovat nežádoucí elektromagnetické rušení do okolního světa, což nejenže ovlivňuje normální provoz okolních elektronických zařízení, ale také může představovat zdravotní riziko. Z toho důvodu potřebujeme radiabsorbční materiály, které by tyto elektromagnetické vlny pohltily, nebo naopak zabránily v jejich šíření. Radioabsorbéry na bázi magnetoreologických elastomerů jsou v tomto směru hojně používány, vzhledem k jejich nízké hustotě, odolnosti proti korozi, konkurenceschopné ceně a dobré zpracovatelnosti. I z těchto důvodů tyto radioabsorbéry nacházejí uplatnění v elektronickém, vojenském či zdravotním průmyslu. V této práci se podíváme na vliv koncentrace plniva na stínicí vlastnosti těchto materiálů.

V teoretické části si v rychlosti sdělíme základní dělení polymerace a následně si více do hloubky povíme o kompozitních materiálech a samotném stínění elektromagnetického záření. V praktické části si sdělíme postup přípravy vzorků pro následné prováděná měření. Nakonec diskutujeme naměřené hodnoty a získané poznatky.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ POLYMERACE

Výstavba jednoduchých syntetických makromolekul se uskutečňuje zpravidla opakováním základních reakcí monomerních molekul. Tyto reakce nazýváme polyreakce a můžeme je dělit podle různých typů – např. reakce adiční a substituční. Jako polymeraci nazýváme polyreakci vedoucí k vysokomolekulárním produktům. Zároveň tato polyreakce musí splnit podmínky termodynamické a chemické. Jinými slovy by se dalo říct, že polymerace je proces, během něhož se monomer nebo směs monomerů přeměňuje na polymer. Polymeraci zpravidla dělíme na polymeraci stupňovitou a polymeraci řetězovou. [1][2]

### 1.1 Stupňovité polymerace

Stupňovitá polymerace je typ polymerace, při nichž vznikají makromolekuly vzájemnou reakcí funkčních skupin minimálně dvojfunkčních monomerů a funkčních skupin vzniklých oligomerů, případně polymerních řetězců. Stupňovitými polymeracemi jsou polykondenzace a polyadice. Výstavba makromolekuly polykondenzací i polyadicí probíhá stupňovitým mechanismem, avšak oba procesy se navzájem liší.

Při polykondenzaci je vznik polymeru v každém reakčním kroku doprovázen vznikem nízkomolekulárních produktů a reakce je v některých případech rovnovážná.

Pro polyadicí je charakteristický přesun vodíkového atomu v každém reakčním kroku. Vedlejší produkt nevzniká a reakce jsou nerovnovážné. Mechanismus stupňovitých polyreakcí je určen typem základní reakce. [1][2]

### 1.2 Řetězové polymerace

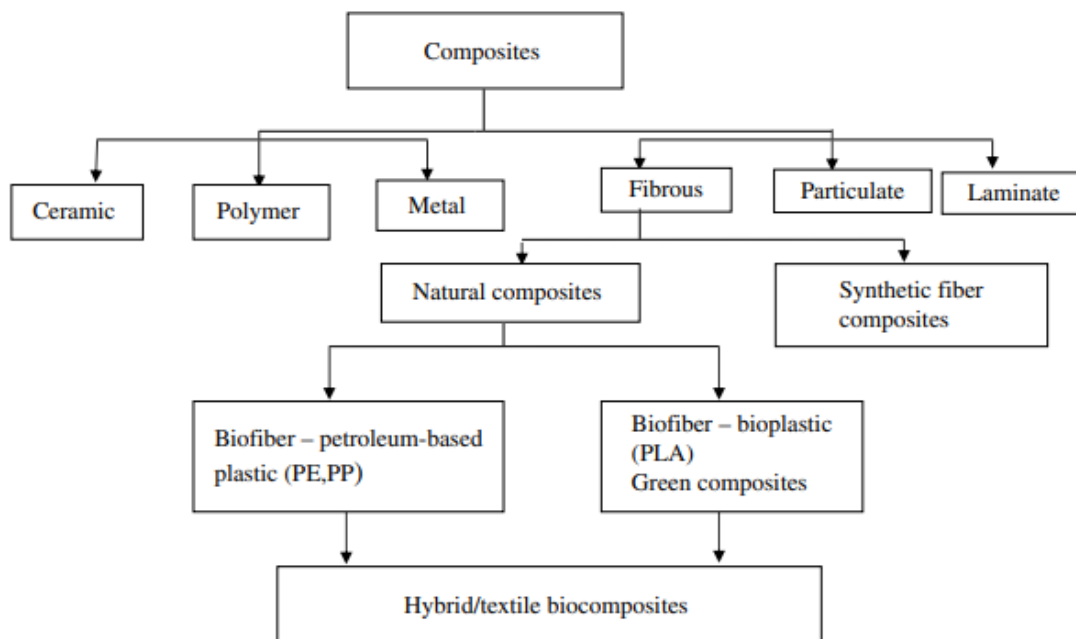
Řetězovými polyreakcemi vznikají makromolekuly mnohonásobně opakovanou adicí molekul monomeru na růstová centra. Růstovými centry jsou vysoce reaktivní meziproducty, mezi které se řadí radikály, ionty nebo komplexní sloučeniny. Každá řetězová polyreakce je souhrnem několika elementárních reakcí. Hlavními dílčími reakcemi jsou iniciace, propagace (růst řetězce) a terminace (konec růstu řetězce). Řetězové polymerace dělíme na radikálové, iontové (aniontové a kationtové), koordinační (pseudoiontové) a polymerace s otevřením kruhu. [1] [2]

Iniciace je uskutečněna reakcí molekuly monomeru s volným radikálem, iontem nebo aktivním katalytickým centrem. Propagace je uskutečněna reakcí molekul monomeru s aktivním centrem na konci řetězce (radikálem, iontem). Rychlost propagace bývá z

pravidla vysoká a meziprodukty nelze izolovat. V případě, že v systému probíhá i terminační krok, pak je časový úsek mezi iniciací a terminací velmi krátký. Pohybuje se tudíž v řádu zlomcích až jednotkách sekund. Kromě hlavních dílčích reakcí, jimiž jsou iniciace, propagace a terminace může vzniknout i přenosová reakce. V přenosové reakci se růstové centrum z rostoucí makromolekuly přenáší na jinou molekulu. Například na molekulu monomeru, rozpouštědla, na makromolekulu nebo na jinou složku polymerizačního systému. Přenosová reakce je ovšem závislá na typu polymerizujícího monomeru a podmínkách polymerizace. [1] [2]

## 2 KOMPOZITY

Kompozity lze definovat jako materiály, které se skládají ze 2 nebo více chemicky a fyzicky rozdílných fází oddělených rozlišným rozhraním. Jinými slovy kompozity jsou kombinace materiálů lišících se složením a zároveň si tyto složky zachovávají svou identitu. Tyto samostatné složky spolu „spolupracují“ aby danému kompozitu zajistili požadovanou mechanickou pevnost a tuhost. Kompozitní materiál se skládá z 2 a více odlišných fází a má výrazně odlišné objemové vlastnosti od původních vlastností kterékoliv ze složek. Mezi tyto fáze patří matricová fáze a disperzní fáze. Fáze matrice je primární fáze, která má spojitý charakter a je obvykle tvárnější a méně tvrdá. Zároveň je v ní uložena disperzní fáze a sdílí s ní zátěž. Disperzní fáze je zapuštěna v matrici v nespojitě formě. Disperzní fáze je obvykle pevnější než matrice, a proto se někdy označuje jako výstužná fáze.



Obrázek 1 Rozdělení kompozitů [3]

Kompozity používáme, abychom využili zlepšených vlastností. Díky možnosti kombinace vlastností jako jsou například tuhost, houževnatost a pevnost, kterých bychom nemohli dosáhnout za využití pouze jednoho materiálu. Dalšími výhodami může být například nízká hmotnost, odolnost vůči korozi a rychlejší montáž.

Hlavní rozdíl mezi kompozity a směsím je ten, že hlavní složky u kompozitů zůstávají vzájemně rozpoznatelné, zatímco u směsí být rozpoznatelné nemusí. [3] [4]

## 2.1 Matrice

Pod pojmem matrice rozumíme materiál, jenž je prosycen systémem vláken a partikulárních komponent tak, že po následném zpracování nám vznikne tvarově stálý výrobek (kompozit). Úlohou matrice je zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku, přenos namáhání na vlákna, převedení namáhání z vlákna na vlákno a ochrana vlákna před vlivy okolí. Stěžejním hlediskem k získání kvalitního kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice – vlákno. Navíc pomocí nanesení apretace, vhodné pro určitý druh matice, na vlákno dosáhneme lepší fyzikální a popřípadě i chemické vazby mezi vláknem a maticí. Od matrice je požadováno, aby měla vhodnou viskozitu a povrchové napětí, z toho důvodu, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. U polymerních kompozitů se matrice dělí na termosety (reaktoplasty) a termoplasty. V kompozitním průmyslu se jak termosetické, tak i termoplastické matrice často označují jako pryskyřice.[3] [4] [5]

### 2.1.1 Termosetická (reaktoplastická) matrice

Výchozími materiály, používanými pro výrobu termosetického polymeru, jsou nízkomolekulární organické prepolymery (předpolymery), které jsou ve většině případů nízko viskózní kapaliny. Molekuly v prepolymerech jsou relativně malé a nejsou chemicky propojeny. Přechod z kapalného do pevného stavu vzniká pomocí chemické reakce, která většinou probíhá během výroby kompozitního dílu. K zahájení nebo urychlení chemické reakce mohou být zapotřebí katalyzátory nebo jiné reaktivní molekuly. Chemická reakce, při níž se prepolymerní kapalina s nízkou viskozitou mění na tvrdý termosetový polymer se nazývá vytvrzování (curing) anebo síťování (cross-linking) a jedná se o jev závislý na čase a teplotě.[3] [5] [6]

Termosetická kompozitní matrice zahrnují polyestery, vinylestery, epoxidy, bismaleimidy, kyanátové polymery, estery, polyamidy a fenoly. Epoxidy jsou v současné době dominantní pryskyřice používané pro nízké a střední teploty (135°C). Bismaleimidy se používají především v teplotním rozmezí 135-175 °C. Pro aplikaci při velice vysokých teplotách (290-315°C) se využívají polyamidy. Polyestery a vinylestery jsou aplikovány při přibližně stejných teplotách jako epoxidy (135°C) a ve velkém jsou využívány pro komerční využití. Zřídka kdy jsou ovšem využívány jako vysokoúčinné matrice, kvůli jejím horším mechanickým vlastnostem a lehce horší odolnosti vůči prostředí. Kyanátostery jsou relativně novou třídou pryskyřic a byly navrženy tak, aby dokázaly konkurovat jak epoxidům, tak i bismaleimidům.[6] [7]

### 2.1.2 Termoplastická matrice

Termoplasty jsou vysokomolekulární pryskyřice, které před zpracováním plně reagují. Taví se a během zpracování tečou, ale netvoří se v nich reakce. Jejich hlavní řetězce drží pohromadě relativně slabými sekundárními vazbami. I přesto, díky tomu že se jedná o vysokomolekulární pryskyřice, je viskozita termoplastů během zpracování řádově vyšší než u termosetů (například 107–104 Poise u termoplastu a 10 Poise u termosetů). Díky tomu, že se termoplasty nesítují, lze je znovu zpracovat. Mohou se například tepelně tvarovat do konstrukčních tvarů, za pomoci ohřevu na teplotu zpracování. Počet znovuzpracování termoplastu je ovšem omezen, vzhledem k tomu, že teploty zpracování jsou blízké teplotám degradace polymeru. Opakovaná přepracování nakonec povede k degradaci pryskyřice a v některých případech může dokonce i dojít k zasíťování. [3] [5] [6] [7]

Termoplastické matrice jsou hojně využívány, ovšem máme 5 základních termoplastických matic, které jsou nejčastěji využívány. Mezi tyto termoplastické matrice patří semikrystalické termoplasty, mezi něž patří Polyetheretherketon (teplotní rozmezí 360–400°C) (PEEK), polyetherketoneketon (teplotní rozmezí 325–360°C) (PEKK), polyfenylsulfid (teplotní rozmezí 315–360°C) (PPS) a polypropylen (teplotní rozmezí 190–224°C) (PP). Mezi amorfní termoplasty patří polyetherimid (PEI). Termoplastické kompozity PEEK, PEKK, PPS a PEI jsou využívány jako kontinuální, vláknem vyztužené termoplastické kompozity, zatímco PP je nízkoteplotní pryskyřice, která je hojně využívána v automobilovém průmyslu. [5] [6]

### 2.1.3 Elastomerní matrice

Elastomerní matrice nabízí vysokou houževnatost a vynikající prodloužení při přetržení spolu s dobrou pevností v tahu. Takové matrice jsou široce používány v automobilovém, kosmickém, drátovém a kabelovém, sportovním a jaderném průmyslu. Elastomery mají vysokou molekulovou hmotnost, amorfní strukturu a slabé vnitřní a mezimolekulární síly. Jejich teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) je výrazně pod pokojovou teplotou, proto jsou při pokojové teplotě možné segmentové pohyby, díky nimž jsou měkké a pružné. Kvůli slabé mezimolekulární vazbě potřebují elastomery další vyztužení i po zesílení, aby se dosáhlo požadovaných mechanických vlastností. [8] [9]

Kaučuk EPDM (ethylen propylen dien monomer) je syntetický kaučuk vyrobený z monomerů ethylenu, propylenu a dienu. Jeho molekulární struktura má jednoduchou vazbu, chemicky nasycenou páteř, díky čemuž je extrémně odolná vůči venkovním podmínkám. Je to proto, že ozón a UV paprsky nejsou schopny rozbít jeho molekulární strukturu stejným způsobem jako kaučuky s dvojnými vazbami. Mezi syntetické kaučuky například patří i kaučuk SBR (styren butadien), který je znám svojí tvrdostí a odolností nebo Butyl kaučuk, který je jedním z nejlépe plynotěsných, vzduch nepropouštějících syntetických kaučuků. Přírodní kaučuky mají ovšem výhodu v tom, že se vyrábí z obnovitelných zdrojů. Přírodní kaučuk je koagulovaný nebo vysrážený produkt získaný z mléčného sekretu (latexu) kaučukovníku (*Hevea brasiliensis*), který tvoří nevázané, ale částečně vulkanizovatelné polymerní řetězce. Syntetický kaučuk se vyrábí ze surovin získaných z ropy, uhlí, petroleje, zemního plynu a acetyleny. Jelikož syntetický kaučuk se vyrábí z ropy, jeho cena je s ní srovnatelná. Údaj z roku 2011 uvádí produkci v tunách: přírodní kaučuk 10 974 a syntetický 15 115 [10] [11] [12]

## 2.2 Výztuže a Plniva

### 2.2.1 Výztuže

Nejčastěji využívanou výztuží pro kompozity s polymerní maticí (PMC) jsou vyztužující vlákna. Vlákna jsou výztužnou fází a jsou rozptýleny v polymerní matici, která je spojitou fází obklopující vlákna. Matice se podílí na sdílení zátěže s vlákny a přenáší zatížení mezi vlákny. Některé kompozity také využívají plniv. [4] [5]

Vlákna jsou hlavními nosnými prvky kompozitního materiálu vyztuženého vlákny. Mechanické vlastnosti, jako je modul a pevnost, a tepelné vlastnosti, jako je součinitel tepelné roztažnosti, kompozitu závisí na těchto vlastnostech parametrech souvisejících s vlákny:

1. Typ a vlastnosti vláken
2. Objemový podíl vláken
3. Délka vláken
4. Orientace vláken
5. Architektura vláken (uspořádání vláken v kompozitu)



Ve většině vysoce výkonných PMC se vlákna používají v souvislých délkách a objemový podíl vláken se pohybuje v rozmezí 50-65 % kompozitu. Diskontinuální vlákna jsou v PMC s náhodnými vlákny. Objemový podíl vláken v těchto kompozitech je obvykle v rozmezí 20-40 % kompozitu. V PMC se nejčastěji používají tři vlákna: skleněná, uhlíková a aramidová. [4] [5]

Skleněná vlákna (GF) jsou tenká vlákna s pravidelným kruhovým průřezem o průměru 3,5 až 24  $\mu\text{m}$ . Skleněná vlákna jsou izotropního charakteru, což znamená, že jejich materiálové vlastností jsou totožné jak v příčném, tak i podélném směru. Modul pružnosti tahu GF je přibližně stejný jako u uhlíkových vláken a činí jednu třetinu hodnoty oceli. Pevnost v tahu je vyšší, než u většiny organických a anorganických vláken. Zároveň mají skleněná vlákna výborné tepelné vlastnosti. Ani dlouhodobé tepelné namáhání při 250 °C nesnižuje mechanické vlastnosti a tepelná vodivost je vyšší než u ostatních materiálů, kromě kovů, proti kterým je podstatně nižší. Skleněná vlákna jsou nehořlavá a bod měknutí E-skloviny je vyšší než 625°C.

Aramidová vlákna (AF) jsou organická vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Mezi výhody těchto vláken patří vysoká pevnost a tuhost. Zároveň se jedná o nejlehčí vyztužující vlákno (hustota  $\rho = 1,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). AF je silně anizotropní, což znamená že vlastnosti měřené ve směru vlákna se liší od vlastností měřených v příčném směru. Také je nutno počítat s citlivostí AF na zatížení tlakem působícím v podélném směru, jež je výrazně nižší než mez pevnosti v tahu taktéž působícím v podélném směru. AF jsou hydrofilní, což znamená že absorbují vlhkost (až do 7 %), což dále negativně ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu musíme AF před použitím vysušit. Zároveň při vystavení záření s vysokou energií (například UV záření) dochází v výrazném poklesu pevnosti.

Uhlíková vlákna (CF) jsou vlákna anizotropního charakteru s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale nízkou tažností. CF mají progresivní deformační chování, vysokou pevnost a E-modul až do teploty 500 °C, mimořádně vysokou korozní odolnost a dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Zároveň mají dobrou snášitelnost s tělesnými tkáněmi (využití jako implantáty) a mají dobrý průchod pro záření (neodráží radarový paprsek).

Přírodní vlákna jsou široká škála vláken, ovšem pro vyztužování plastů se používají pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu (len, konopí, sisal, juta, bavlna,...). Jejich výhodou je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických

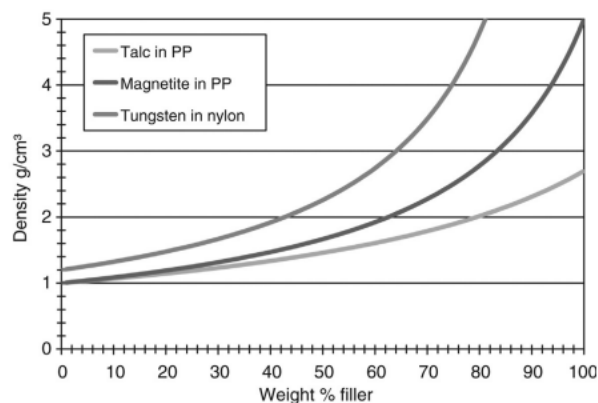
podmínkách. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti, jsou tato vlákna využívána pro lehké konstrukce. [4] [13]

### 2.2.2 Plniva

Plniva se využívají ke zlepšení mechanických vlastností, jako například mez pevnosti v tahu a tlaku, zlepšení tepelné a rozměrové stability, houževnatosti a odolnosti vůči opotřebení a například i k změně elektrických a stínících vlastností kompozitu. Plniva mohou být ve formě částic o rozměrech 10 nm až po makroskopické rozměry. Materiály plniv mohou být například křemenná moučka, jemný skelný písek, mastek, vápenec anebo některé druhy polymerů. Zároveň tyto plniva využíváme, protože jejich použití vede k snížení celkové ceny produktu. Plniva se obvykle mechanicky mísí s termosetickými prepolymerem a taví se s termoplastickými polymerem. Obecně platí, že přídavek plniv zvyšuje viskozitu kapalného polymeru, a pokud jsou přidána ve velkých množstvích, mohou způsobit zhoršený průběh přípravy kompozitu. S výjimkou dutých skleněných kuliček zvyšují anorganická plniva hustotu polymeru. Duté skleněné kuličky, vzhledem k jejich nízkému obsahu snižují hustotu polymeru. Dále můžeme přidávat plniva, které vedou ke zlepšení vlastností, jako jsou například mimo jiné i pigmenty nebo barviva, které propůjčují polymeru barvu, UV stabilizátory, které zabraňují degradaci polymeru v důsledku dlouhodobého působení UV záření, zpomalovače hoření pro snížení hořlavosti polymeru nebo i plniva, která mění elektrické/stínící vlastnosti kompozitu. Vzhledem k tématu této Bakalářské práce se právě na plniva měnící elektrické/stínící vlastnosti zaměříme. [5] [14]

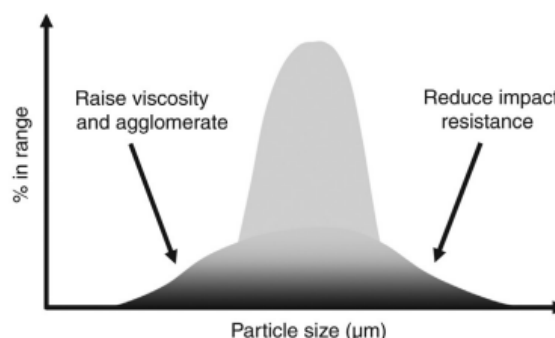
Nejdůležitějšími vlastnostmi plniva bývá koncentrace plniva, velikost částic a distribuce velikosti plniva, distribuce a disperze a tvar a poměr stran.

Při koncentraci plniva se obvykle plnivo dávkuje gravimetricky, tj. množství přidaného plniva se měří a vyjadřuje v hmotnostních procentech. Při vykazování vlivu plniva na vlastnosti se běžně vykrešlují grafy, kde značíme vlastnosti (osa y) a závislost na hmotnostním procentu plniva (osa x). Tento postup je zavádějící, protože neexistuje přímá souvislost mezi hmotností přidaného plniva a vlastnostmi. Všechny vlastnosti spíše závisí na objemovém procentu plniva v polymeru. Tedy, je třeba vynést výsledky jako závislost vlastností na objemovém procentu plniva. [15] [16]



Obrázek 2 Nárůst hustoty kompozitu s koncentrací plniva [15]

Pro velikost částic a distribuci velikosti plniva obecně platí, že neexistuje žádná optimální velikost částic, ani jejich distribuce. Ideální hodnoty závisí na aplikaci a požadovaných vlastnostech. Obecně však platí, že částice se střední velikostí 1-10  $\mu\text{m}$  se dobře hodí jako plniva. Konkrétním příkladem je například uhličitan vápenatý, jehož střední velikost částic je kolem 2  $\mu\text{m}$  a často se používá v PP a PVC. Rozložení velikostí je přinejmenším stejně důležité, jako střední velikost. Velmi velké i velmi malé částice mají tendenci zhoršovat vlastnosti. Malé částice mají za následek vysokou viskozitu, a tudíž ztrátu zpracovatelnosti, což se projevuje špatným plněním forem a ztrátou průchodnosti extrudéru. Velké částice působí jako vady. Koncentrace napětí je vysoká okolo velkých částic a vedou k dramatickému snížení odolnosti proti rázu a prodloužení do přetržení. [15] [16] [17]



Obrázek 3 Distribuce velikosti částic a jejich vliv na vlastnosti [15]

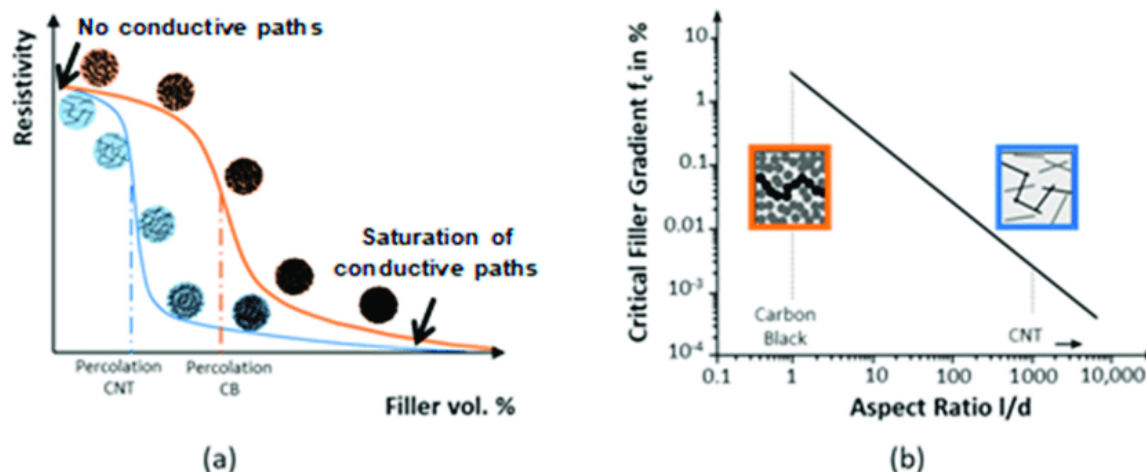
Když se bavíme o distribuci a disperzi, je nutno zmínit, že pro dosažení trvale dobrých vlastností kompozitu je nezbytné zajistit rovnoměrnou koncentraci částic plniva v celém materiálu. Rovnoměrnost lze posuzovat na různých úrovních. Makroskopická měření při

malém zvětšení se označují jako distribuce. Mikroskopická měření při větším zvětšení odhalují úroveň disperze. Pro kontrolu distribuce a rozptylu se používá pečlivé zpracování, například nastavení extrudéru a podávání. Použití disperzantů je další způsob k usnadnění dobré dispergace a je zvláště vhodné a důležité, pokud se jedná o jemné částice nebo nanočástice. Ukázalo se, že smykové síly, které se vyskytují v typických extrudérech, nejsou pro rozptýlení částic příliš vhodné a je zapotřebí podélného proudění. Proto byly zavedeny nové technologie, které umožňují dosáhnout podélného toku se současným zlepšením dispergace a vlastností. [15] [16] [17]

Různé materiály mají tendenci vytvářet částice určitého tvaru v závislosti na krystalické struktuře materiálu a způsobu jeho zpracování. Tvar se často popisuje pomocí štíhlostního poměru ( $\lambda$ ), který je definován jako poměr nejdelšího rozměru ( $L$ ) k nejmenšímu ( $D$ ), také tento poměr nazýváme štíhlostní poměr. Pro sférické a kubické tvary se tedy jedná o poměr stran roven jedné nebo přibližně stejné hodnotě.

$$\lambda = \frac{L}{D} \quad (1)$$

Rozsáhlá většina polymerů je vynikajícími tepelnými a elektrickými izolanty. Vynikající elektrická izolace vede k širokému využití v izolaci vodičů a kabelů i v mnoha dalších aplikacích. Ačkoli některé polymery jsou vlastními vodiči elektřiny, u většiny polymerů musí být vodivost indukována pomocí vodivých plniv. Příklady elektricky vodivých plniv jsou saze, grafit (vločky a vlákna) a kovy (měď, stříbro, ocel, vločky a vlákna). Metalizovaná slída nebo skleněné kuličky nabízejí vysokou elektrickou vodivost, při nižších nákladech než při použití čistých kovů. Vlastnosti kompozitů se většinou plynule liší s přibývajícím množstvím plniva, toto ovšem neplatí pro elektrickou a tepelnou vodivost. Zatímco je dodáváno více plniva, nedochází v podstatě žádnému nárůstu vodivosti, až do okamžiku, kdy se vytvoří souvislá cesta z dotýkajících se částic plniva. V tomto bodě, tzv. perkolační koncentraci, se vodivost dramaticky zvýší, a to o několik řádů. Další přidávání plniva vede k vyrovnání vodivosti, takže celková křivka má tvar písmene S. [15] [17]



Obrázek 4 Graf perkolační křivky [18]

K perkolaci dochází při nižších koncentracích u menších částic plniva, plniv se sklonem k aglomeraci a vysoce anizotropních plniv. Při daném množství plniva lze dosáhnout vyšší vodivosti s plnivem s nízkou vodivostí, které perkolovalo, ve srovnání s plnivem s vysokou vodivostí, které neperkolovalo. Zatímco obvykle se usiluje o optimální disperzi, v případě vodivosti znamená disperze oddělení částic, a tedy i rozdělení částic a následnou nepřítomnost perkolace. Protože vodivost je velmi závislá na disperzi plniva a také na jeho orientaci, je velmi citlivá na podmínky zpracování a zejména na proudění. [15]

### 2.3 Magnetoreologické elastomery

Inteligentní materiály byly poprvé jako koncept představeny v roce 1980, a jsou to ty materiály, které lze ovládat pomocí externích prostředí, jako je elektrické nebo magnetické pole, mechanické namáhání nebo teplo a světlo. Díky své reaktivitě jsou chytré materiály známé také jako citlivé materiály. Obvykle se překládají jako "aktivní" materiály, i když přesnější by bylo říkat "reaktivní" materiály. Mezi nimi se magnetoreologické (MR) materiály stávají jedním z nejdůležitějších inteligentních materiálů z hlediska jejich obrovského průmyslového potenciálu. Jsou klasifikovány jako funkční inteligentní materiály, které mají laditelné reologické a viskoelastické vlastnosti, jako je mez kluzu, smykové napětí, dynamické moduly a tlumicí vlastnosti při působení vnějšího magnetického pole. MR materiály obecně zahrnují několik různých systémů v závislosti na použitém médiu. Jako první byly světu představeny MR kapaliny (MRF) již v roce 1948, a po nich následovaly MR pěny, MR gely a MR elastomery (MRE). My se ovšem vzhledem k tématu této práce zaměříme pouze na MRE. [19] [20] [21]

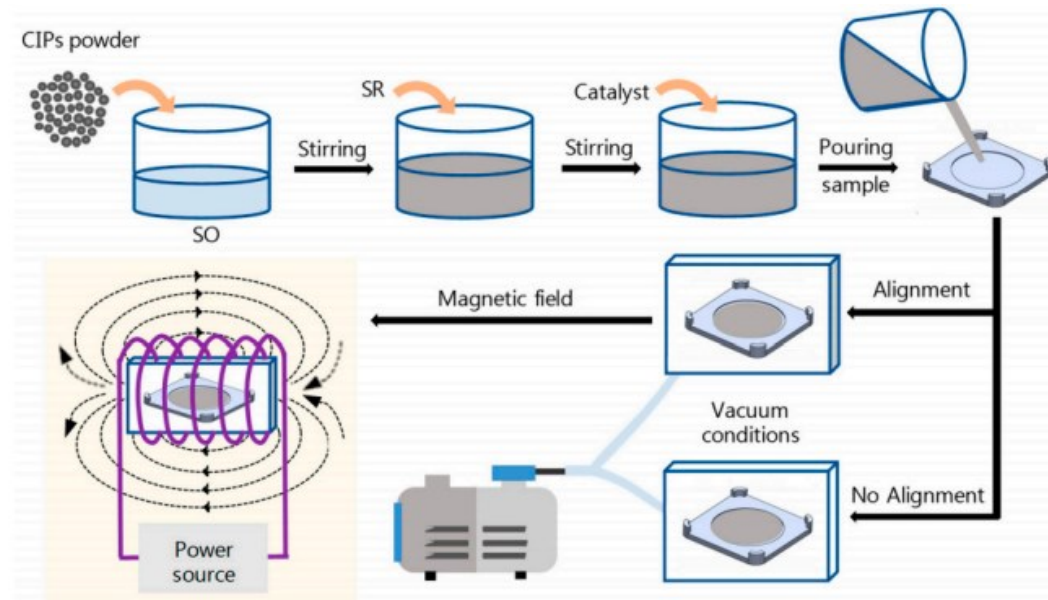
MRE jsou inteligentní elastomerní materiály hybridního kompozitu tvrdých částicí a měkké matrice. MRE obsahuje jedinečné mechanické vlastnosti v tom smyslu, že jejich viskoelastické vlastnosti se mění pod vlivem přiloženého magnetického pole a kromě toho se obecně MRE skládají z elastomerní matrice protkané feromagnetickými částicemi, jako například karbonylového železa (CI) o velikosti mikronů, a proto kombinují funkčnost vysoce elastické polymerní matrice s vlastnostmi reagujícími na magnetické pole. V takovém materiálu dochází ke koalescenci částic CI v přiloženém magnetickém poli, což přispívá k jeho tvrdosti, zvýšenému modulu pružnosti a modulu ve smyku. Typická pryžová matrice zahrnuje silikonový kaučuk (SR), polybutadienový kaučuk, nitrilový kaučuk, polyuretanový kaučuk (PU) a další. [19] [21] [22]

MRE lze rozdělit do dvou různých skupin, na izotropní a anizotropní MRE a to na základě mechanismů konfigurace magneticky polarizovaných částic v magnetickém poli MRE. Polarizované částice jsou rovnoměrně zavěšeny v izotropním MRE, takže MRE vykazuje homogenní fyzikální chování v každém směru. U anizotropního MRE jsou magnetické částice během výrobního procesu vyrovnány podle směru vstupního magnetického pole, což vede ke kolmému směru plochého vzorku MRE. [19] [21] [22]

## 2.4 Technologie výroby

MRE se obecně považuje za pevnou obdobu MRF, která se skládá z magnetizovaných částic v polymerním prostředí. Obvykle jsou jejich rozměry milimetrové. Pokud jde o jejich tvar, typické smykové zkoušky mechanických vlastností vyžadují kruhový nebo válcový tvar a ty jsou v literatuře nejrozšířenější. Jednou z nejužitečnějších vlastností MRE je ovšem to, že vzhledem k tomu, že některé MRE jsou vyrobeny z tekutého elastomeru, který během vytvrzování tuhne, mohou mít jiné rozměry a tvary. Výrobní postup MRE je podobný postupu výroby běžných kaučuků. Co se týče výrobních metod, většinou se MRE připravuje mechanickým smícháním polymerní matrice a magnetického plniva a následným provedením procesu vytvrzování ve formě při teplotě, která je pro příslušný polymer a síťovadlo vhodná. Tento postup je především určen pro MRE s velmi vysokou viskozitou matrice, jako je například syntetický kaučuk EPDM. MRE obsahující řidší matici mohou ovšem využít metody přípravy uvedené na obrázku 5. Materiály zahrnují měkké magnetické částice, elastomery a přísady. MRE lze rozdělit do dvou tříd, které jsou izotropní a anizotropní v závislosti na podmínkách vytvrzování, ať už vyžaduje přiložené magnetické pole, nebo ne. Proces výroby MRE zahrnuje tři kroky: Míchání, vytvrzování, a vyrovnání

magnetických částic pod vstupním magnetickým polem. Izotropní MRE je bez magnetického pole, zatímco anizotropní MRE vyžaduje přiložené magnetické pole. [19] [21] [23]



Obrázek 5 Schéma výroby izotropních a anizotropních magnetoreologických elastomerů [19]

### 3 STÍNĚNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ

Elektromagnetické stínění je jedním z nejdůležitějších prostředků pro zajištění elektromagnetické kompatibility z toho důvodu, že umožňuje na jedné straně zvýšení elektromagnetické odolnosti u citlivé elektroniky a zároveň snižuje rušivé vyzařování u zdrojů rušivých signálů. Elektromagnetické stínění je považováno za schopnost materiálu tlumit šíření dopadajícího elektromagnetického pole prostřednictvím různých mechanismů, jako je odraz, absorpce a vícenásobný odraz. Zároveň samotné stínění je proces, během kterého usilujeme o určitou úroveň útlumu za pomoci k tomu určených konstrukčních prostředků, jako jsou například stínící štíty nebo kryty. [24] [25] [26]

Stínicí účinnost ( $SE$ ) je poměr výkonu mezi prošlým (transmitovaným) a vysílaným elektromagnetickým polem. Vyjadřuje se jako součet tří mechanismů  $SE_R$ ,  $SE_A$  a  $SE_{MR}$ .  $SE_R$  souvisí s impedančními rozdíly mezi povrchem kompozitu a šířícím se prostředím,  $SE_A$  je výsledkem rozptýlené a utlumené energie uvnitř kompozitu a příspěvek  $SE_{MR}$  souvisí s vícenásobnými odrazy mezi povrchy materiálu a je podhodnocen pro účinnost stínění větší než -15 dB. Účinnost stínění lze zapsat jako:

$$SE = SE_R + SE_A + SE_{MR} \text{ (dB)} \quad (2)$$

$$SE = -20 \log_{10} |S_{12}|^2 \quad (3)$$

Účinnost stínění lze vypočítat podle naměřených rozptylových S-parametrů ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ ) z vektorového síťového analyzátoru, kde  $S_{ij}$  označuje přenos z portu  $j$  do portu  $i$ . Na základě

S-parametrů se určí reflektance ( $R$ ), absorpance ( $A$ ) a propustnost ( $T$ ). [25] [26] [27]

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \quad (4)$$

$$T = |S_{12}|^2 = |S_{21}|^2 \quad (5)$$

$$A^2 = 1 - R^2 - T^2 \quad (6)$$

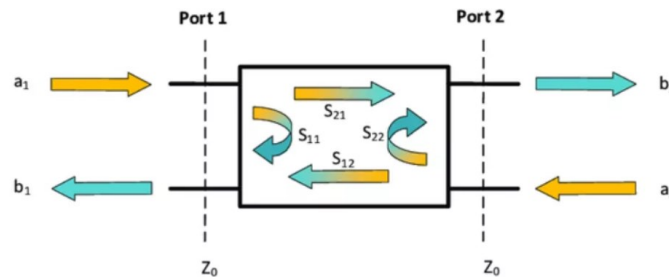
$$S_{21} = 20 \log \frac{I_{\text{průchod}}}{I_0}$$



$$10^{\frac{S_{21}}{20}} = \frac{I_{průchod}}{I_0} \quad (7)$$

$$S_{11} = 20 \log \frac{I_{odraz}}{I_0}$$

$$10^{\frac{S_{21}}{20}} = \frac{I_{odraz}}{I_0} \quad (8)$$



Obrázek 6 Význam S-parametrů při měření na vektorovém analyzátoru [28]

### 3.1 Elektromagnetická kompatibilita

Aby se zabránilo neúmyslnému úniku elektromagnetického záření (EMR) generovaného v různých elektronických zařízeních do vnějšího prostoru a aby se vyloučil vliv záření na jednotlivé citlivé prvky uvnitř radiotechnických zařízení, je nutné řešit problémy elektromagnetické kompatibility. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) vyjadřuje schopnost přístroje, zařízení či systému vykonávat určenou činnost bez ohledu na působení přírodních nebo umělých zdrojů elektromagnetických signálů v daném prostředí. Zároveň by i vlastní elektromagnetickou činností nemělo ovlivňovat okolí, tedy by nemělo vyzařovat rušivé signály pro jiná zařízení. Elektromagnetické stínění je základní metodou pro dosažení elektromagnetické kompatibility (EMC) z hlediska odolnosti vůči elektromagnetickým polím a splnění požadavků na úroveň vyzařovaného rušení. [24] [29]

### 3.2 Radioabsorbéry a jejich stínící vlastnosti

Mechanismy stínění vícefázových polymerních kompozitů můžeme, podle jejich chování v elektrickém a magnetickém poli dělit do dvou skupin:

- a) Dielektricky ztrátové – vodivé materiály se zanedbatelnými magnetickými ztrátami
- b) Magneticky ztrátové – vodivé stínící materiály s magnetickými vlastnostmi

Dielektricky ztrátové kompozitní materiály mají elektricky nevodivou polymerní matici a vodivé plnivo (např.: uhlíková vlákna). Tyto kompozity mohou být využity jako vhodné

mikrovlnné absorbéry pro elektromagnetické interferenční stínění různých elektromagnetických zařízení. Kompozit v elektrickém poli můžeme popsat jako model RC obvodu, kde elektrické částice představují odpor a kontaktu mezi nimi představují kondenzátor. Pomocí působení elektrického pole nastává v polymerním kompozitu posun elektrických nábojů a dochází k polarizaci. Střídavá vodivost kompozitu roste s rostoucí frekvencí, což způsobuje rostoucí příspěvek kapacitních kontaktů k vodivosti. V praxi se ovšem pro přípravu absorberů používají kompozitní materiály, které mají jak ztráty dielektrické, tak i magnetické. Tato kombinace nám totiž umožní připravit absorbéry o menší tloušťce a širším operačním frekvenčním rozsahu. Tyto vlastnosti nejsou dosažitelné pouze za použití dielektricky ztrátových kompozitů.

Magneticky ztrátové kompozitní materiály jsou na bázi vhodné matrice a magnetického plniva. Kvalitu těchto kompozitních materiálů určujeme pomocí navzájem provázaných charakteristik jako jsou operační frekvenční obsah, míra absorpce ve frekvenčním rozsahu, hmotnost nebo tloušťka absorberu. Například polymerní kompozity naplněné magnetickými částicemi na bázi polykrystalických feritů mají mimořádné absorpční vlastnosti v oblasti mikrovln. Těchto vlastností dosáhnou díky tomu, že elektrické pole na kovovém povrchu je eliminováno, zatímco magnetické pole obsahuje maxima. I toto je jeden z důvodů, proč mohou být magnetické absorbéry tenké. [24] [29]

### **3.3 Měření stínících vlastností a Tahová zkouška**

#### **3.3.1 Měření stínících vlastností**

K měření stínících vlastností jsme využili vlnovodu a síťového analyzátoru. Vlnovod je zařízení, které vede vyzařované vlny. Vlnovody jsou obvykle používají pouze při vysokých frekvencích (mikrovlnných a vyšších), protože průměr průřezu vlnovodu musí být řádově polovina vlnové délky nebo větší, aby mohl probíhat proces vlnovodu. Jinými slovy, průměr musí být elektricky velký, aby vlnovod fungoval. Pokud je průměr malý, je záření odříznuto difrakcí podobně jako u elektricky malých clon. V mikrovlnné technice mají vlnovody podobu dutých obdélníkových nebo válcových kovových trubek. V podstatě vlnovod nutí vlnu sledovat svou dráhu tím, že ji nutí, aby se na jeho stěnách zcela odrazila. [30]

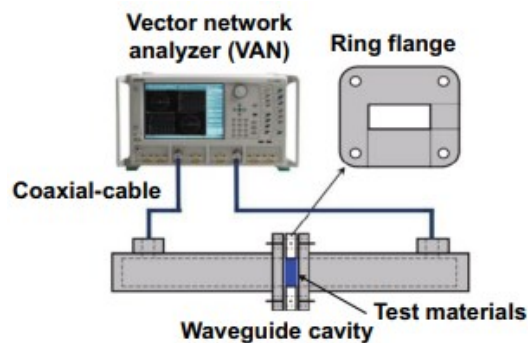
K zobrazení výsledků měření jsme použili vektorový analyzátor Agilent PNA N5230A. Stejně jako všechny vektorové analyzátory, i tento VNA je přístroj typu podnět-odezva, optimalizovaný pro přesné a opakovatelné měření odezvy sítě nebo testovaného zařízení na známý stimulační signál. To je na rozdíl od přístrojů, jako jsou spektrální analyzátory, které

jsou obvykle nakonfigurovány pouze jako přijímač neznámého signálu, a které neobsahují zdroj podnětů, které se aplikují na testované zařízení. VNA má dva provozní režimy: přenosový a odrazový. V tomto režimu odrazu (případně přenosu) VNA měří velikost signálu a fázovou charakteristiku testovaného zařízení porovnáním signálu, který se odráží (případně přenáší) od testovaného zařízení se stimulačním signálem. Každý umožňuje měřit několik užitečných parametrů. V režimu odrazu, VNA může měřit kromě jiného i impedanci testovaného zařízení. VNA Agilent jsou vyspělé, vysoce kvalitní sofistikované charakterizační přístroje, které vytvářejí extrémně přesné, kalibrované měření komplexních hodnotových poměrů na elektromagnetických signálech. Tyto poměry jsou:

$$R = \frac{\text{Odražený signál}}{\text{Vyslany signál}} \quad (8)$$

$$T = \frac{\text{Prošlý signál}}{\text{Vyslany signál}} \quad (9)$$

Dopadající signál je generován a řízen uvnitř VNA. Výsledkem je, že signálové poměry  $R$  a  $T$  nejsou pouze relativní, ale také vztaženy k přesně definovanému vyslanému signálu. [26] [31]



Obrázek 7 Princip měření na vektorovém analyzátoru [26]

### 3.3.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška je zkouškou statickou a určuje nám, jak se těleso deformuje, když na něj působíme vnějšími silami. Cílem zkoušky je stanovit tahový diagram a zjistit základní mechanické charakteristiky jako jsou například mez kluzu, modul pružnosti v tahu nebo mez pevnosti, popřípadě další napěťové a deformační charakteristiky. Pro zkoušku tahem se využívají zkušební tělesa normalizovaných rozměrů. V našem případě samotná zkouška probíhala tak, že jsme uchytili zkušební těleso do pneumatických čelistí a prováděli jsme

zkoušku tahem do přetržení tělesa. Následné hodnoty jsme si vynesli do tahového diagramu.

[27] [32]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

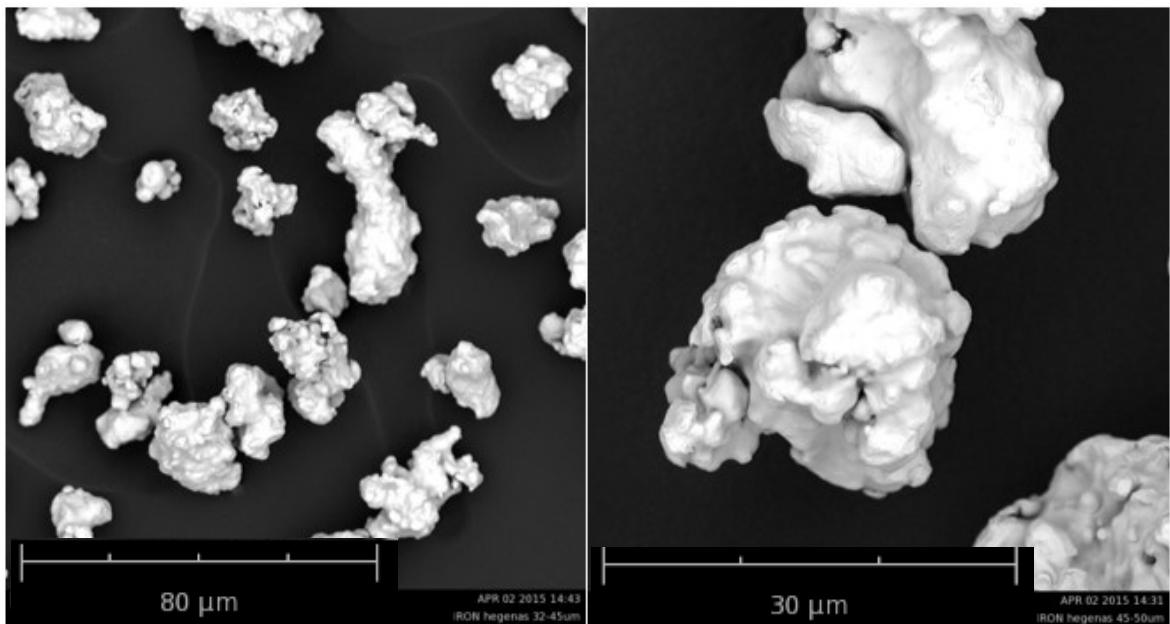
## 4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části bakalářské práce bylo připravit různě koncentrované magnetoreologické kompozity na bázi pryže plněné železnými částicemi. Následně u těchto stanovit jejich stínící účinnost pro elektromagnetického záření a zároveň zjistit, jak plnění ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti.

## 5 PŘÍPRAVA KOMPOZITŮ

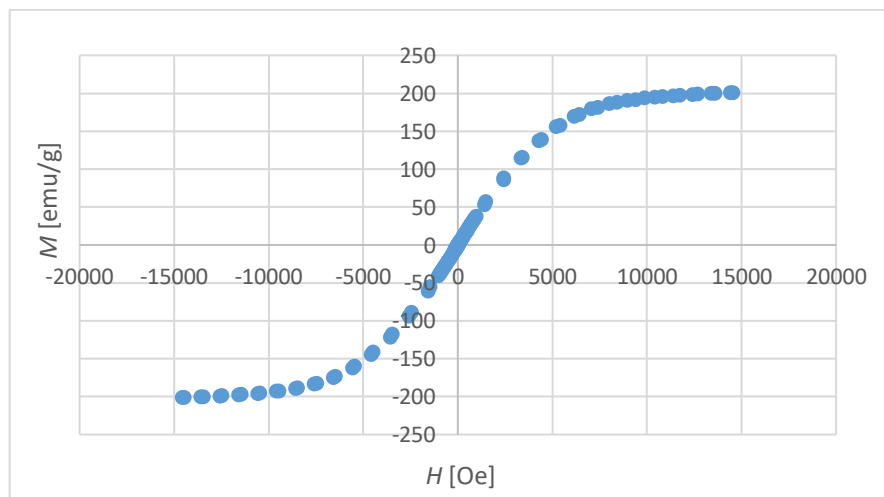
### 5.1 Materiály

Než jsme začali samotnou přípravu kompozitu, navázili jsme si dané látky, které k přípravě kompozitu využijeme. Kompozit se skládá z kaučuku EPDM (Keltan 6950c), sazí (N550), železa ASC200 (Obrázek 8), oleje, síry, stearinu, ZnO a urychlovačů vulkanizace (MBTS, DPG). Poměr každé přísady pro daný vzorek nalezneme v Tabulka 1.



Obrázek 8 Snímky částic železa ASC200 z elektronového mikroskopu

U železa ASC200, které pochází ze Švédska a je vyráběno firmou Höganäs, byly naměřeny jeho magnetické vlastnosti (Obrázek 9). Z této magnetizační křivky jsme zjistili, že se jedná o magneticky měkký materiál.



Obrázek 9 Magnetizační křivka železa ASC200



Tabulka 1 Skladba a navážka kaučukových směsí

Směs:	Kompozit 0%		Kompozit 5%		Kompozit 15%		Kompozit 25%	
	DSK	m [g]	DSK	m [g]	DSK	m [g]	DSK	m [g]
Kaučuk	100	41,17	100	39,12	100	35	100	30,88
N550	25	10,29	25	9,78	25	0,75	25	7,72
Olej	20	8,23	20	7,82	20	7	20	6,18
ZnO	3	1,24	3	1,17	3	1,05	3	0,93
Železo	0	0	59,8	23,4	200,6	70,2	378,9	117
Stearin	1	0,41	1	0,39	1	0,35	1	0,31
MBTS	1	0,41	1	0,39	1	0,35	1	0,31
DPG	0,3	0,12	0,3	0,12	0,3	0,1	0,3	0,09
Síra	1	0,41	1	0,39	1	0,35	1	0,31

## 5.2 Metody

Při následné přípravě kompozitu, jsme dané přísady promíchali dohromady na hnětacím stroji Brandbender (Obrázek 10).



Obrázek 10 Hnětací stroj Brandbender

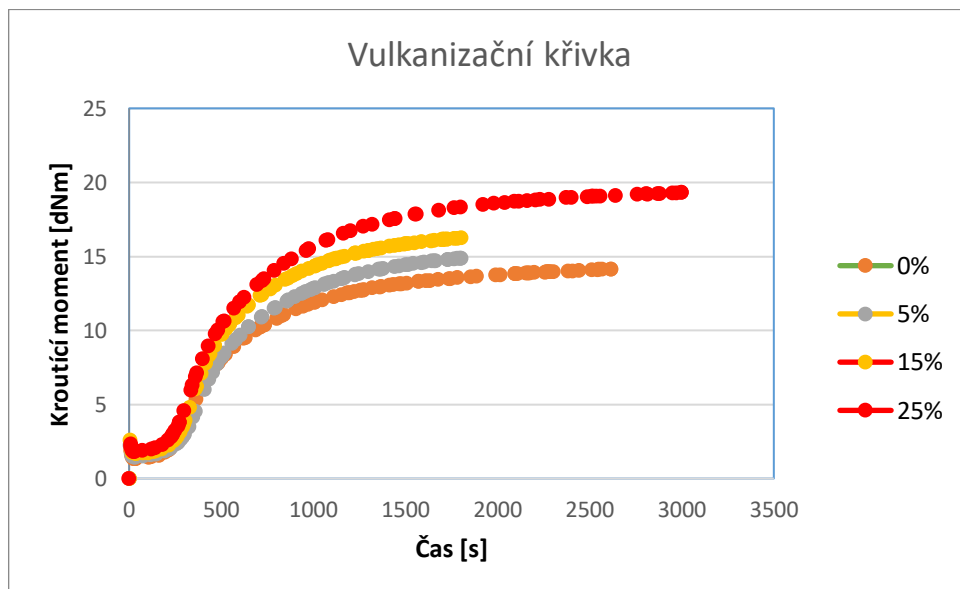
První jsme do hnětiče dali kaučuk, který jsme při nízkých otáčkách (15 rpm) napěchovali do vyhřívané komůrky hnětiče a následně jsme při vyšších otáčkách (60 rpm) kaučuk rozhnětali. Za snížených otáček jsme následně přidali stearin a ZnO dokud se přísady nepromíchaly a poté jsme přidali saze a železo. Po přidání sazí a železa nebyl kompozit příliš celistvý, z toho důvodu jsme po kapkách přidali olej a míchali, dokud se složky kompozitu nespojily. Nakonec jsme přidali urychlovače vulkanizace, a po zhruba minutě míchání jsme

vyjmuli stále ještě nezvulkanizovaný kompozit. Tento kompozit jsme válcovali na dvouválci z důvodu zlepšení tvaru kvůli usnadnění následného lisování.

Pro danou směs byla naměřena vulkanizační křivka na plastometru Mooney (obrázek 11) uvedena na obrázku 12, která nám sloužila pro stanovení ideálního času vulkanizace při teplotě 150 °C



Obrázek 11 Plastometr Mooney



Obrázek 12 Vulkanizační křivka

Ze zkoušky jsme vyvodili optimální časy vulkanizace, při daném plnění pryže při teplotě 150 °C (viz. Tabulka 2)

Tabulka 2 Vulkanizační časy pro různě plněný kaučuk

Kompozit	čas [min]
0%	22
5%	25
15%	19
25%	18

Následně jsme si vypočítali optimální hmotnost kompozitu pro vulkanizaci.

$$V = a^2 \cdot t \text{ [cm}^3\text{]} \quad (10)$$

$$m = \rho \cdot V \text{ [g]} \quad (11)$$

Tabulka 3 Hustota kompozitu a navážka pro vulkanizaci

Kompozit	hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	hmotnost $m$ [g]
0%	1,04	35,75
5%	1,38	47,74
15%	2,05	70,47
25%	2,73	93,84

Poté jsme kompozit zvulkanizovali na vyhřívaném hydraulickém lisu za teploty 150 °C po dobu specifickou každému kompozitu (viz. tab. 2)



Obrázek 13 Vyhřívaný hydraulický lis

Mezi dvě základní měření, která jsme následně provedli, patřilo i měření stínící účinnosti elektromagnetického záření, a to pomocí vlnovodné metody na vektorovém analyzátoru N5230A PNA-L (obrázek 14) a měření mechanických vlastností vzorku pomocí tahové zkoušky.

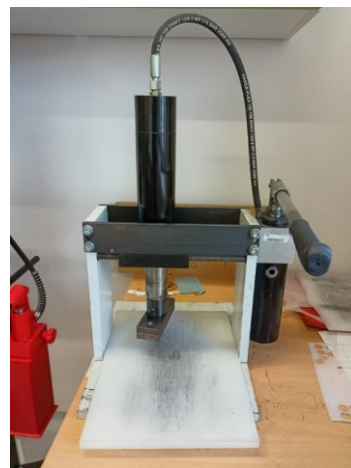


Obrázek 14 Vektorový analyzátor N5230A PNA-L

Pro účel vlnovodných měření bylo nutno vzorky vyrazit do vhodných tvarů, které byly následně vloženy do daných vlnovodů ( WR 90, WR 137). K tomuto úkonu jsme využili vysekávací nože různých velikostí (Obrázek 15) a hydraulického lisu (Obrázek 16).



Obrázek 15 Razicí nože



Obrázek 16 Hydraulický lis

Pomocí hydraulického lisu jsme vysekli 2 vzorky různých velikostí ze všech již předpřipravených kompozitů. Následně jsme vzorky vložili do dutiny vlnovodu (Obrázek 17) odpovídajícímu danému frekvenčnímu pásmu a pomocí vektorového analyzátoru N5230A PNA-L jsme změřili jeho stínící účinnost z podílu intenzit prošlého vůči vyslanému záření/signálu (rozptylový parametr S21). Rozptylový parametr S21 udává schopnost kompozitu odstínit elektromagnetické záření.



Obrázek 17 Vlnovod pro pásmo WR 90

Pro přípravu tahové zkoušky jsme si pomocí razících nožů a hydraulického lisu vyrazili 10 vzorků z každé koncentrace kompozitu. Po přeměření tloušťky každého vzorku pomocí mikrometru Mitutoyo (Obrázek 18) jsme vzorky uchytili do pneumatických čelistí (Obrázek 19).



Obrázek 18 Mikrometr  
Mitutoyo



Obrázek 19 Vzorek upnutý  
v pneumatických čelistech

Následně jsme již provedli tahovou zkoušku pomocí trhacího zařízení (Obrázek 20).

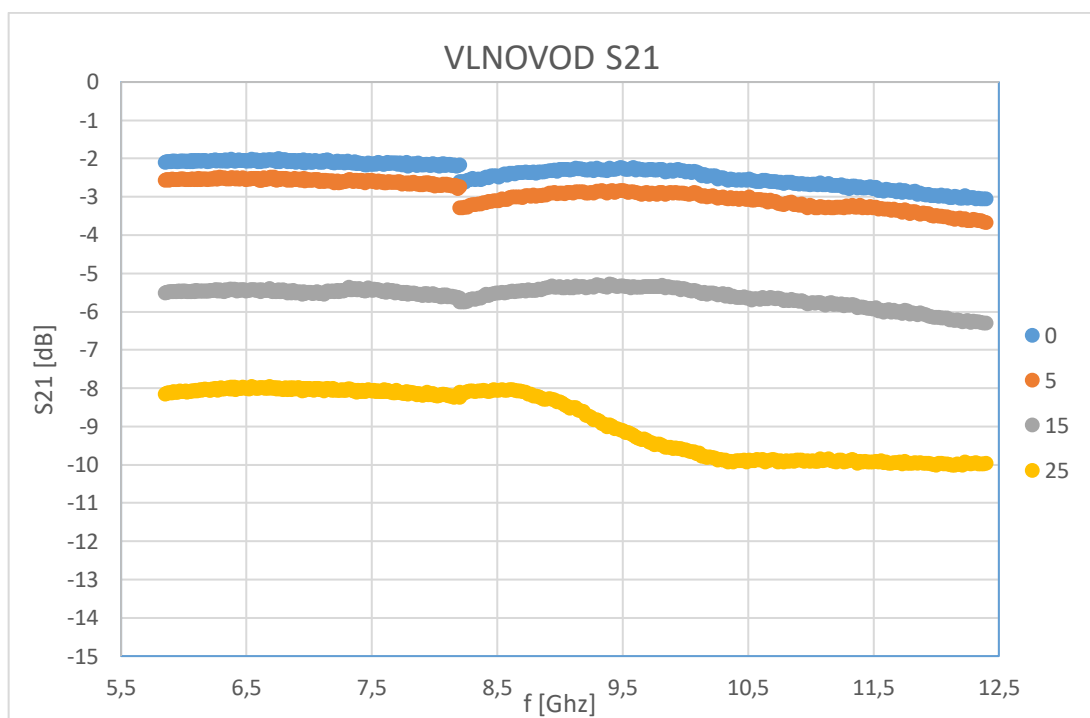


Obrázek 20 Trhací zařízení

## 6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

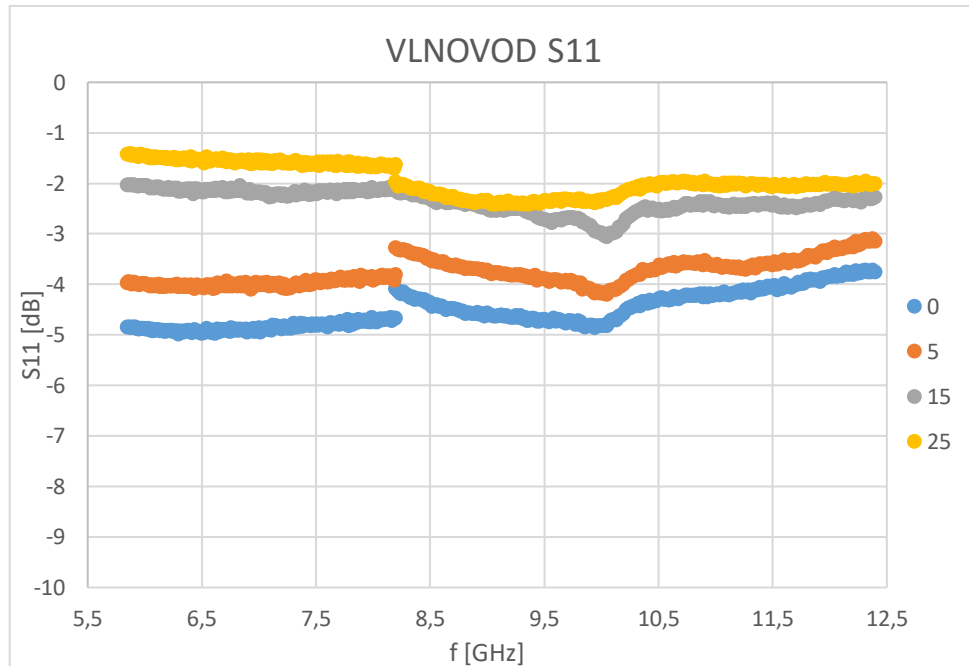
### 6.1 Stínicí účinnosti kompozitů

Naměřené hodnoty stínicí účinnosti jsme vynesli do grafu (obrázek 21). Z grafu je patrné, jak koncentrace železa ve vzorku pryže ovlivňuje stínicí vlastnosti kompozitu. Tedy, že se zvyšující se koncentrací železa v kompozitu se nám propustnost elektromagnetických vln snižuje, a tedy stínicí účinnost kompozitu roste.



Obrázek 21 Stínicí účinnost různě koncentrovaných vzorků pryže ve frekvenčních pásmech WR 137 a WR 90 pro S21

Následně jsme z grafu Vlnovod S11 (Obrázek 22) vyčetli informace ohledně odrazové účinnosti. Zjistili jsme, že odrazové vlastnosti se zlepšují s rostoucí koncentrací železa.



Obrázek 22 Odrazová účinnost různě koncentrovaných vzorků pryže ve frekvenčních pásmech WR 137 a WR 90 pro S11

Poté jsme si z bilanční rovnice vypočítali hodnotu  $A$  (absorpce) a tuto hodnotu jsme si vynesli do grafů (Obrázek 23,24,25 a 26). Nejlepší absorpční hodnoty nám vyšly u kompozitu s nejvyšší koncentrací železa, a tím nám potvrdily trend, že z našich zkoušených vzorků je kompozit s nejvyšší koncentrací železa (25%) nejvhodnější pro stínění elektromagnetických vln. Podobné závěry uvádějí i jiné studie týkající se podobných systému jako jsme měli my [33] [34]. Například při porovnání našich hodnot (tabulka 5) s tabulkou naměřených hodnot ze studie [34] (tabulka 6), můžeme zjistit, že nám vycházejí řádově podobné hodnoty.

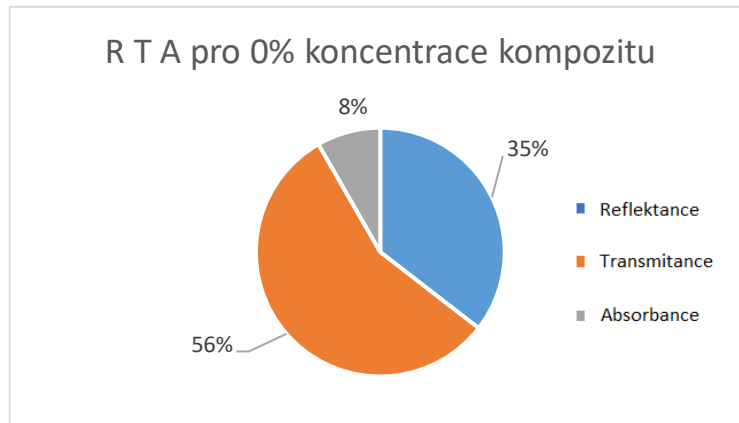
Tabulka 4 Naměřené hodnoty

	Naměřené hodnoty	
	WR137	WR90
0%	-2	-3
5%	-2,5	-3,8
15%	-5,5	-6,2
25%	-8	-10

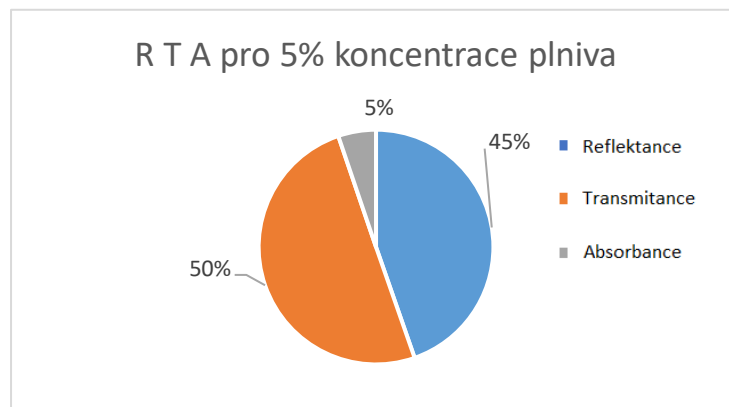


Tabulka 5 Hodnoty k porovnání [34]

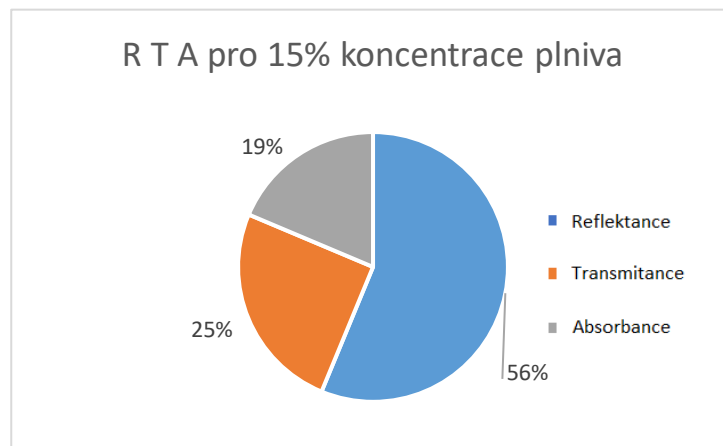
Hodnoty k porovnání		
	WR137	WR90
10%	-2,95	-4,35
20%	-6,25	-8,45
30%	-9,2	-12,6



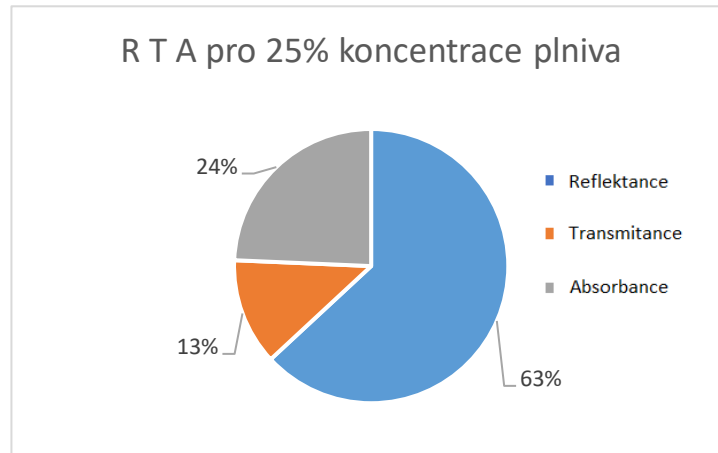
Obrázek 16 Graf RTA pro 0% koncentrace kompozitu



Obrázek 24 Graf RTA pro 5% koncentrace kompozitu



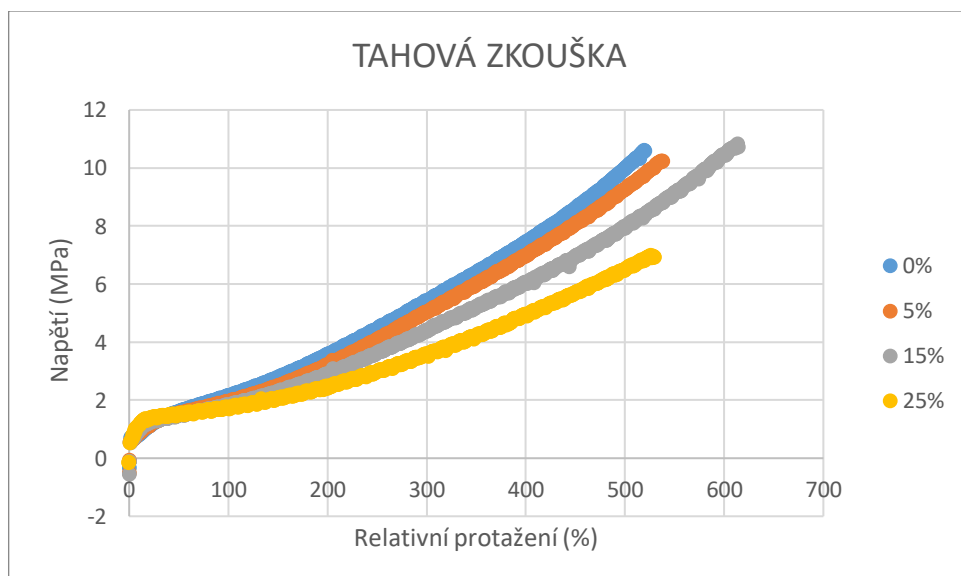
Obrázek 17 Graf RTA pro 15% koncentrace kompozitu



Obrázek 26 Graf RTA pro 25% koncentrace kompozitu

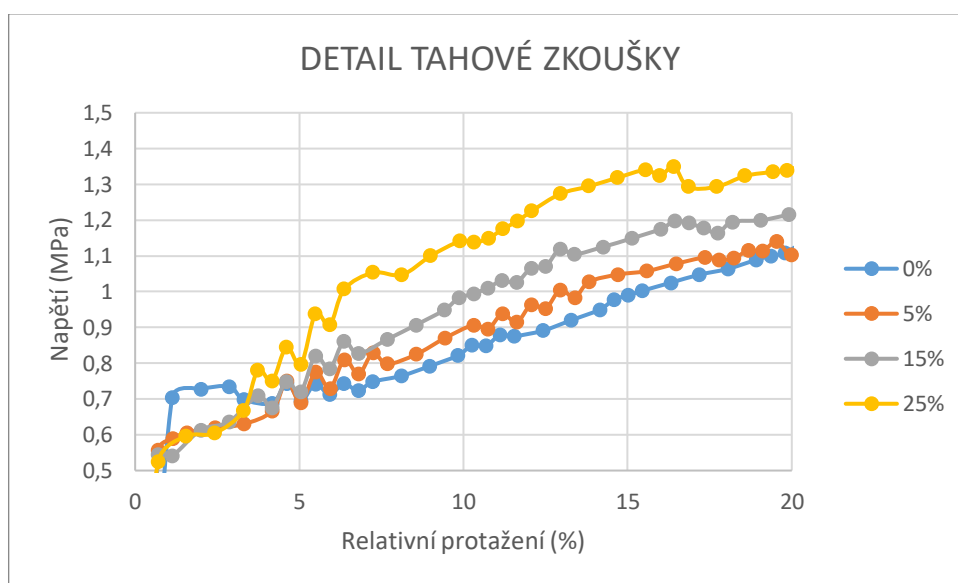
## 6.2 Mechanické vlastnosti kompozitů

Po naměření tahové zkoušky jsme si výsledky vynesli do grafu (obrázek 27). Z grafu můžeme vyčíst, že s rostoucí koncentrací železa v kompozitu nám klesá napětí, jenž je potřeba k přetržení vzorku. S přidavkem železa klesá tahový modul (dán strmostí jednotlivých křivek) kompozitu (pryže), což může být způsobeno tím, že plnivo působí jako mikrotrhlina či koncentrátor napětí a nepřispívá pozitivně k celkové pevnosti. Naštěstí je tato negativní vlastnost vyvážena zlepšenou stínící účinností.



Obrázek 27 Graf tahové zkoušky

Zároveň je ale důležité zmínit, že z detailu tahové zkoušky (Obrázek 28) a z tabulky 4 můžeme vyčíst, že Youngův modul se s rostoucí koncentrací plniva zvyšuje. Tento trend se ovšem ukazuje být pravdou pouze pro začátek tahové zkoušky. Pevnost v tahu se s rostoucí koncentrací plniva snižuje, je nutno ovšem podotknout, že tento pokles není vysoký pro koncentrace 0%, 5% a 10%. Avšak pro koncentraci 25% je tento pokles mnohem rapidnější, konkrétně se jedná o snížení až o jednu třetinu. Jak již bylo ale v textu dříve zmíněno, tento pokles v pevnosti je ovšem stále přijatelný, protože je vyvážen zlepšením stínících vlastností.



Obrázek 28 Detail tahové zkoušky

Tabulka 6 Hodnoty tahové zkoušky

Průměrné hodnoty pro:	Youngův modul (N/mm <sup>2</sup> )	Tažnost [%]	Pevnost v tahu [MPa]
0%	2,5 ± 0,7	520 ± 62	9,21 ± 1,78
5%	3,4 ± 0,7	510 ± 25	9,20 ± 0,97
15%	4,4 ± 0,1	560 ± 38	9,14 ± 1,25
25%	4,8 ± 0,9	490 ± 29	6,17 ± 0,45

## ZÁVĚR

V teoretické části jsme si jako první vysvětlili, co to je polymerace a následně jsme si určili základní dělení polymerace.

Dalším tématem jsou kompozity, u kterých jsme si určili základní rozdělení kompozitů a k čemu kompozity využíváme. Poté jsme si popsali důležitost matrice pro kompozitní materiály a vypsalí jsme si základní informace pro termoplastické, termosetické a elastomerní matrice, přičemž u elastomerních matric jsme se i zaměřili na EPDM kaučuk, který je dále využit v praktické části bakalářské práce. Následně jsme si popsali využití plniv a výztuží pro kompozitní materiály, a jakým způsobem nám ovlivní vlastnosti kompozitu.

Dalším tématem jsou magnetoreologické elastomery. Definovali jsme si u nich, o jaké materiály se jedná, uvedli jsme si základní dělení a nakonec jsme si popsali technologii výroby.

Hlavním tématem této bakalářské práce je stínění elektromagnetického záření. Zde jsme si uvedli definici a možnosti výpočtu elektromagnetického stínění. Následným krokem byl popis zajímavých vlastností, jako je například elektromagnetická kompatibilita a popis radioabsorbérů a jejich stínících vlastností. Finálním krokem byl popis způsobu měření stínících vlastností a popis tahové zkoušky.

V praktické části jsme si připravili 4 kompozitní materiály s rozdílným obsahem železa (0%, 5%, 15% a 25%) pomocí hnětiče, pomocí plastometru Mooney jsme zjistili čas potřebný k vulkanizaci a následně jsme kompozity vulkanizovali na vyhřívaném hydraulickém lisu. Poté jsme si pomocí hydraulického lisu a razících nožů vyrazili vzorky pro měření mechanických a stínících vlastností kompozitu.

Pro měření stínících vlastností jsme využili metodu vlnovodu a vektorového analyzátoru. Toto měření jsme prováděli na vlnovodech ve frekvenčním pásmu 5,85 – 12,5 GHz (WR137 a WR90). Pro měření mechanických vlastností jsme využili tahové zkoušky, kde jsme provedli 10 měření pro každou z rozdílných koncentrací železa v kompozitu.

Naměřené výsledky zkoušek jsme vynesli do grafu a následně diskutovali. Z naměřených výsledků vyplývá, že s rostoucí koncentrací plniva v kompozitu se stínící vlastnost zlepšují, ovšem toto zlepšení je na úkor mechanických vlastností. Mechanické vlastnosti se naopak s rostoucí koncentrací plniva zhoršují. Na závěr jsme naše poznatky porovnali s již dříve provedenými studiemi.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ŠŇUPÁREK, Jaromír. Makromolekulární chemie: úvod do chemie a technologie polymerů. Vyd. 2., dopl. a upr. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2009, 167 s. ISBN 9788073951665.
- [2] PROKOPOVÁ, Irena. Makromolekulární chemie. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2004, 207 s. ISBN 8070805544.
- [3] THOMAS, Sabu, ed. Polymer composites. Volume 1. Weinheim: Wiley-VCH, 2012, 1 online zdroj (xxxii, 814 s.). Dostupné z: doi:9783527645213
- [4] CAMPBELL, F. C. Manufacturing processes for advanced composites. New York: Elsevier, 2004, 1 online zdroj (xii, 517 p.). ISBN 9781856174152. Dostupné také z [https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMPAC0002/manufacturing\\_processes\\_for\\_advanced\\_composites](https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMPAC0002/manufacturing_processes_for_advanced_composites)
- [5] MALLICK, P. K. Polymer matrix composites: processing and applications. Milton: CRC Press, 2017, 1 online zdroj (356 stran). ISBN 9781315157252. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=https://www.taylorfrancis.com/books/9781315157252>
- [6] JIN, Fan-Long, Seul-Yi LEE a Soo-Jin PARK, 2013. Polymer matrices for carbon fiber-reinforced polymer composites. Carbon letters [online]. 14(2), 76-88 [cit. 2023-05-08]. ISSN 1976-4251. Dostupné z: doi:10.5714/CL.2013.14.2.076
- [7] CAMPBELL, F. C. Structural composite materials. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010, 1 online zdroj (xiii, 612 p.). ISBN 9781613441244. Dostupné také z: [https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSCM00001/structural\\_composite\\_materials](https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSCM00001/structural_composite_materials)
- [8] TYAGI, A.K. a S BANERJEE, ed., January 13, 2017. Materials Under Extreme Conditions. Bhabha Atomic Research Centre (BARC), Mumbai, India: Elsevier. ISBN 9780128013007.
- [9] PAPAGEORGIOU, Dimitrios G., Ian A. KINLOCH a Robert J. YOUNG. Graphene/elastomer nanocomposites. Carbon [online]. 2015, 95, 460-484 [cit. 2023-05-10]. ISSN 00086223. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbon.2015.08.055

- [10] All About EPDM Rubber - Properties, Applications and Uses [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/plastics-rubber/all-about-epdm-rubber-properties-applications-and-uses/>
- [11] THOMAS, Sabu. Natural rubber materials. Volume I, Blends and IPNs. Cambridge, UK: RSC Publishing, [2014], 1 online zdroj (635 pages). RSC polymer chemistry series. ISBN 9781849737647. Dostupné také z: [https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpNRMVBIP1/natural\\_rubber\\_materials\\_volume\\_1\\_\\_blends\\_and\\_ipns](https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpNRMVBIP1/natural_rubber_materials_volume_1__blends_and_ipns)
- [12] ALI SHAH, Aamer et al., 2013. Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review. International Biodeterioration & Biodegradation [online]. 83, 145-157 [cit. 2023-05-08]. ISSN 09648305. Dostupné z: doi:10.1016/j.ibiod.2013.05.004
- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 9788086960296
- [14] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. Nauka o materiálu. 4. část, Polymery a kompozity s polymerní matricí. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 9788001039274.
- [15] XANTHOS, Marino, ed. Functional fillers for plastics. 2nd, updated and enlarged ed. Weinheim: Wiley-VCH, c2010, xxviii, 507 s. Dostupné z: doi:9783527629848
- [16] MARK, James E., Burak ERMAN a Mike ROLAND. The science and technology of rubber. Fourth edition. Amsterdam: Elsevier Academic Press, [2013], 1 online zdroj (xiv, 786 pages). ISBN 9780123948328. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123945846>
- [17] KARVANIS, Konstantinos. Vlákny vyztužené polymerní kompozity: příprava, mechanické vlastnosti a termická analýza. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2021, 1 online zdroj (38 stran). ISBN 978-80-7678-030-9. Dostupné také z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/49816>

- [18] Review on Conductive Polymer/CNTs Nanocomposites Based Flexible and Stretchable Strain and Pressure Sensors [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/348299537\\_Review\\_on\\_Conductive\\_PolymerCNTs\\_Nanocomposites\\_Based\\_Flexible\\_and\\_Stretchable\\_Strain\\_and\\_Pressure\\_Sensors](https://www.researchgate.net/publication/348299537_Review_on_Conductive_PolymerCNTs_Nanocomposites_Based_Flexible_and_Stretchable_Strain_and_Pressure_Sensors)
- [19] KANG, Sung, Kisuk CHOI, Jae-Do NAM a Hyoung CHOI, 2020. Magnetorheological Elastomers: Fabrication, Characteristics, and Applications. *Materials* [online]. 13(20), 4597. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13204597
- [20] Smart materials, discover the materials with which we will shape the future [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.iberdrola.com/innovation/smart-materials-applications-examples>
- [21] DÍEZ, Ander García et al., 2021. Magnetorheological Elastomer-Based Materials and Devices: State of the Art and Future Perspectives. *Advanced Engineering Materials* [online]. 23(6) [cit. 2023-05-08]. ISSN 1438-1656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.202100240
- [22] SEDLACIK, M. et al., 2016. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures* [online]. 135, 199-204 [cit. 2023-05-08]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2015.09.037
- [23] CHEN, Lin et al., 2007. Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber. *Journal of Materials Science* [online]. 42(14), 5483-5489 [cit. 2023-05-08]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-006-0975-x
- [24] VILČÁKOVÁ, Jarmila. Účinnost stínění polymerními kompozity s elektromagnetickými vlastnostmi. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2021, 60 s. Teze přednášek ke jmenování profesorem. ISBN 978-80-7454-994-6.
- [25] GARZÓN POSADA, Andrés O. et al., 2020. Electromagnetic shielding response of magnetite elastomeric composites: Source and filler content dependence. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 9(5), 10597-10607 [cit. 2023-05-08]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2020.07.081

- [26] LIANG, Chaobo et al., 2021. Structural Design Strategies of Polymer Matrix Composites for Electromagnetic Interference Shielding: A Review. *Nano-Micro Letters* [online]. 13(1) [cit. 2023-05-08]. ISSN 2311-6706. Dostupné z: doi:10.1007/s40820-021-00707-2
- [27] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření: pro SPŠ strojní*. Praha: Informatorium, 2009, 206 s. ISBN 9788073330729.
- [28] S-Parameter Measurement with the Frequency Response Analyzer [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.liquidinstruments.com/blog/2022/07/05/s-parameter-measurement-with-the-frequency-response-analyzer/>
- [29] FIONOV, Alexander et al., 2022. Radio-Absorbing Materials Based on Polymer Composites and Their Application to Solving the Problems of Electromagnetic Compatibility. *Polymers* [online]. 14(15) [cit. 2023-05-08]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym14153026
- [30] SCHMITT, Ron. *Electromagnetics explained: a handbook for wireless/RF, EMC, and high-speed electronics*. Amsterdam: Newnes, c2002, 1 online zdroj (xvi, 359 p.). EDN series for design engineers. ISBN 9780750674034. Dostupné také z: [https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEEAHWRF6/electromagnetics\\_explained\\_\\_a\\_handbook\\_for\\_wirelessrf\\_emc\\_and\\_highspeed\\_electronics](https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEEAHWRF6/electromagnetics_explained__a_handbook_for_wirelessrf_emc_and_highspeed_electronics)
- [31] Scanning Microwave Microscope Mode [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: [https://www.agilent.com/cs/library/applications/SMM\\_5989-8818REVA.pdf](https://www.agilent.com/cs/library/applications/SMM_5989-8818REVA.pdf)
- [32] *Nauka o materiálu I.* - PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 8072041932
- [33] HEMA, S., Sreedha SAMBHUDEVAN, P.M. MAHITHA, et al. Effect of conducting fillers in natural rubber nanocomposites as effective EMI shielding materials. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, 25, 274-277 [cit. 2023-05-10]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.01.392
- [34] RONZOVÁ, Alena. *Radioabsorbéry na bázi magnetoreologických elastomerů*. 2019, 131 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/45436>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$A$	Absorpce
$a$	Zrychlení
AF	Aramidová vlákna
CF	Uhlíková vlákna
CI	Karboonylové železo
$D$	Nejmenší rozměr pro výpočet $\lambda$
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMR	Elektromagnetické záření
EPDM	Ethylen propylen dien monomer
GF	Skleněná vlákna
$I_0$	Vyslaný signál
$I_{\text{průchod}}$	Prošlý signál
$I_{\text{odraz}}$	Odražený signál
$L$	Nejdelší rozměr pro výpočet $\lambda$
$m$	Hmotnost
MR	Magnetoreologický
MRE	Magnetoreologický elastomer
MRF	Magnetoreologická kapalina
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PEKK	Polyetherketoneketon
PMC	Polymerní matrice
PP	Polypropylen
PPS	Polyfenylsulfid
PU	Polyuretanový kaučuk

---

PVC	Polyvinylchlorid
$R$	Reflektance
RC obvod	Elektrický obvod složený z rezistorů a kondenzátorů
$S_{11}$	S-parametr odrazu
$S_{12}$	S-parametr propustnosti
$S_{21}$	S-parametr propustnosti
$S_{22}$	S-parametr odrazu
$SE$	Účinnost stínění
$SE_A$	Výsledek rozptýlené a utlumené energie uvnitř kompozitu
$SE_{MR}$	Vícenásobné odrazy mezi povrchy materiálu
$SE_R$	Impedančními rozdíly mezi povrchem kompozitu a šířícím se prostředím
$t$	Čas
$T$	Transmitance
$T_g$	Teplota skelného přechodu
UV	Ultrafialové záření
$V$	Objem
VNA	Vektorový analyzátor
WR	Rozdílné frekvence vlnovodu
$\lambda$	Štíhlostní poměr
$\rho$	Hustota
$\mu\text{m}$	Mikrometry

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1	Rozdělení kompozitů [3].....	13
Obrázek 2	Nárůst hustoty kompozitu s koncentrací plniva [15].....	19
Obrázek 3	Distribuce velikosti částic a jejich vliv na vlastnosti [15] .....	19
Obrázek 4	Graf perkolační křivky [18] .....	21
Obrázek 5	Schéma výroby izotropních a anizotropních magnetoreologických elastomerů [19] .....	23
Obrázek 6	Význam S-parametrů při měření na vektorovém analyzátoru [28] .....	25
Obrázek 7	Princip měření na vektorovém analyzátoru [26] .....	27
Obrázek 8	Snímky částic železa ASC200 z elektronového mikroskopu.....	32
Obrázek 9	Magnetizační křivka železa ASC200.....	32
Obrázek 10	Hnětacím stroji Brandbender .....	33
Obrázek 11	Plastometr Mooney .....	34
Obrázek 12	Vulkanizační křivka.....	34
Obrázek 13	Vyhřívaný hydraulický lis.....	35
Obrázek 14	Vektorový analyzátor N5230A PNA-L .....	36
Obrázek 15	Razicí nože .....	36
Obrázek 16	Hydraulický lis .....	36
Obrázek 17	Vlnovod pro pásmo WR 90.....	37
Obrázek 18	Mikrometr Mitutoyo .....	37
Obrázek 19	Vzorek upnutý v pneumatických čelistech .....	37
Obrázek 20	Trhací zařízení .....	38
Obrázek 21	Stínící účinnost různě koncentrovaných vzorků pryže ve frekvenčních pásmech WR 137 a WR 90 pro S21 .....	40
Obrázek 22	Odrazová účinnost různě koncentrovaných vzorků pryže ve frekvenčních pásmech WR 137 a WR 90 pro S11 .....	41
Obrázek 23	Graf RTA pro 0% koncentrace kompozitu .....	42
Obrázek 24	Graf RTA pro 5% koncentrace kompozitu .....	42
Obrázek 25	Graf RTA pro 15% koncentrace kompozitu .....	42
Obrázek 26	Graf RTA pro 25% koncentrace kompozitu .....	43
Obrázek 27	Graf tahové zkoušky .....	43
Obrázek 28	Detail tahové zkoušky.....	44

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1	Skladba a navážka kaučukových směsí.....	33
Tabulka 2	Vulkanizační časy pro různě plněný kaučuk .....	35
Tabulka 3	Hustota kompozitu a navážka pro vulkanizaci .....	35
Tabulka 4	Naměřené hodnoty .....	40
Tabulka 5	Hodnoty k porovnání [34] .....	41
Tabulka 6	Hodnoty tahové zkoušky .....	43

