

Elektroreologické kapaliny na bázi jílových částic

Bc. Luboš Machač

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš Machač**
Osobní číslo: **T18313**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Elektroreologické kapaliny na bázi jílových částic**

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše na zadané téma
3. Analýza jílových mikročástic
3. Příprava elektroreologických tekutin o různém složení
4. Analýza elektroreologického chování zkoumaných materiálů (reologická měření v ustáleném smykovém a oscilačním smykovém poli, dielektrické vlastnosti)
5. Diskuze získaných výsledků

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

Seznam doporučené literatury:

1. Hao T.: Electrorheological fluids. *Advanced Materials*, 13 (2001) 1847-1857.
2. Sedlačík M., Mrlík M., Pavlínek V., Sába P, Quadrat O.: Electrorheological properties of suspensions of hollow globular titanium oxide/polypyrrole particles. *Colloid and Polymer Science*, 290 (2012) 41-48.
3. Ramos-Tejada M.D., Rodriguez J.M, Delgado A.V.: Electrorheology of clay particle suspensions. Effects of shape and surface treatment. *Rheologica Acta*, 57 (2018) 405-413.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Michal Sedlačík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
Podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje zkoumáním elektoreologických kapalin na bázi jílovitého minerálu sepiolitu v silikonovém oleji. Studované inteligentní systémy se lišily koncentrací částic sepiolitu a na těchto systémech byly zkoumány reologické vlastnosti v ustáleném smykovém a oscilačním toku jak při absenci, tak také v přítomnosti vnějšího elektrického pole; dále pak dielektrické charakteristiky a sedimentační stabilita. Bylo prokázáno, že částice sepiolitu vytvářejí gelovou strukturu v systému, která vede ke zvýšené dlouhodobé sedimentační stabilitě.

Klíčová slova: Elektoreologie, elektoreologické efekty, jílové minerály, viskoelasticita, dielektrické vlastnosti, sedimentační stabilita.

ABSTRACT

Master thesis is aimed on the preparation and characterization of electrorheological fluids based on clay material sepiolite dispersed in silicone oil. The intelligent systems under investigation differs in particles concentration and their rheological properties under the steady as well as oscillatory shear mode in the absence as well as in the presence of an external electric field, and further dielectric characteristics and sedimentation stability are investigated. It is proved that the sepiolite particles from internal gel-like structure within the system resulting in improved sedimentation stability.

Keywords: Electrorheology, electrorheological effects, clay minerals, viscoelasticity, dielectric properties, sedimentation stability

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Michalovi Sedláčikovi, Ph.D. za příkladné vedení práce, trpělivost a cenné odborné rady, které mi poskytoval.

Dále pak bych chtěl poděkovat celé své rodině a zvláště pak rodičům za poskytnutou podporu a zázemí, které mi umožnilo studovat.

Děkuji

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

OBSAH

ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST.....	9
1 ELEKTROREOLOGICKÝ SYSTÉM.....	10
2 ELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT.....	11
2.1 POZITIVNÍ A NEGATIVNÍ ER EFEKT	11
2.2 ELEKTROMAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT	12
2.3 FOTOELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT.....	13
3 ELEKTROREOLOGICKÉ MATERIÁLY.....	14
3.1 DISPERGOVANÁ FÁZE	14
3.1.1 Anorganické materiály	14
3.1.2 Organické materiály	15
3.1.3 Vodivé polymery	15
3.1.4 Kompozitní částice jádro – obal.....	17
3.2 DISPERZNÍ FÁZE	17
4 JÍLOVÉ MINERÁLY	18
4.1 CHARAKTERISTIKA JÍLOVÝCH MINERÁLŮ	18
4.2 SEPIOLIT.....	18
5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ER EFEKT	20
5.1 INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE	20
5.2 FREKVENCE ELEKTRICKÉHO POLE	20
5.3 TEPLOTA	21
5.4 OBJEMOVÝ ZLOMEK ČÁSTIC	22
6 ELEKTROREOLOGICKÉ VLASTNOSTI SYSTÉMŮ	23
6.1 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI.....	23
6.2 VISKOELASTICKÉ VLASTNOSTI	25
6.3 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI	27
7 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	30
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
8 CÍL PRÁCE	32
9 EXPERIMENT.....	33

9.1	CHEMIKÁLIE.....	33
9.2	PŘÍSTROJE A POMŮCKY.....	33
9.3	POSTUP PŘÍPRAVY ER SYSTÉMŮ S ČÁSTICEMI SEPIOLITU	33
9.4	REOLOGICKÁ MĚŘENÍ.....	33
9.5	MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ	35
10	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	37
10.1	MORFOLOGIE ČÁSTIC SEPIOLITU.....	37
10.2	MĚŘENÍ ELEKTROREOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ	38
10.3	MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ	44
	ZÁVĚR	48
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	49
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	54
	SEZNAM OBRÁZKŮ	56
	SEZNAM TABULEK.....	58

ÚVOD

V současné době jsou inteligentní materiály používány ve většině moderních technologií. Jako příklad výjimečnosti inteligentních materiálů může být uvedena schopnost přeměnit své skupenství z kapalného stavu do pevného stavu během několika milisekund po využití obecně vnějšího fyzikálního pole, což má za následek výraznou změnu v chování celého systému. V případě aplikace vnějšího elektrického pole se bude jednat o tzv. elektoreologické (ER) systémy, které jsou předmětem této diplomové práce.

Typické ER systémy jsou tvořeny nevodivým kapalným médiem (disperzní prostředí), které obsahuje buď vodivé částice, nebo vodivou kapalinu. Toto složení dovozuje elektoreologickému systému rychle změnit své základní reologické parametry, jako jsou viskozita a smykové napětí. Reologické přeměny ER systému jsou reverzní a téměř okamžité. Pro dané použití jsou nejpodstatnějšími vlastnostmi elektoreologických systémů nízké proudové hustoty, vhodná teplotní stabilita, nízká sedimentace dispergovaných částic a vysoké prahové napětí (mez toku) v aktivovaném stavu, tj. v přítomnosti vnějšího elektrického pole.

V dnešní době existují dva druhy ER systémů a to bezvodé a vlhkost obsahující. V ER systémech obsahujících vlhkost funguje adsorbovaná voda jako nosič pohyblivých nábojů na povrchu částic, což zvyšuje intenzitu ER efektu. Zároveň zde však přítomnost adsorbované vlhkosti tvoří mnoho problémů, jako jsou úzký rozsah teplot použití, vysoká proudová hustota a možná koroze zařízení. Kvůli těmto důvodům je vhodnější volit bezvodé ER systémy.

Elektoreologické systémy jsou využívány na výrobu spojek, brzd, tlumičů, ventilů pro vstříkávání a pro výrobu robotických systémů. Dále mohou být využity pro světelné závěrky u fotoaparátů, mechanické leštění, displeje, inkoustové tiskárny, stimulátory lidských svalů, mechanické senzory, atd.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROREOLOGICKÝ SYSTÉM

Elektroreologický (ER) systém je koloidní disperze, která obsahuje dvě fáze. Dispergovanou fází a disperzní fází. Prvně jmenované jsou většinou zastoupeny pevnými částicemi, druhé tvoří nevodné kapalně médium. [4] Těmto materiálům je přikládán velký význam z důvodu jejich schopnosti měnit fyzikální vlastnosti při působení vnějšího elektrického pole. [38]

Aby ER systém mohl být použitelný v průmyslu, je třeba docílit následujících vlastností:

1. Po odstranění vnějšího elektrického pole by se měl systém rychle vrátit do stavu nízké viskozity,
2. Systém musí mít dlouhou životnost v inženýrských zařízeních s ohledem na jejich fyzikální a chemické vlastnosti,
3. Systém musí být slučitelný s ostatními materiály použitými v inženýrských aplikacích,
4. Systém by měl vykazovat odolnost proti tepelnému rozkladu. [39,40]

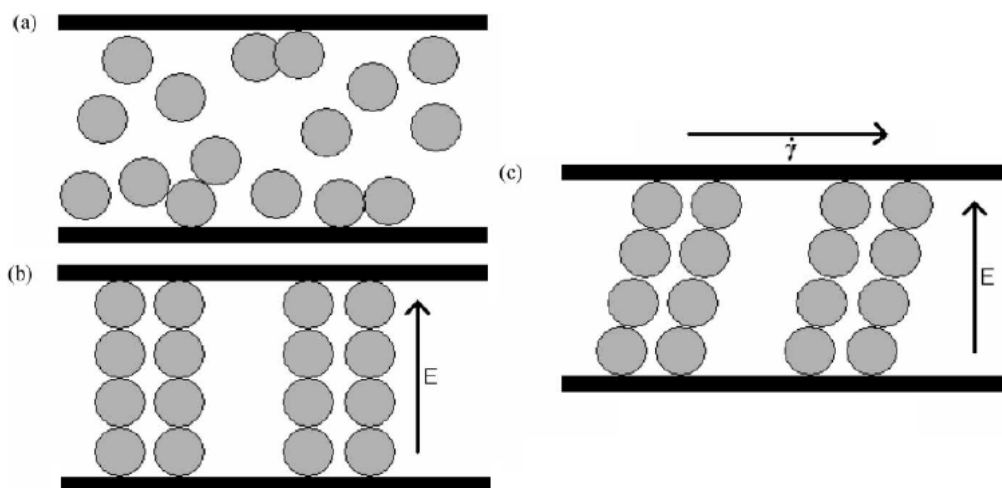
Tyto materiály by měly tedy vykazovat určité klíčové vlastnosti, které budou v práci dále rozebírány podrobněji. Pro přípravu takových systémů lze použít různé druhy materiálů.

2 ELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT

Elektroreologický efekt je definován jako změna reologických vlastností, jako je viskozita, smykové napětí či modul tuhosti, za přítomnosti vnějšího elektrického pole. Reologické vlastnosti se mohou zvyšovat nebo snižovat. Ve všech případech jsou změny určeny fyzikálními vlastnostmi obou fází. [1] Elektroreologické systémy mohou vykazovat několik typů ER efektů. Z hlediska změny viskozity, smykového napětí a modulu tuhosti, lze rozlišit, jak již bylo naznačeno, pozitivní a negativní účinky. V prvním případě se reologické vlastnosti zvyšují s rostoucí intenzitou elektrického pole a ve druhém případě se naopak snižují. [2,3] Elektroreologický efekt se dále dělí podle citlivosti na typ aplikovaného nejen elektrického pole na tzv. foto-ER a elektromagnetický efekt. [4]

2.1 Pozitivní a negativní ER efekt

Charakteristikou pozitivního ER efektu je zvyšování viskozity při aplikaci vnějšího elektrického pole, kdy uvnitř systému dochází k reorganizaci dispergovaných částic. Částice se polarizují v elektrickém poli a vytvářejí řetězkové struktury, orientované ve směru intenzity vnějšího elektrického pole. Díky těmto řetězcům částic lze dosáhnout výrazné zlepšení mechanické odolnosti ER systémů, kdy tyto mají za následek silný ER efekt. [6] Tento ER efekt objevil Winslow. [5]

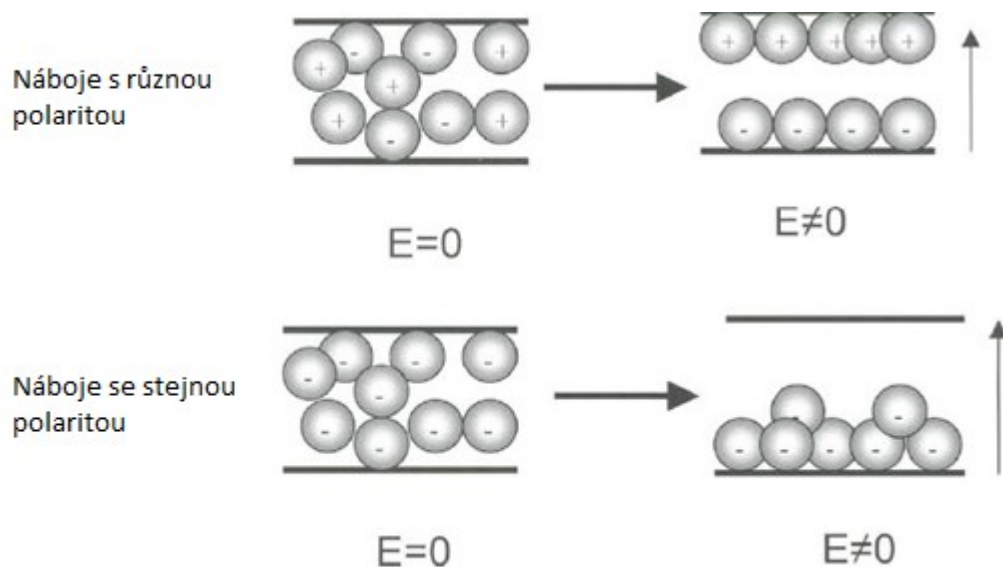


Obr. 1: Schématické znázornění ER systému a) bez aplikovaného vnějšího elektrického pole, b) s aplikovaným vnějším elektrickým polem, c) s aplikovaným smykovým polem a vnějším elektrickým polem. [6]

Zvláštní případ pozitivního ER efektu je tzv. giant ER efekt, který nedávno objevil Wen. [7] V tomto případě se po aplikaci vnějšího elektrického pole polarizované částice seskupují

do tuhých sloupců zarovnaných podél směru působícího pole. Bylo zjištěno, že takové chování je připisováno malé velikosti (v jednotkách nanometrů) a velké ploše, tedy vysoké polarizovatelnosti, dispergovaných částic. [8,9]

Jak je uvedeno na *obr. 2*, u negativního efektu se současně se zvyšováním intenzity vnějšího elektrického pole hodnoty viskozity, smykového napětí a viskoelastických modulů snižují. Částice jsou buď nabíjeny nejednotně, tzn., že některé částice jsou nabíjeny negativně a některé pozitivně, nebo jednotně. V elektrickém poli se částice přemísťují směrem k oběma elektrodám. Tento jev, kterému se také říká elektroforéza, vede k fázovému oddělení v systému. Na rozdíl od pozitivního efektu, kdy je mezi elektrodami vybudována řetízovitá až sloupcová struktura, v případě negativního efektu se nabitě částice koncentrují na elektrodách, což způsobuje pokles reologických vlastností. [10]



Obr. 2: Schématické znázornění negativního ER efektu [4]

2.2 Elektromagnetoreologický efekt

Elektroreologický efekt znamená, že systém mění své vlastnosti v elektrickém poli. Magnetoreologický efekt znamená, že systém je schopen reagovat na vnější magnetické pole. Kombinace obou efektů se označuje jako elektromagnetoreologický efekt. Systémy mohou reagovat na vnější elektrické nebo magnetické pole samostatně nebo současně. Takové materiály vykazují chování se synergickým účinkem. Směr aplikovaného elektrického pole může být rovnoběžný nebo kolmý k poli magnetickému. Elektromagnetoreologický efekt je silnější než samotný ER či MR efekt.

2.3 Fotoelektroreologický efekt

Fotoelektroreologický efekt je zvláštní typ ER efektu. U tohoto efektu je důležitý obsah vody na povrchu částic. Lze jej snadno upravit množstvím vody v systému. Tento jev se vyskytuje u fotoaktivních suspenzí částic. [1]

3 ELEKTROREOLOGICKÉ MATERIÁLY

3.1 Dispergovaná fáze

Dispergovaná fáze je většinou prezentována pevnými částicemi. [4] Tyto částice by měly vykazovat následující vlastnosti:

1. Velikost částic by měla být v rozmezí 0,1 – 100 μm ,
2. Částice vytvářející aglomeráty by měly být schopny jejich snadné destrukce např. promícháním,
3. Částice by měly vykazovat minimální sedimentaci v systémech,
4. Částice by měly vykazovat velkou polarizaci při aplikovaném vnějším elektrickém poli, což vede k silným mezičásticovým silám a vysoké viskozitě vyvolané polem.

Velikost částic je významný faktor ovlivňující vlastnosti ER efektu. Příliš malé částice vykazují výrazný Brownův pohyb, který ničí generované řetízkovité struktury. S rostoucí velikostí částic se naopak sedimentace zrychluje, což negativně ovlivňuje tvořící se řetízkovité struktury mezi elektrodami. [16] Příliš velké částice tedy způsobují také oslabení ER efektu.

Částice by měly být schopny své polarizace v elektrickém poli. Polarizace znamená, že se na původně elektricky neutrálních částicích vytvoří náboj. Tyto polarizované částice vytváří dipóly na svém povrchu a reagují s vnějším elektrickým polem pohybem podle změn směru elektrického pole. [15]

3.1.1 Anorganické materiály

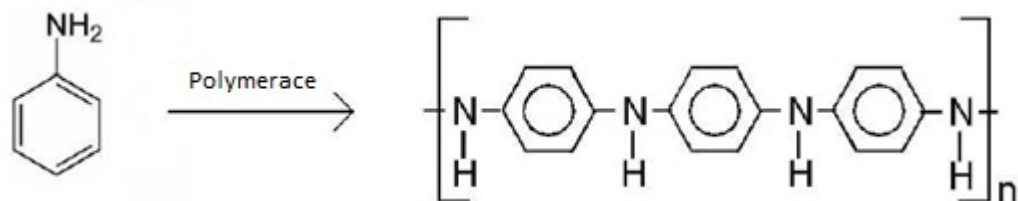
V ER systémech jsou většinou využívány anorganické částice jako TiO_2 , BaTiO_3 , zeolity apod., které vykazují dobré ER chování, a to vzhledem k malému množství absorbované vlhkosti, která se objevuje na povrchu částic. Negativní vlastností těchto částic je zvýšená sedimentace, kdy v důsledku tohoto je systém nestabilní. Další nevýhodou je jejich abrazi-vita v ER zařízeních. Také při vyšší teplotě je ER efekt nižší v porovnání s dále diskutovanými materiály, a to z důvodu vypařování absorbované vody. [4]

3.1.2 Organické materiály

V ER systémech byly rovněž testovány organické materiály, jako je bramborový škrob, celulóza a její deriváty. [17,18,19,20] Ve srovnání s anorganickými materiály vykazují nižší hustotu a abrazivitu. Obvykle však absorbují velkou část vody, v důsledku čehož jsou jejich vlastnosti teplotně nestabilní.

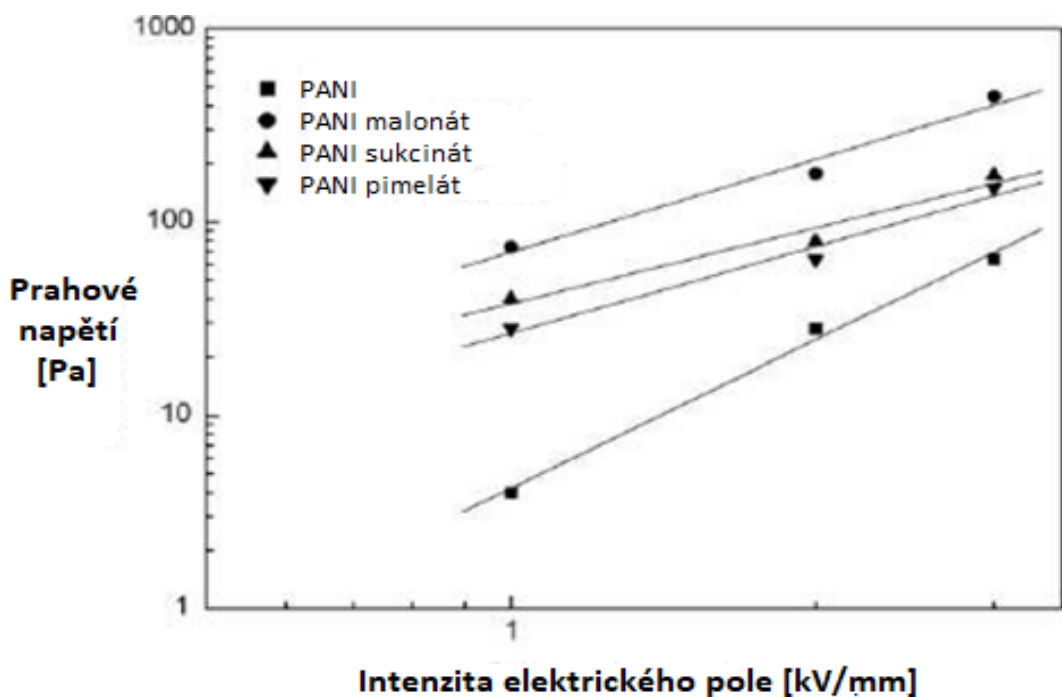
3.1.3 Vodivé polymery

V ER systémech se dále často používají vodivé polymery, jako je polyanilín (PANI) nebo polypyrol (PPY). [15, 21] Polyanilín má lepší tepelnou stabilitu a nižší hustotu než ostatní ER materiály. Dále PANI snižuje problém se sedimentací a navíc se tento vodivý polymer snadno syntetizuje oxidativní polymerizací, jak ukazuje *obr. 3*. [22]



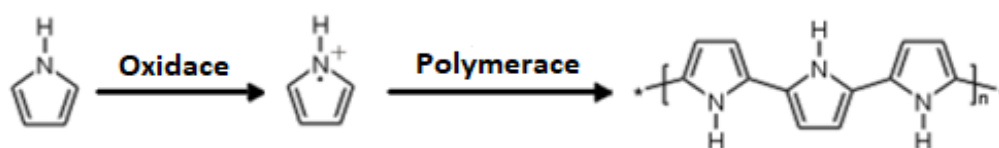
Obr. 3: Molekulární struktura PANI [4]

Vodivost PANI pro přípravu vhodných ER systémů lze upravit použitím různých kyselin. Intenzita ER efektu se pak výrazně mění v závislosti na kyselosti roztoku, viz *obr. 4*. [23]



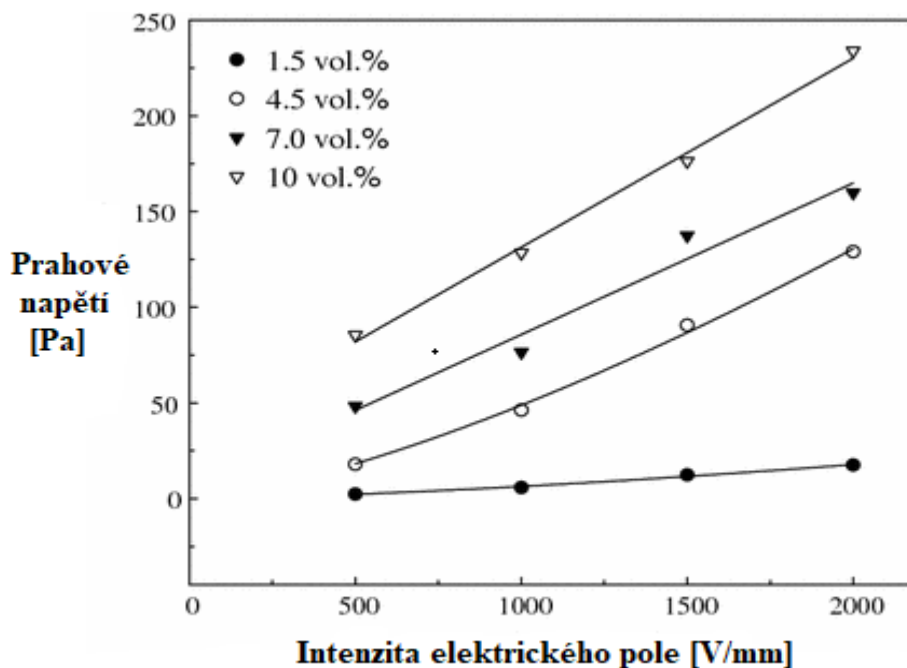
Obr. 4: Závislost prahového napětí a intenzity elektrického pole pro různě protonovaný PANI [23]

Dalším často používaným vodivým polymerem je PPY. Vědci Angeli a Alessandri v roce 1916 objevili možnost polymerizaci pyrolu v kyselé atmosféře pomocí H_2O_2 . Vlastnosti PPY závisí na způsobu výroby a stavu, ve kterém se polymer nachází. V oxidovaném stavu má PPY kovový charakter a chová se jako vodič. V neutrálním stavu se chová jako polovodič. Ve srovnání s mnoha jinými polovodičovými polymery vykazuje dostatečnou vodivost, odpovídající hustotu a stabilitu v prostředí. Vhodná vodivost zajišťuje dobrý ER efekt a může být případně upravena podmínkami při polymerizaci nebo alkalizaci. Polypyrol lze snadno připravit pomocí oxidativní polymerizace, jak je vidět na *obr. 5* [24]



Obr. 5: Polymerizace PPY [4]

Často se PPY používá u ER systémů z důvodu zesíleného ER efektu. Na *obr. 6* je vidět, že při použití vyšší koncentrace PPY v suspenzi se zvyšují ER vlastnosti. [25] Tento polymer se dále využívá v korozivzdorných kompozitních částicích typu jádro-obal jako materiál povrchové vrstvy, kdy zároveň zlepšuje ER vlastnosti.



Obr. 6: Závislost prahového napětí a intenzity elektrického pole při různé koncentraci PPY [26]

3.1.4 Kompozitní částice jádro – obal

Částice typu jádro-obal představují novou skupinu progresivních materiálů používaných pro ER systémy. Tyto částice jsou vytvořeny z tvrdého jádra a měkké skořepiny. Jako jádro se obvykle používá BaTiO (C₂O₄)₂, víceštěnové uhlíkové nanotrubičky (MWCNT), titanové nanotrubičky, křemičitany, atd. [8] Jako materiál skořepin lze použít jak polymery, tak také anorganické materiály. Obvykle se používají vodivé polymery. [29,30,21,27,28] Dochází zde k synergickému ER efektu jednotlivých komponent kompozitních částic. [31] Elektroreologické vlastnosti se zde tedy zlepšují v porovnání s jednotlivými částmi v ER systémech. [4,28] Tento typ částic přilákal řadu vědců studujících problematiku ER systémů a výsledky ukazují jejich velký potenciál při navrhování ER systémů s vysokou účinností. [33, 34]

3.2 Disperzní fáze

Jako disperzní fáze se většinou používají nevodivé kapaliny. Testována byla i voda, ale ukázalo se, že je tu mnoho nevýhod (např. koroze a nízký rozsah využití v důsledku nízké tepelné stability). Proto se v současnosti používají systémy bez vody, jako jsou minerální nebo rostlinné oleje. [4]

Také disperzní fáze musí dosáhnout některých důležitých vlastností:

1. Vysoký bod varu a nesmí se v pracovním rozsahu teplot snadno odpařovat,
2. Nízkou viskozitu pro udržení viskozity na nízké úrovni celého systému při nulovém elektrickém poli,
3. Vysokou odolnost a vysokou tzv. elektrickou pevnost,
4. Vhodnou hustotu,
5. Vysokou chemickou stabilitu,
6. Nesmí absorbovat příliš vlhkosti z okolí,
7. Nízkou toxicitu a nízké náklady na přípravu. [35]

Disperzní fáze má výrazný vliv na ER efekt. Kromě vhodné hustoty a viskozity je důležité zajistit optimální dielektrický poměr v porovnání s dispergovanými částicemi. Vysoká dielektrická složka disperzní fáze činí ER efekt slabší. [36]

Další výzkum např. ukazuje, že vzájemné působení mezi silikonovým olejem a pevnými nanočásticemi má významný vliv na ER efekt. Výsledky naznačují, že vodíkové vazby jsou podřízeny propojení silikonového oleje s pevnými ER částicemi. [37]

4 JÍLOVÉ MINERÁLY

4.1 Charakteristika jílových minerálů

K jílovým minerálům se řadí zejména planární a neplanární fylosifikáty, ale i další minerály jako např. skupiny alofánu, některé hydroxidy a oxidy. [52]

Jílové minerály jsou v přírodě takřka všudypřítomné a vznikají v průběhu půdotvorného procesu zvětráváním primárních minerálů. Mají obrovský praktický význam v nejrozmanitějších průmyslových odvětvích (papírenský, stavební, keramický, farmaceutický, kosmetický, potravinářský průmysl) a také jako filtry, izolace, katalyzátory, léčiva, nové prvky pro optoelektroniku, nové konstrukční materiály. [54]

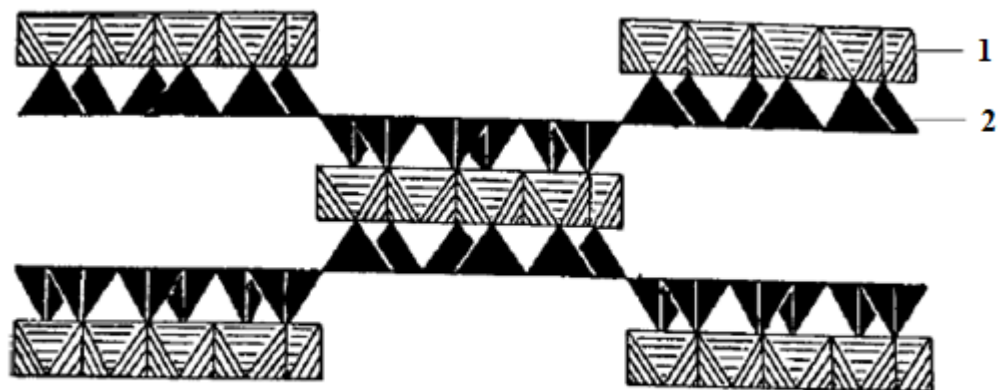
Z technologického hlediska jsou za jílové minerály považovány takové, jejichž částice jsou menší než 2 μm . [54] Díky malým rozměrům jílovitých částic a jejich vrstevnaté struktúře získávají jílové minerály celou řadu unikátních vlastností, např. schopnost vázat vodu, schopnost sorpce a iontové výměny, reakce s organickými látkami. Další důležitou vlastností je jejich ekologická nezávadnost a nulová toxicita. Jílové minerály mají i nízkou cenu ve srovnání s cenou jiných látek obdobných vlastností. K určení a charakterizaci jílových minerálů se využívá rentgenová prášková difrakce, transmisní a skenovací elektronový mikroskop a infračervená spektroskopie. [54]

Jíl je přírodní jemnozrný materiál tvořený především fylosifikáty, jejichž uspořádání je rovněž ve vrstevnaté struktúře. Dále mohou obsahovat i jiné minerály nebo organickou hmotu, která ovlivňuje plasticitu a tvrdnutí materiálu po vysušení. Příkladem takových minerálů mohou být minerály skupiny živce, zeolitu, alofánu, karbonátu nebo oxidy železa a hliníku. Na rozdíl od jílových minerálů, v jílech můžeme nalézt více skupin minerálů, které se dají systematicky zařadit do mineralogie. [52]

Nejvíce využívanými jílovými minerály v elektroeologických suspenzích jsou montmorillonit, laponit a sepiolit.

4.2 Sepiolit

Sepiolit je s ohledem na svoji strukturu řazen mezi tzv. neplanární 2:1 fylosifikáty s nespojitou oktaedrickou sítí. Ta je periodicky přerušována a tetraedrické sítě se tomu to přerušování přizpůsobují *obr. 7*.



Obr. 7: Krystalová struktura sepiolitu. Oktaedrická síť (1),
tetraedrická síť (2) [52]

Sepiolit se vyskytuje v makroskopicky masivních agregátech, nebo jako tenké lístky či vlákna. Při mikroskopickém pozorování má zřetelně vláknitý charakter, přičemž vlákna mají značně proměnlivé rozměry. [53]

Je tuhý a nepoddajný. Na stupnici tvrdosti se pohybuje mezi 2 – 2,5. Jeho barva může být bílá, šedavá, nažloutlá, bývá zbarven i modrozeleně či červenavě a má matný lesk. [53]

Na území České republiky se vyskytuje v okolí obce Biskoupky a Hrubšice (Jihomoravský kraj). Další lokality jsou na Slovensku u obce Mútnik, Klenovec a Vehec, ostrově Samos (Řecko) a mnoha dalších místech po světě. [52]

5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ER EFEKT

Existují některé faktory, které mohou ER efekt negativně, nebo pozitivně ovlivnit. Nejdůležitějšími faktory jsou intenzita elektrického pole, frekvence elektrického pole, objemový zlomek částic a teplota.

5.1 Intenzita elektrického pole

Prahové napětí ER systémů velmi záleží na intenzitě elektrického pole. Pokud intenzita elektrického pole je menší než kritická, ER systémy nevykazují žádný ER efekt v elektrickém poli. Tato hodnota se charakterizuje vztahem:

$$E_c = \frac{\rho - c}{|\alpha|} \sqrt{\frac{8\pi k_B T}{(c\rho v \epsilon_m)}} \quad (1)$$

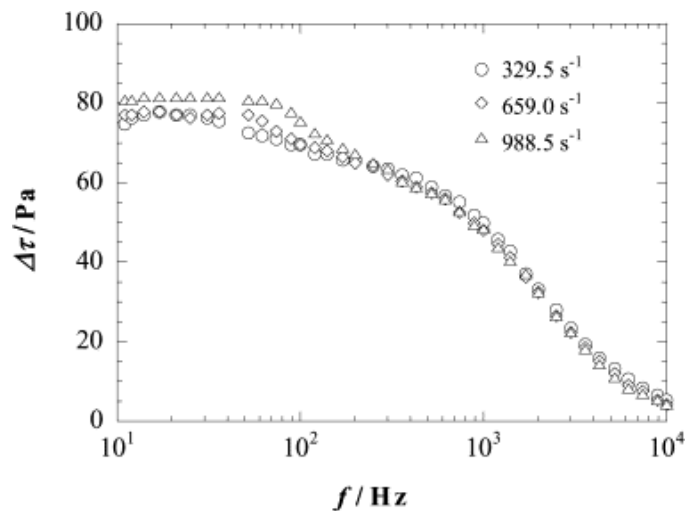
kde ρ je hustota částic, c je koncentrace částic [mol.l^{-1}], v je průměrná hodnota objemu částic, $k_B T$ je tepelná energie, ϵ_m je dielektrická konstanta tekutého média a α je konstanta která lze vyjádřit:

$$\alpha = \frac{g}{g + \epsilon_m / (\epsilon_p - \epsilon_m)} \quad (2)$$

kde ϵ_p je permitivita částic a g je číselná konstanta týkající se geometrie částic. Hodnota $g = \frac{1}{3}$ platí pro částice kulového tvaru, hodnoty $g > \frac{1}{3}$ mají částice tyčového tvaru a $g < \frac{1}{3}$ u částic diskových. [4]

5.2 Frekvence elektrického pole

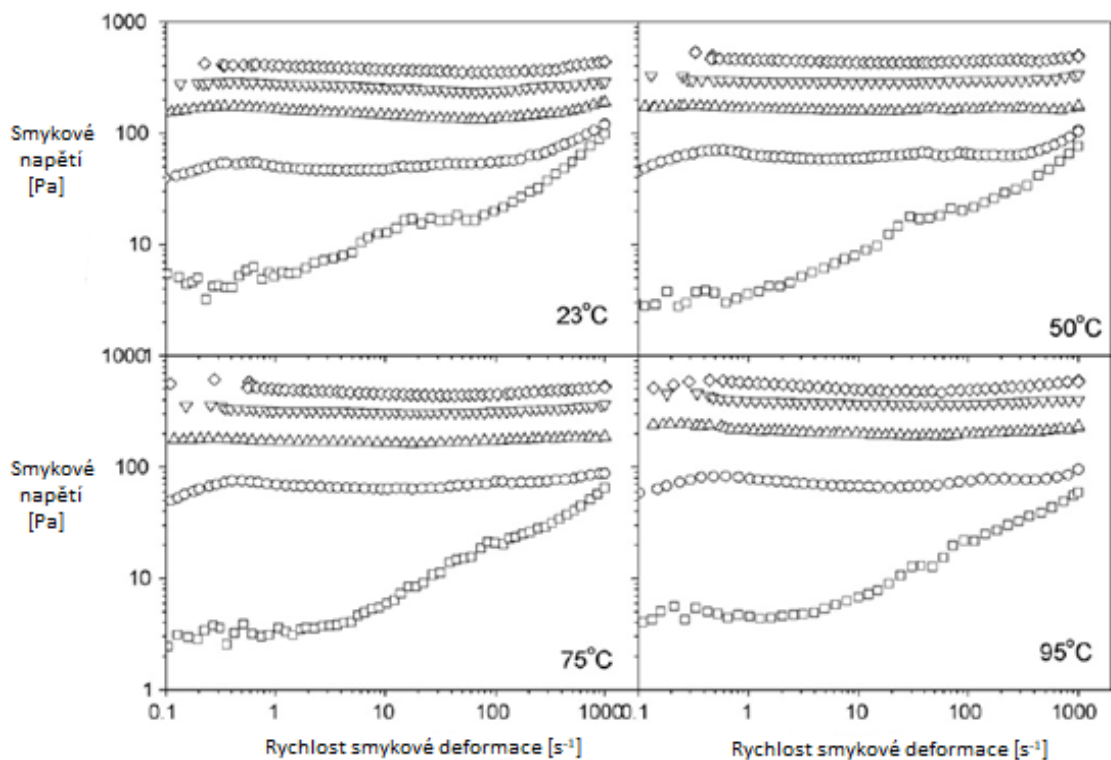
Frekvence elektrického pole hraje důležitou roli u ER efektu. Elektroeologické systémy se chovají jinak při nízkých a jinak při vysokých frekvencích (*obr. 8*). Při nízkých frekvencích se polarizované částice pohybují podle změn směru elektrického pole a seřazují se kolmo k elektrodám. Na druhou stranu při vysokých frekvencích nejsou schopny polarizované částice reagovat na elektrické pole. K polarizaci tedy může dojít pouze prostřednictvím molekulární orientace. [11]



Obr. 8: Závislost smykového napětí vs. frekvence elektrického pole [11]

5.3 Teplota

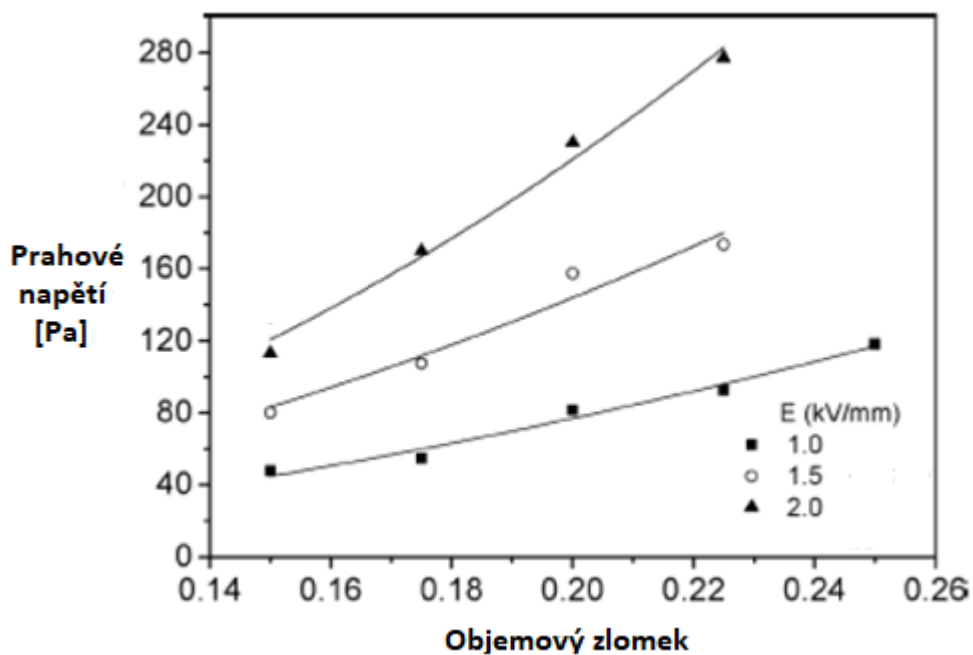
Existují dvě teorie, které popisují ER efekt závislosti na teplotě. Dle první teorie teplota mění polarizovatelnost ER systémů. Kvůli vyšší teplotě se mění dielektrické vlastnosti a vodivost částic. Druhá teorie spočívá v tom, že teplota ovlivňuje pohyb částic. Při vyšší teplotě je Brownův pohyb intenzivnější a částice nejsou schopny vytvořit fibrilované struktury uvnitř systému, a proto je ER efekt slabší. Na obr. 9 je vidět, že smykové napětí se zvyšuje s rostoucí teplotou. [4,12]



Obr. 9: Vztah mezi smykovým napětím a rychlostí smykové deformace pro ER systém na bázi TiO_2 tyčinek při různých teplotách v závislosti na intenzitě elektrického pole [13]

5.4 Objemový zlomek částic

Elektroreologický efekt dále závisí na koncentraci dispergované fáze. Jestliže objemový zlomek částic nepřesáhne kritickou hranici koncentrace, systém nemění své smykové napětí ani viskozitu za přítomnosti vnějšího elektrického pole. Nejvhodnější objemový zlomek částic pro ER efekt se nachází v rozmezí 15 až 40 obj.%. Pokud je objemový zlomek vysoký, vede to k nestabilitě kapaliny, nebo ke snížení ER efektu, jelikož objemový zlomek částic zvyšuje prahové napětí v neaktivovaném stavu, tj. bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Na obr. 10 je vidět, jak objemový zlomek ovlivňuje reologické vlastnosti ER systému. [13]



Obr. 10: Vztah prahového napětí na objemovém zlomku v závislosti na intenzitě elektrického pole pro systémy různých druhů PANI v silikonovém oleji [14]

6 ELEKTROREOLOGICKÉ VLASTNOSTI SYSTÉMŮ

Účinnost ER systémů, kromě intenzity elektrického pole a koncentrace částic, záleží především na polarizaci částic ve vztahu k dielektrickým vlastnostem, vodivosti částic a vlastnostem disperzního prostředí. [41]

6.1 Reologické vlastnosti

Mezi reologické vlastnosti, které jsou důležitou charakteristikou ER systémů, patří smykové napětí, prahové napětí, smyková viskozita a s těmito související rychlost smykové deformace. V případě ER systémů lze reologické vlastnosti měřit jak v přítomnosti vnějšího elektrického pole, tak i bez účinků tohoto pole, kdy se následně porovnávají získané výsledky. Hodnoty aplikované intenzity elektrického pole leží obvykle v intervalu 0,5 – 3 kV/mm. [5] Při absenci elektrického pole je patrné u systémů Newtonovské chování, kdy se s aplikovanou rychlostí smykové deformace lineárně zvyšuje smykové napětí. Tato situace je popsána následující rovnicí.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

kde τ je smykové napětí [Pa], η je smyková viskozita [Pa·s], $\dot{\gamma}$ je rychlost smykové deformace [s^{-1}].

Naopak při aplikaci elektrického pole se mění tokové chování ER systému, tj. η a τ nabývají hodnot až o několik řádů vyšších nežli je tomu v neaktivovaném stavu. Za těchto podmínek lze chování ER systému často popsat Binghamovou rovnicí. [37,35]

$$\tau = \eta_{pl}\dot{\gamma} + \tau_y \quad (4)$$

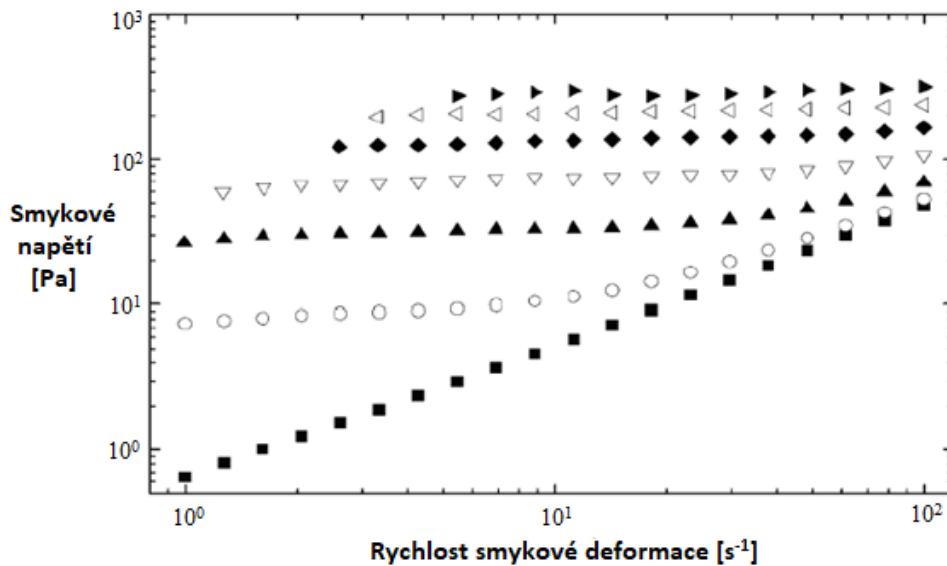
Nebo obecněji pak Herschel-Bulkleyho rovnicí:

$$\tau = \tau_y + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

kde η_{pl} je plastická viskozita [Pa·s], τ_y je prahové napětí [Pa] a n je parametr charakterizující pseudoplasticitu systému. [41,42]

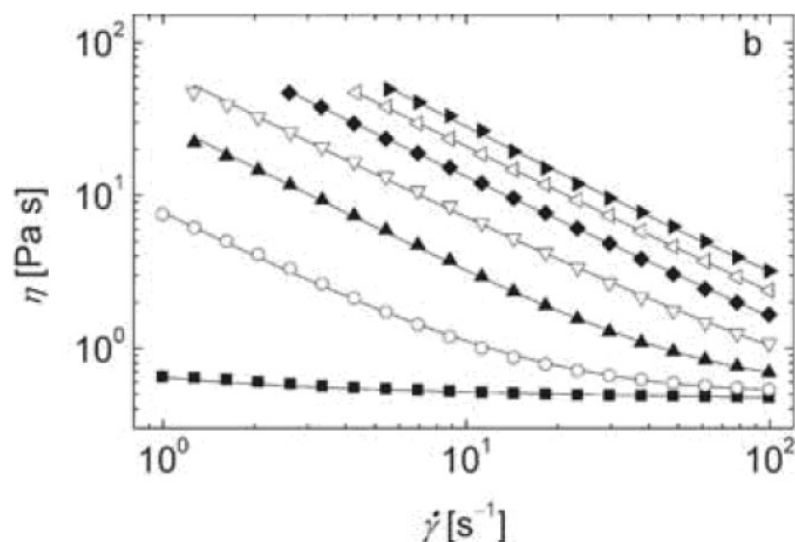
Na *obr. 11* je znázorněno smykové napětí jako funkce rychlosti smykové deformace pro typický ER systém. Při absenci elektrického pole se chová skoro jako Newtonská kapalina. Při aplikaci elektrického pole ER systém vykazuje Binghamské chování. Zvyšující se intenzita elektrického pole má za následek nárůst smykového napětí. Dále je možno sledovat

zvyšování prahového napětí se zvyšující se intenzitou elektrického pole, což je důsledek zintenzivněním přitažlivých sil mezi polarizovanými částicemi. [43]



Obr. 11: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro systém PANI částic při různých intenzitách elektrického pole [kV/mm]: (■) 0; (○) 0,5; (▲) 1; (▽) 1,5; (◆) 2; (◁) 2,5; (▶) 3.[43]

Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace je zobrazena na obr. 12. Na obrázku je vidět, že v prostoru nízkých rychlostí smykové deformace se viskozita zvyšuje více (o 2 až 3 řády) s rostoucí intenzitou elektrického pole. Se zvyšující se rychlostí smykové deformace dochází ke snižování viskozity téměř na hodnotu viskozity bez působení elektrického pole v důsledku nastávající dominance hydrodynamických sil v systému. [43]



Obr. 12: Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace pro systém PANI částic při různých intenzitách elektrického pole E [kV/mm]:(■) 0; (○) 0,5; (▲) 1; (▽) 1,5; (◆) 2; (△) 2,5; (▶) 3. [44]

Prahové napětí se mění s intenzitou elektrického pole dle rovnice:

$$\tau_y = q \cdot E^\alpha \quad (6)$$

kde E je intenzita elektrického pole (kV/mm), q je parametr úměrný tuhosti struktury vyvozené elektrickým polem a α je parametr, který charakterizuje odezvu v orientaci částic způsobenou elektrickým polem. [45]

6.2 Viskoelastické vlastnosti

Elektroreologické systémy se pod vlivem vnějších sil chovají zároveň jako pevné (Hookovské) látky i jako viskózní (Newtonovské) kapaliny, což se označuje jako viskoelastické chování a je možné ho charakterizovat dvěma zákony. Prvním je Hookeův zákon (idea mechanického modelu je pružina), který se zabývá elastickým chováním izotropních těles, za podmínky malých deformací. Rovnováha mezi napětím a deformací se při smyku charakterizuje vztahem:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (7)$$

Kde G je modul pružnosti [Pa], γ je smyková deformace [-].

Druhým je Newtonův zákon (idea mechanického modelu je píst), charakterizován rovnicí (3) a vyjadřuje chování kapalin při ustáleném toku, kdy smykové napětí je úměrné rychlosti smykové deformace s konstantou úměrnosti v podobě dynamické viskozity. [49,50]

Pro objasnění viskoelastického chování reálných kapalin je zapotřebí složitých modelů, které jsou obvykle složeny z velkého množství jednotlivých elementů Hookeova a Newtonova zákona.

U dynamického namáhání viskoelastické látky je deformace popsána vztahem:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (8)$$

Poté odpovídá systém uvedeným napětím:

$$\tau(t) = \tau_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (9)$$

kde τ_0 je amplituda napětí a δ je fázový posun

Poměrem amplitudy napětí a amplitudy deformace je charakterizován dynamický modul a jeho složky, tj.:

absolutní dynamický modul pružnosti ve smyku:

$$G_d = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (10)$$

Soufázový modul (složka modulu ve fázi, tj. reálná složka dynamického modulu)

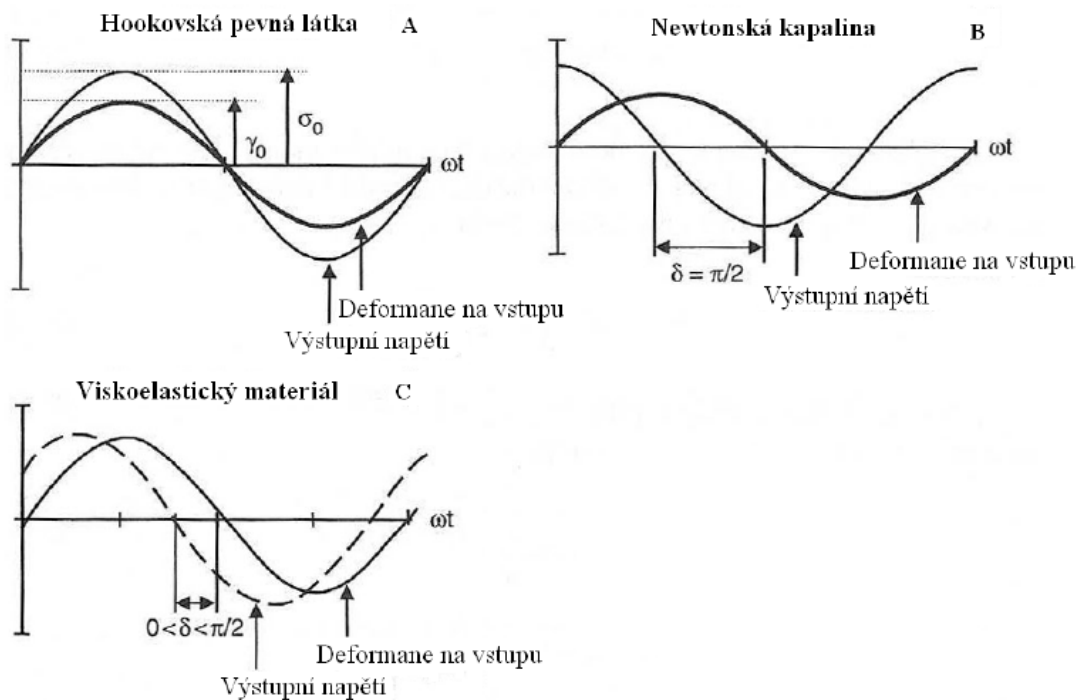
$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot \cos(\delta) \quad (11)$$

Ztrátový modul (složka modulu mimo fázi, imaginární složka dynamického modulu)

$$G'' = \frac{\tau_0'}{\gamma_0} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot \sin(\delta) \quad (12)$$

Ztrátový úhel:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (13)$$

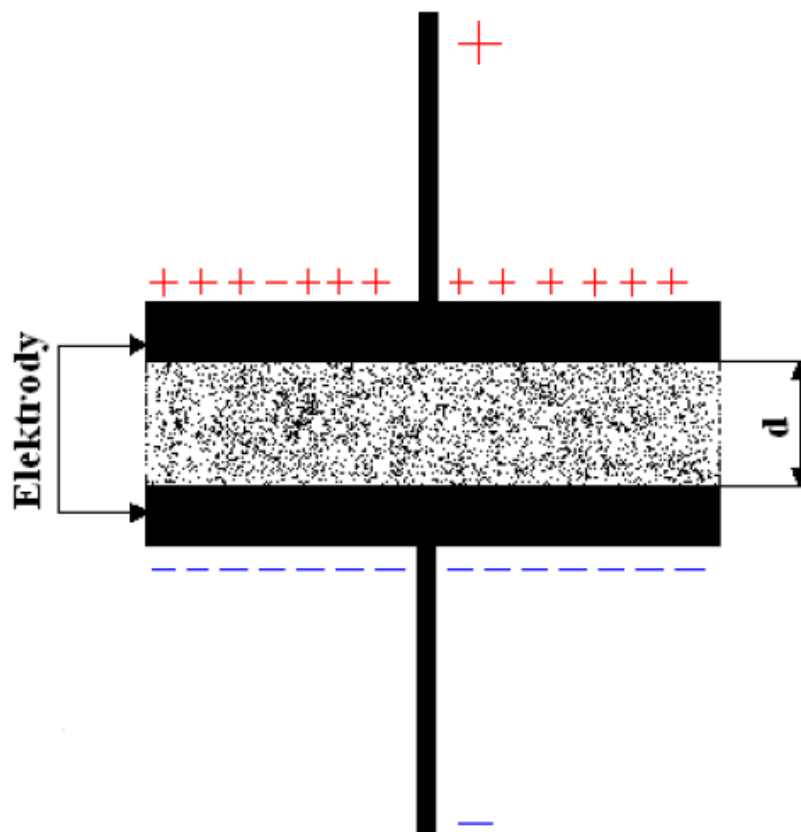


Obr. 13: Napěťová odezva na deformaci A – ideálně elastického materiálu, B – ideálně vis-kózního materiálu, C – viskoelastického materiálu, při dynamických experimentech

[51]

6.3 Dielektrické vlastnosti

Dielektrika (nevodiče) jsou speciální typy materiálů, které jsou schopny své polarizace, a tím přenášet elektrický náboj, v elektrickém poli. Je známo, že polymery jsou nevodiče. Jestliže jsou vystaveny elektrickému poli, polarizují se a jejich vodivost je velmi nízká. Na obr. 14 je znázornění dielektrika vloženého do elektrického pole.



Obr. 14: Znázornění dielektrika v elektrickém poli, d – tloušťka dielektrika [4]

Při působení vnějšího elektrického pole lze u dielektrika docílit porušení rovnováhy mezi náboji v něm. To se projeví tím, že některé části systému jsou nabitý kladně a jiné záporně a polarizovaná látka vypadá jako by měla elektrické póly. Tento jev se označuje jako polarizace dielektrika. [46]

Existují čtyři druhy polarizace:

1. Elektronová polarizace - vyznačuje se porušením elektronových obalů atomů posuvem elektronů vzhledem ke kladným jádrům. Z atomu se stane dipól,
2. Atomová polarizace - je vyvolána posunutím atomu v molekule,

3. Orientační (Debyeova) polarizace - jedná se o natočení pólu ve směru elektrického pole a je důležitá u polárních látek [4,47,48], často se uskutečňuje v kapalinách a v několika pevných látkách, protože, jak je známo, orientace dipólu je možná pouze tehdy není-li dipól v látce trvale upevněn, [48]
4. Mezifázová (Wagner-Maxwellova) polarizace - je velice významná pro ER systémy, vychází z různých vodivostí mezi fázovým rozhraním dispergované fáze a disperzního prostředí (nosič náboje může být zachycen na fázovém rozhraní, zformuje se prostorový náboj a vytváří se mezifázová polarizace). [4]

Ve skutečnosti se mechanismy prvních tří – elektronové, atomové a orientační polarizace uskutečňují v homogenní fázi, naopak mezifázová polarizace je otázkou heterogenních systémů. Elektronová a atomová polarizace se nachází ve vysoko-frekvenčním poli a jsou často označovány za rychlou polarizaci, v porovnání s nimi jsou Debyeova a mezifázová polarizace pokládány spíše za pomalejší děj. [48]

Nevodíče lze popsat veličinou ε_r - relativní permitivita

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (14)$$

kde: ε je dielektrická konstanta daného prostředí [$F \cdot m^{-1}$] a ε_0 je absolutní permitivita vakua [$8,85 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$]

Je známo, že komplexní relativní permitivita je složena z části reálné, ε_r' , a imaginární, ε_r'' (ztrátový faktor): [20]

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j \cdot \varepsilon_r'' \quad (15)$$

Dielektrický ztrátový úhel $\tan \delta$ je poměr mezi ztrátovým faktorem a relativní permitivitou. [7]

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (16)$$

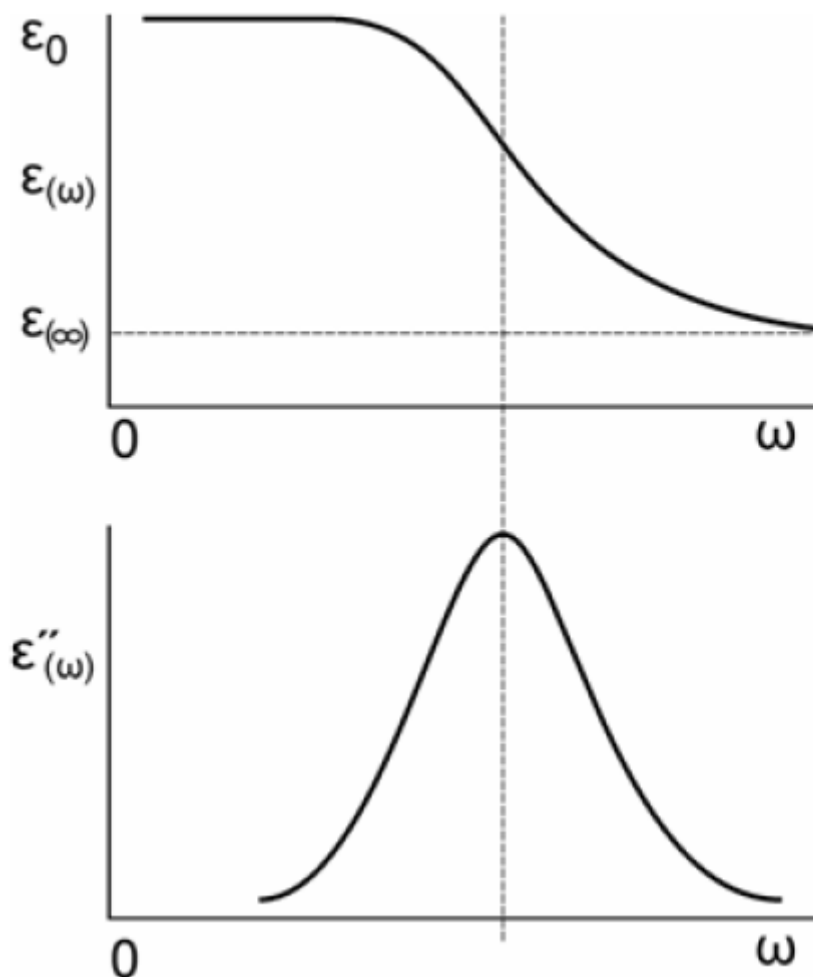
Polarizovatelnost dispergovaných částic v ER systému je poté možné stanovit měřením rozdílu mezi relativní permitivitou přibližující se nulové frekvenci, ε_0 , a relativní permitivitou blížíící se k nekonečnu ε_∞ : [7]

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty \quad (17)$$

Existuje i rovnice pro vypočítání relaxačního času:

$$t_{rel} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (18)$$

kde ω je úhlová frekvence [s^{-1}] a f je frekvence [Hz].



Obr. 15: Frekvenční závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na úhlové frekvenci [50]

7 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část této diplomové práce je rozdělena do několika kapitol. V první kapitole je věnována pozornost vlastnostem a charakteristice elektoreologického systému. Druhá kapitola je zaměřena na charakteristiku ER efektu a následně jsou popsány jednotlivé druhy ER efektu. Ve třetí kapitole jsou popsány látky využívající se pro výrobu ER materiálů. Čtvrtá kapitola je věnována charakteristice jílových minerálů a následně podrobněji popsán sepiolit.

V páté kapitole jsou vypsány jednotlivé faktory ovlivňující ER efekt. Jako je např. intenzita elektrického pole, frekvence elektrického pole, teplota a objemový zlomek částic. Poslední kapitola se věnuje elektoreologickým vlastnostem systému. Jsou zde vysvětleny reologické vlastnosti, viskoelastické vlastnosti a dielektrické vlastnosti.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍL PRÁCE

Cílem práce je připravit elektoreologický systém na bázi jílovitých částic sepiolitu v různých koncentracích se silným elektoreologickým efektem v kombinaci s prokázáním zvýšením sedimentace. Elektoreologické systémy budou připraveny v silikonovém oleji o koncentracích 5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.% částic sepiolitu.

Na připravených systémech budou realizována měření reologických, viskoelastických a dielektrických vlastností. U reologických vlastností se bude zjišťovat závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace při různé intenzitě elektrického pole 0 – 3 kV/mm. Dále bude srovnáváno prahové napětí s různou intenzitou elektrického pole pro jednotlivé systémy. U viskoelastických vlastností bude sledována změna soufázového a ztrátového modulu při intenzitě vnějšího elektrického pole 3 kV/mm u jednotlivých ER systémů. Dále bude vyhodnocována ER účinnost na deformaci pro jednotlivé ER systémy. U dielektrických vlastností bude zkoumáno, jak se u jednotlivých systémů mění reálná a imaginární část komplexní permitivity s frekvencí v závislosti na jejich koncentraci. Dále bude provedena analýza sedimentační stability.

Na závěr budou získané výsledky vyhodnoceny a diskutovány.

9 EXPERIMENT

9.1 Chemikálie

Jako disperzní podíl studovaných ER suspenzí byly použity částice sepiolitu (~13% Mg), vyrobené a zakoupené od společnosti SIGMA-ALDRICH (USA).

Jako disperzní prostředí byl dále použit silikonový olej Lukosiol M200, kdy se jedná o polydimetylsiloxianovou kapalinu s viskozitou $\eta = 194$ mPa·s při 25 °C. Tato kapalina byla dodána společností Lučební závody Kolín (Česká republika).

9.2 Přístroje a pomůcky

Pro vyhodnocení tvaru a velikosti částic sepiolitu byl využit skenovací elektronový mikroskop Nova NanoSEM 450 (FEI USA). Před dalším použitím byly částice sepiolitu vysušeny v horkovzdušné sušárně při 80 °C a tlaku 10 mbar pro odstranění absorbované vlhkosti, která by výrazně ovlivnila ER chování studovaných systémů. Po přípravě ER kapalin definovaných koncentracích byly vždy před jejich analýzou homogenizovány pomocí ultrazvukového homogenizátoru UP400S (Hielscher, Německo).

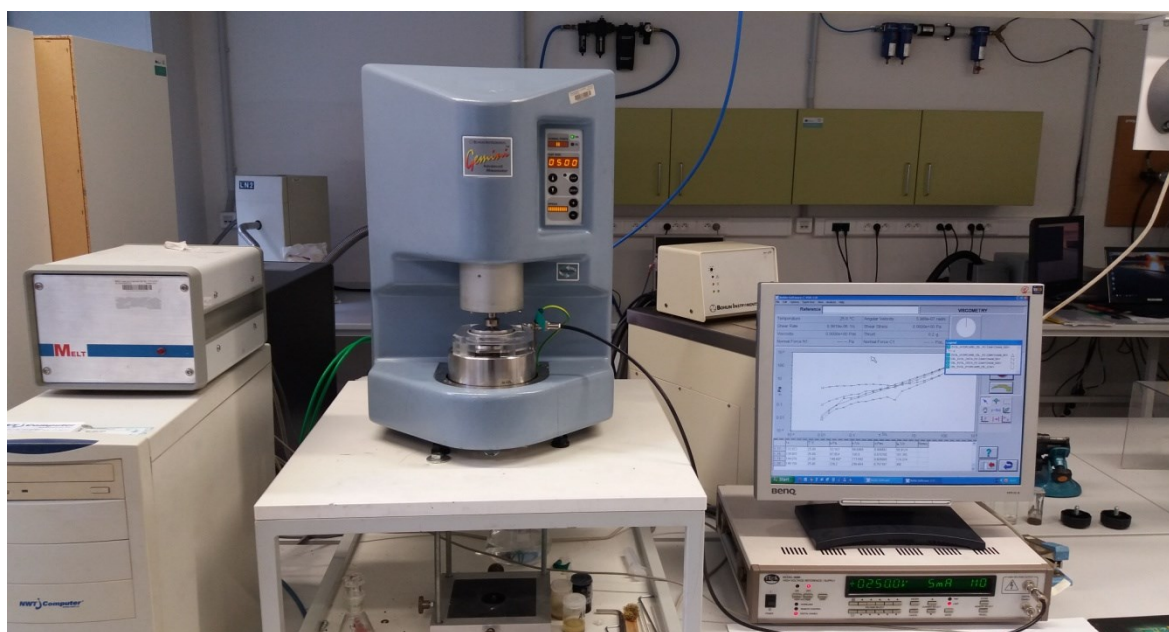
9.3 Postup přípravy ER systémů s částicemi sepiolitu

1. Částice sepiolitu byly sušeny při 80 °C a smíchány se silikonovým olejem v koncentraci 5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.% částic za účelem vytvoření ER systémů pro další analýzy.
2. Před každou analýzou byly takto připravené ER kapaliny míchány pomocí ultrazvukového homogenizátoru po dobu 30 s.
3. Před provedením každého měření byly ER kapaliny dále intenzivně míchány skleněnou tyčinkou po dobu přibližně 5 minut.
4. Sedimentační test spočíval ve vizuální sledování fázové separace ve skleněné trubici, kdy výsledky byly následně vyjádřeny jako sedimentační poměr x_0/x , kde x_0 a x představují původní výšku ER systému a výšku vyčerené části po definované době.

9.4 Reologická měření

Elektroreologické vlastnosti byly měřeny na rotačním reometru Bohlin Gemini (Malvern Instruments, UK) viz *obr. 16*, na geometrii deska-deska. Mezera mezi deskami byla 0,5 mm.

Měření bylo prováděno za přítomnosti vnějšího elektrického pole o síle 0,1, 2 a 3 kV/mm. K vytvoření vnějšího elektrického pole byl použit vysokonapěťový zdroj stejnosměrného proudu (TREK 668B, USA), viz *obr 17*. Elektroreologické vlastnosti připravených ER systémů byly měřeny v režimech řízené rychlosti smykové deformace (CSR) a řízeného smykového napětí (CSS). S výjimkou testů v nepřítomnosti vnějšího elektrického pole bylo elektrické pole aplikováno po dobu 1 minuty před každým měřením, aby byl poskytnut dostatečný čas pro organizaci vnitřních řetězovitých struktur uvnitř systému. Po každém měření v přítomnosti vnějšího elektrického pole byl systém smýkán po dobu 1 minuty při rychlosti smykové deformaci 20 s^{-1} , aby se zcela rozrušily případné zbytkové struktury. Pro analýzy v režimu CSS byla nejdříve získána hodnota smykového napětí v ustáleném stavu pro každý ER systém při konstantní rychlosti smykové deformaci 100 s^{-1} , která byla potom použita jako maximální hodnota smykového napětí při stanovení statického prahového napětí. Dále bylo vyhodnocováno viskoelastické chování zkoumaných ER systémů pomocí experimentů s dynamickou oscilací. Nejprve byl proveden test amplitudového kmitání při konstantní frekvenci 1 Hz, aby se stanovila lineární viskoelastická oblast (LVR). Poté byl proveden oscilační test ve frekvenčním rozsahu 0,1 – 10 Hz při deformaci 0,003 náležející právě do LVR.



Obr. 16: Reometr Bohlin Gemini



Obr. 17: Vysokonapětový zdroj stejnosměrného proudu

9.5 Měření dielektrických vlastností

Dielektrické vlastnosti připravených ER systémů byly měřeny na impedenčním dielektrickým spektroskopickém analyzátoru Novocontrol Concept 50 (Novocontrol, Německo) viz obr.18, ve frekvenčním rozsahu 0,01 Hz – 10 MHz. Dielektrická spektra byla následně pro získání relevantních parametrů vypovídajících o typu polarizace částic analyzována s využitím Havriliak-Negami modelu: [55]

$$\varepsilon^* = \varepsilon'_{\infty} + \frac{(\varepsilon'_0 - \varepsilon'_{\infty})}{(1 + (i\omega \cdot t_{rel})^a)^b} \quad (19)$$

kde ε^* je komplexní permitivita, $\Delta\varepsilon'$ je dielektrická relaxační síla, která je definována jako rozdíl mezi ε'_0 a ε'_{∞} , které představují permitivitu při nulové a nekonečné frekvenci; ω je úhlová frekvence ($2\pi f$), t_{rel} je relaxační čas a a a b jsou parametry tvaru, které popisují asymetrii studované dielektrické funkce.

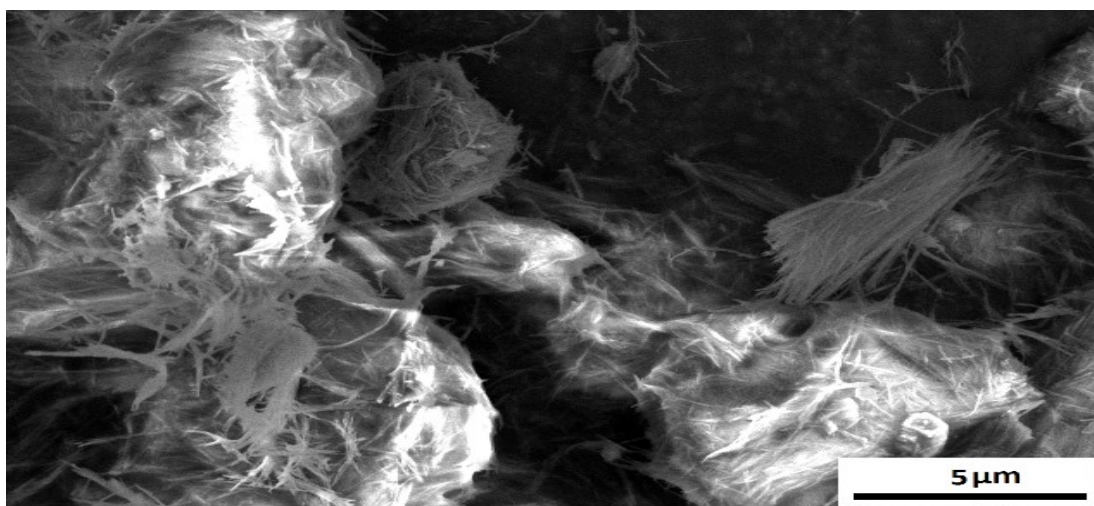


Obr. 18: Soustava pro měření dielektrických vlastností

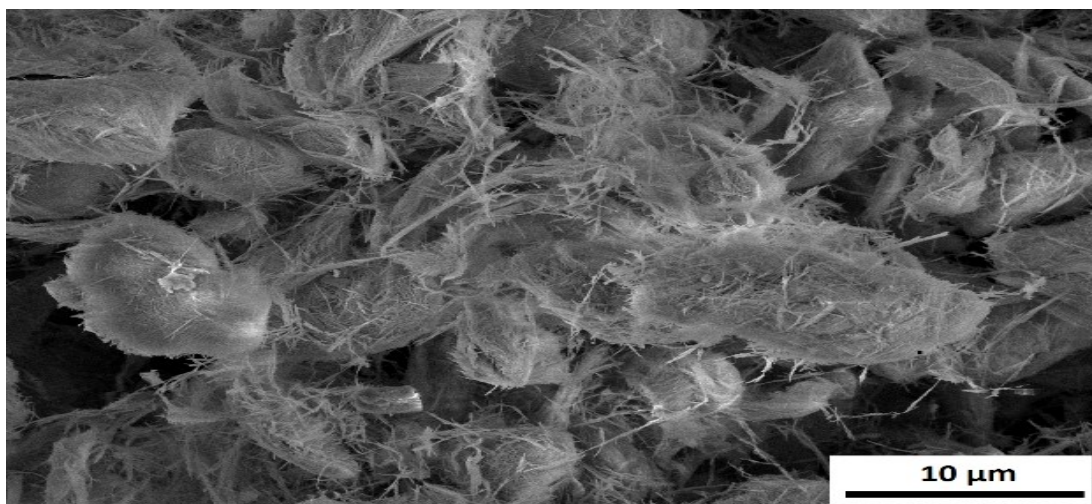
10 VÝSLEDKY A DISKUZE

10.1 Morfologie částic sepiolitu

Na *obr. 19* a *obr. 20* je vidět morfologii částic, kdy lze pozorovat, že studované částice sepiolitu vykazují vláknitou strukturu a vytváří shluky agregátů ve velikostech 10 – 35 μm , avšak tloušťka těchto vláken je v řádu nanometrů. Jelikož částice sepiolitu mají tendenci se shlukovat, což je dáno jejich velkým měrným povrchem, je před měřením nutné homogenizovat připravené ER kapaliny, aby se zajistila homogenita zkoumaných systémů. Vláknitá struktura je žádaná, protože předchozí výzkum ukázal, že ER systémy obsahující částice s vláknitou strukturou vykazují lepší ER chování, než ty s kulovými částicemi. [12,13]



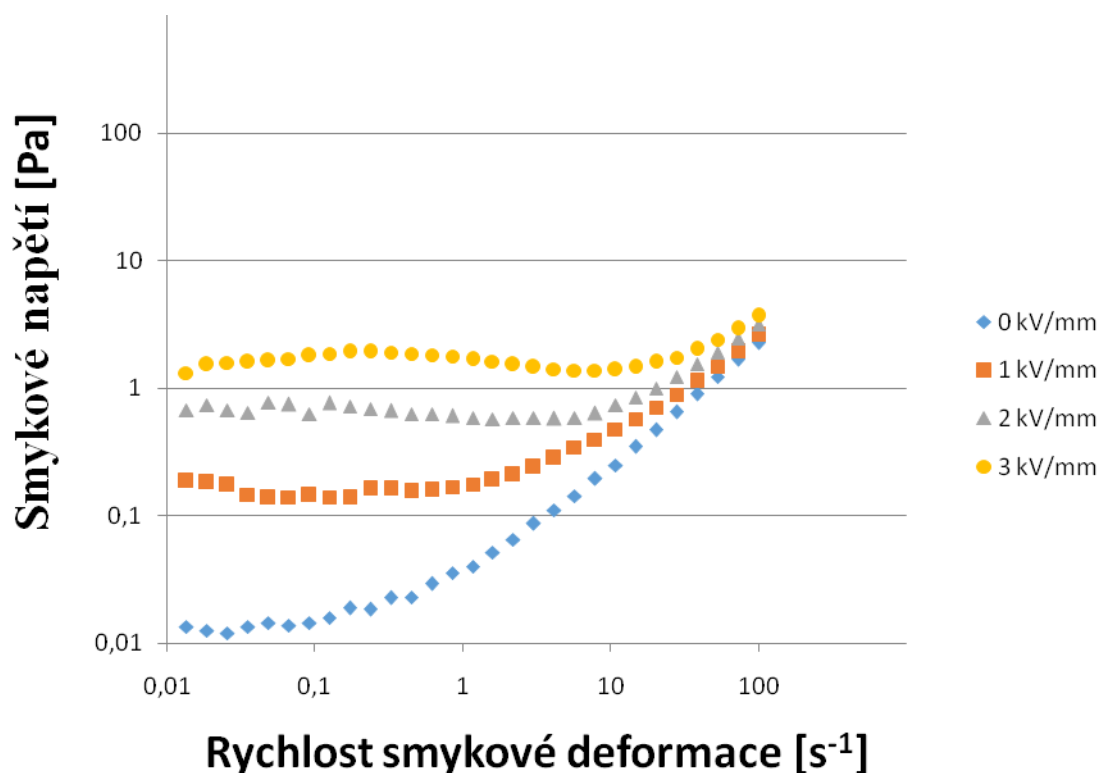
Obr. 19: SEM snímek částic sepiolitu při měřítku 5 μm



Obr. 20: SEM snímek částic sepiolitu při měřítku 10 μm

10.2 Měření elektoreologických vlastností

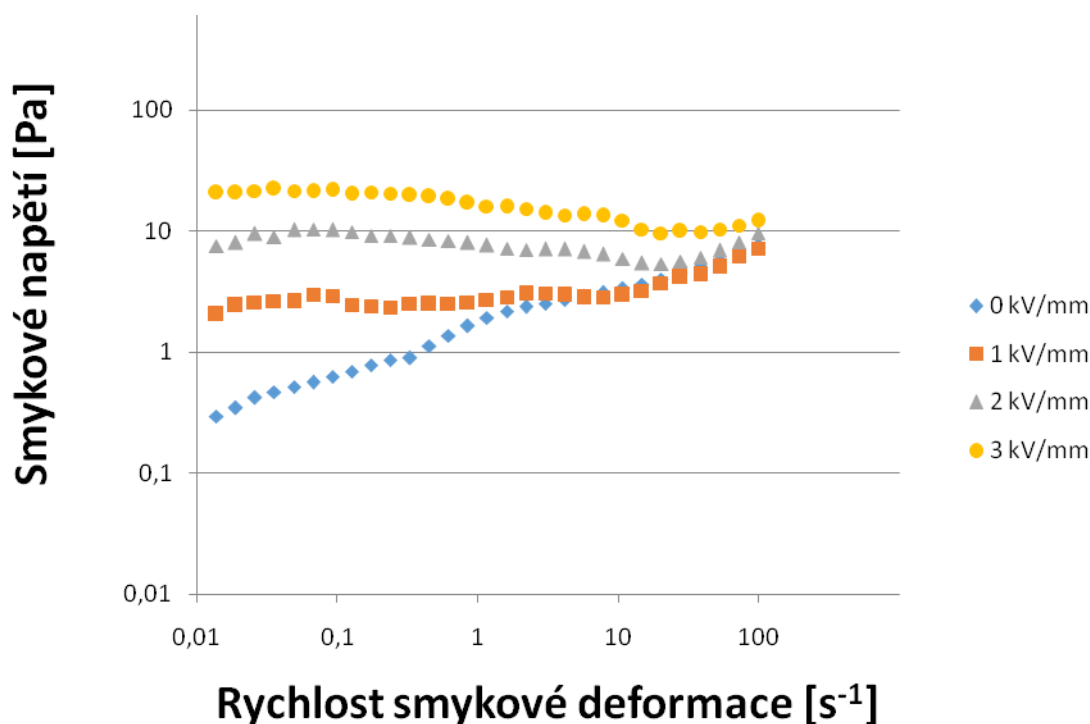
Na obr. 21, 22, 23 je vidět ER chování připravených ER systémů na bázi částic sepiolitu testovaných v režimu CSR. Již při absenci vnějšího elektrického pole systémy vykazovaly pseudoplastické chování, což lze vysvětlit tak, že částice sepiolitu vytvořily gelovou strukturu, která byla postupně narušována v důsledku zvyšujícího se smykového napětí (generované rychlosti smykové deformace), což vedlo ke snížení viskozity představujícímu pseudoplastické chování. I když je vysoká úroveň pseudoplasticity nežádoucí pro ER systémy v neaktivovaném stavu, tj. bez přítomnosti vnějšího elektrického pole (příznivější je Newtonské chování), vytvoření vnitřní gelové struktury může potlačit sedimentaci částic, což má za následek stabilní ER systémy. Stejný postup byl v poslední době úspěšně použit pro magnetoreologické systémy. [56] V této práci však sepiolit představoval aktivní dispergovanou fázi zodpovědnou zároveň za vytvoření struktur podobných řetězcům při aplikaci elektrického pole.



Obr. 21: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace po ER systémech obsahující 5 hm.% částic sepiolitu při různé intenzitě elektrického pole

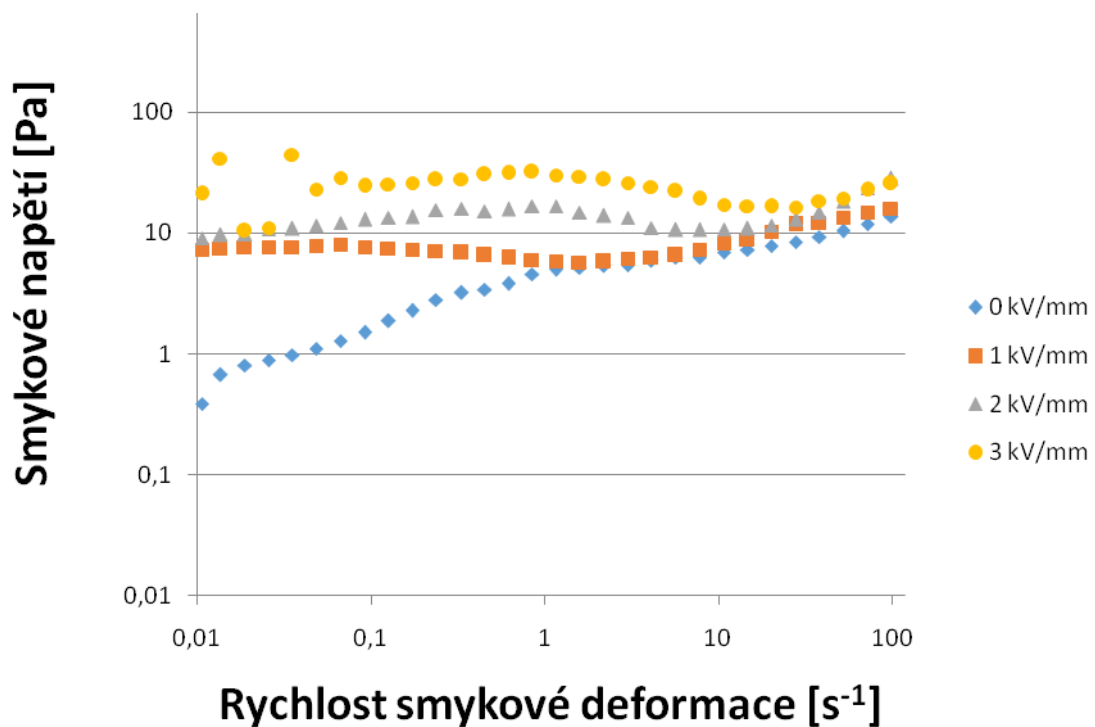
Po aplikaci elektrického pole stoupá smykové napětí (τ), a to v souladu se zvýšením intenzity elektrického pole. Jak je vidět na obr. 21, 22 a 23 elektrostatické síly převládají v ER systémech při nízkých rychlostech smykových deformací, reprezentovaných jako ustálený stav,

který postupně mizí při vyšších rychlostech deformací v důsledku destrukce vytvořené vnitřní struktury, když začnou převládat hydrostatické síly. Na *obr. 22* a *obr. 23* je vidět, že v elektrických polích s větší intenzitou (2 a 3 kV/mm) dochází k mírnému poklesu τ spolu s narůstající rychlostí smykové deformace a to v důsledku přeorientování vnitřní struktury v systému. [55] Z dalšího pozorování je potvrzen teoretický předpoklad, že ER účinnost je zvýšena při vyšší koncentraci dispergovaných částic v systému. Pozorované hodnoty τ pro ER systémy obsahující 10 resp. 15 hm.% částic sepiolitu byly o jeden řád vyšší, než hodnoty u ER systému obsahujícího 5 hm.% částic sepiolitu.



Obr. 22: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace po ER systému obsahující 10 hm.% částic sepiolitu při různé intenzitě elektrického pole

Hodnota τ je jednou z nejdůležitějších reologických vlastností ER systémů, konkrétněji její hodnota při nulové rychlosti smykové deformace, tj. hodnota prahového napětí τ_0 , kterou je možné stanovit např. v režimu ustáleného smykového toku pomocí CSS, kdy se, jak již bylo výše uvedeno, jedná o statické prahové napětí. V rámci vyhodnocení byla jako hodnota pro τ_0 v této práci považována poslední hodnota naměřená pro τ dříve, než došlo k několika řádovému nárůstu rychlosti smykové deformace, jakožto závisle proměnné. Jak je podrobně uvedeno v *tab. 1*, ER systémy na bázi částic sepiolitu vykazovaly určitou hodnotu τ_0 , a to jak v přítomnosti, tak při absenci vnějšího elektrického pole, která se výrazně zvyšovala



Obr. 23: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace po ER systémech obsahujících 15 hm.% částic sepiolitu při různé intenzitě elektrického pole

v souladu s rostoucí koncentrací dispergovaných částic v ER systému. V tab. 1 jde také vidět, že čím vyšší hodnota intenzity elektrického pole byla použita, tím vyšší bylo pozorováno τ_0 , a to z důvodu výraznější polarizace částic vyskytujících se v ER systémech. Jinými slovy lze říci, že po překročení hodnoty τ_0 systém začal vykazovat tokové chování, což bylo zapříčiněno porušením vnitřní struktury vlivem hydrodynamických sil. Nejvyšší hodnoty pro τ_0 , které byly pozorovány, byly dosaženy pro vzorek obsahující 15 hm.% částic sepiolitu, což

Tab. 1: Hodnoty smykového napětí pro jednotlivé koncentrace částic sepiolitu

Hodnota elektrického pole [kV/mm]	Statické prahové napětí τ_0 [Pa]		
	Koncentrace částic sepiolitu		
	5 hm.%	10 hm.%	15 hm.%
0	~1.0	~1.2	~37.0
1	~2.3	~4.3	~66.0
2	~7.8	~10.0	~66.6
3	~11.2	~21.5	~70.0

potvrzuje důkaz zvýšení účinnosti ER aktivity studovaných systémů s narůstající koncentrací dispergovaných částic, protože se vytvořily robustnější řetízkoité struktury. Při

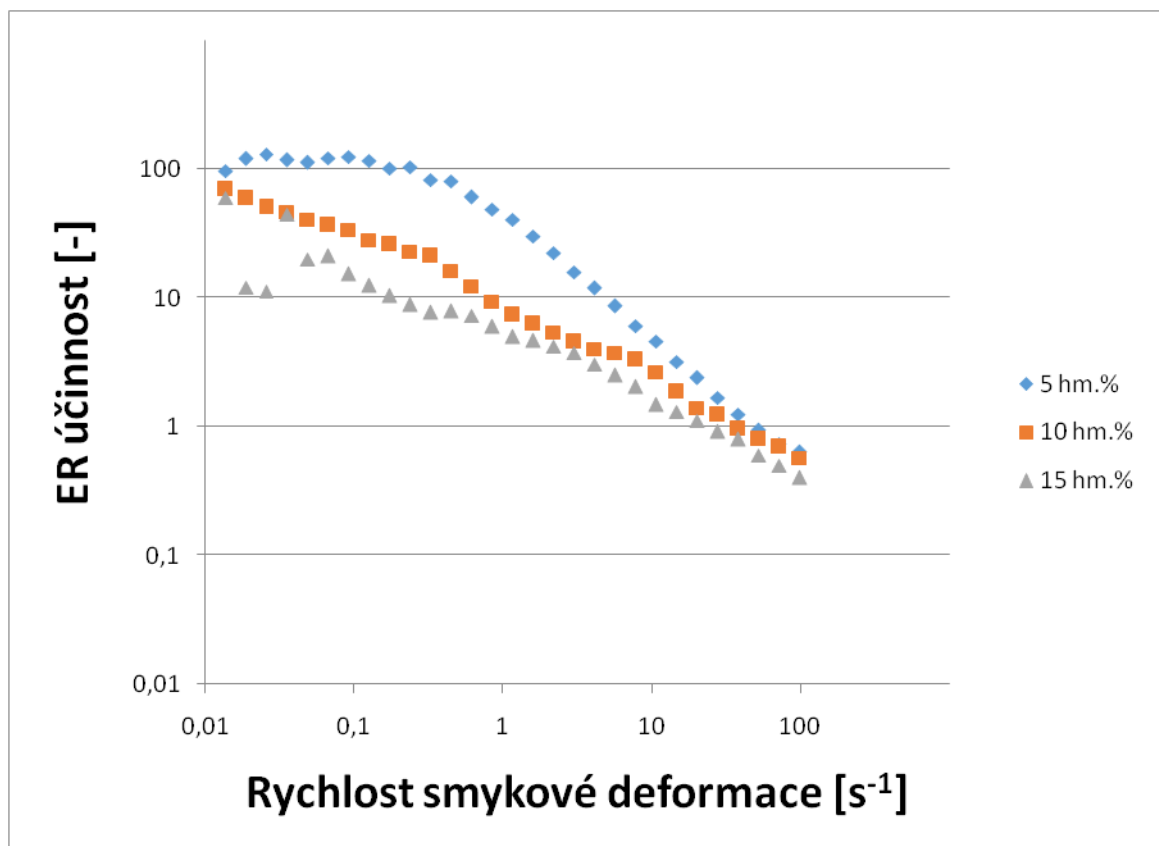
absenci vnějšího elektrického pole byla hodnota τ_0 pro ER systémy s 5 hm.% a 10 hm.% částic sepiolitu přibližně 1 Pa. Takové systémy mohou mít výrazně zvýšenou dlouhodobou stabilitu. Na rozdíl od ER systémů obsahující 15 hm.% částic sepiolitu navíc takové nízké hodnoty neovlivnily ER účinnost studovaných systémů.

Účinnost ER efektu (e) se často používá k zobrazení relativního zvýšení reologického parametru v důsledku chování vzorků spojeného s jejich ER aktivitou, tj. představuje rozdíl např. ve viskozitě systému při přítomnosti a absenci vnějšího elektrického pole. Z hlediska použitelnosti ER systému lze uvést, že čím vyšší je zvýšení viskozity systému po aplikaci elektrického pole, tím lepší je výsledek. Hodnotu pro e lze vypočítat pomocí rovnice:

$$e = \frac{(\eta_E - \eta_0)}{\eta_0} \quad (20)$$

kde η_E je viskozita v přítomnosti vnějšího elektrického pole a η_0 je viskozita bez přítomnosti tohoto pole. Na *obr. 24* je vidět závislost e na rychlosti smykové deformace pro všechny zkoumané ER systémy při intenzitě elektrického pole 3 kV/mm. Hodnoty pro e jsou podstatně vyšší při nízkých rychlostech smykových deformací, jelikož elektrostatické síly při těchto rychlostech smykových deformací převládají, nad hydrodynamickými vlivy. Elektroeologický systém obsahující 5 hm.% částic sepiolitu vykazoval nejvyšší hodnotu e , což je způsobeno jeho mnohem nižší viskozitou při absenci fyzikálního pole ve srovnání s ER systémem s vyššími koncentracemi dispergovaných částic sepiolitu. I když tedy ER systém s nejvyšší koncentrací částic vykazoval nejvyšší hodnoty viskozity při dané intenzitě elektrického pole, jeho vysoká viskozita způsobila při absenci takového pole, že jeho hodnoty e byly nižší než hodnoty pro výše uvedených 5 hm.% koncentrace částic sepiolitu. Zvyšování koncentrace částic tedy již dále nevede ke zvýšení e , a to kvůli vysokému zvýšení viskozity v nepřítomnosti elektrického pole. Proto je důležité vytvořit gelovou síť s velmi nízkou hodnotou τ_0 , která je však již schopna zajistit sedimentační stabilitu systému a zároveň v hodnotách e nedochází k výraznému poklesu.

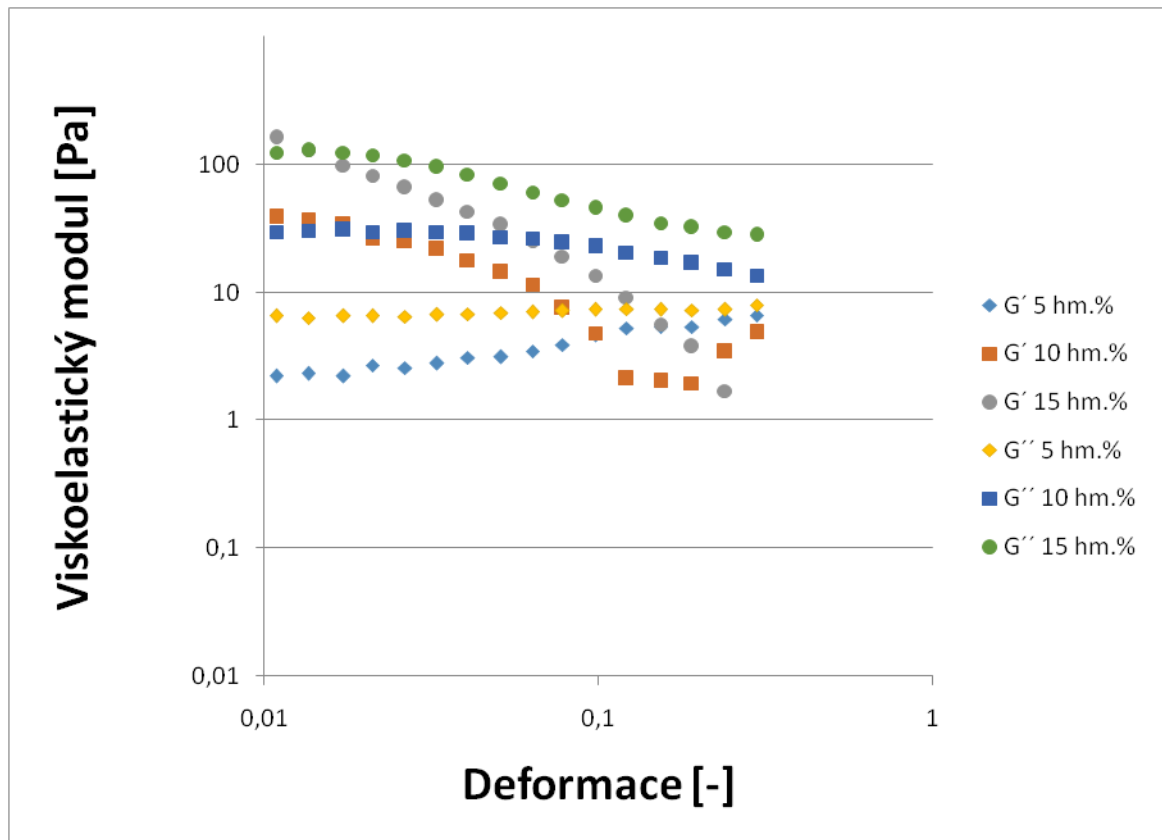
Z praktického hlediska je chování ER systému za podmínek oscilačního zatížení také nasmírně zajímavé, protože takové aplikace primárně vyžadují dynamické namáhání tekutin. Přejít z kapaliny do stavu podobného pevné látce zahájený působením vnějšího elektrického pole lze dobře popsat prostřednictvím viskoelastických modulů, např. soufázový modul (G'), který charakterizuje elastickou složku daného systému a modul ztrátový (G''), vymezující viskózní složku viskoelastického materiálu.



Obr. 24: Závislost ER účinnosti na rychlosti smykové deformace pro ER systémy s koncentrací částic sepiolitu (5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%) v přítomnosti elektrického pole o intenzitě 3 kV/mm

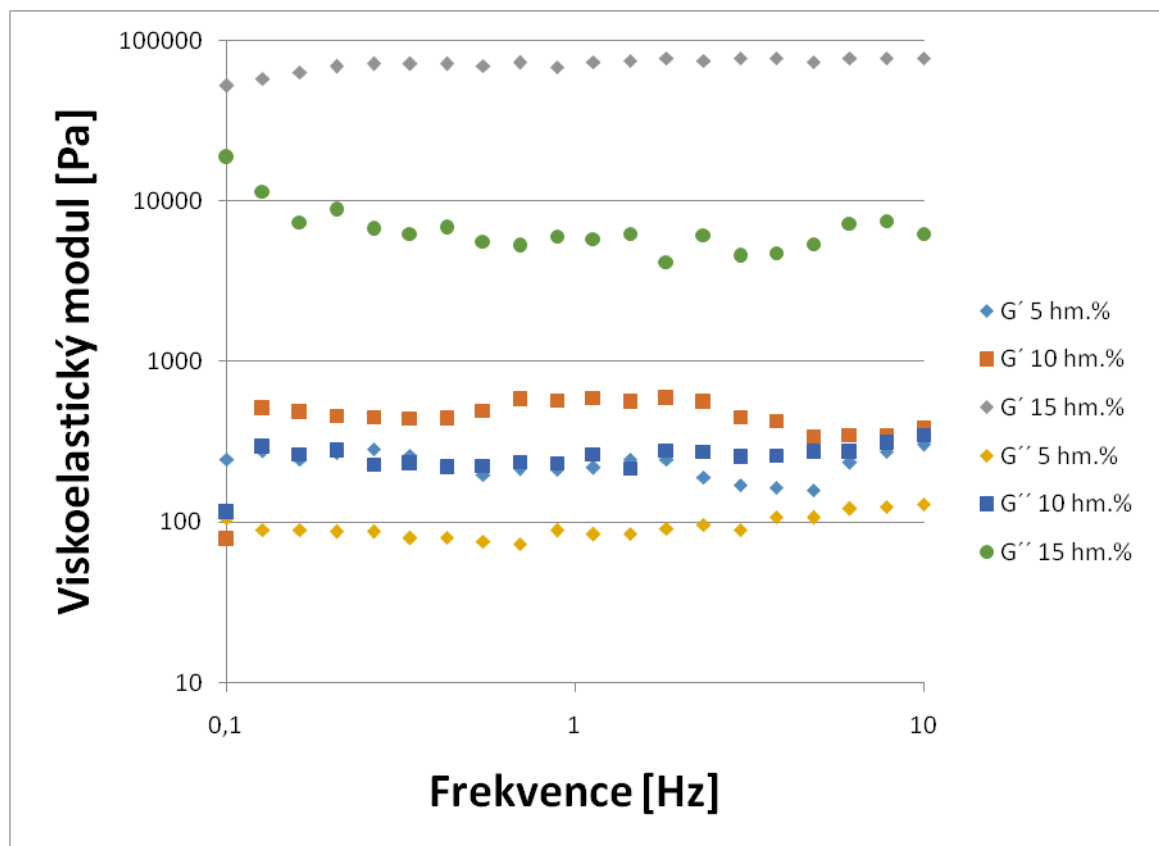
Obr. 25 zobrazuje závislosti G' a G'' na deformaci (γ) pro ER systémy při absenci vnějšího elektrického pole. Je zřejmé, že vzorek tvořený částicemi sepiolitu o koncentraci 5 hm.% vykazoval významně vyšší hodnoty pro G'' ve srovnání s G' , v důsledku čehož se při takové nízké koncentraci uvedený ER systém choval jako kapalina. Nicméně v systémech s vyššími koncentracemi částic sepiolitu byly hodnoty G' vyšší než G'' při velmi nízkých hodnotách γ odpovídajících klidovému stavu. Toto zjištění potvrdilo, že gelové struktury částic sepiolitu byly vytvořeny v silikonovém oleji, což vedlo k vývoji tuhých struktur, které ve výsledku navíc do značné míry zvýšily sedimentační stabilitu těchto ER systémů, jak bude diskutováno dále.

Jak bylo uvedeno výše, je důležité znát údaje o viskoelastických modulech a být si vědom jejich jakékoli závislosti na frekvenci, aby bylo možné porozumět chování ER systémů při dynamickém zatížení. Obr. 26 zobrazuje podrobně takovou závislost zkoumaných ER systémů pro G' a G'' v přítomnosti vnějšího elektrického pole o intenzitě 3 kV/mm.



Obr. 25: Závislost viskoelastického modulu G' a G'' na deformaci pro ER systém obsahující částice sepiolitu o různé koncentraci (5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%)

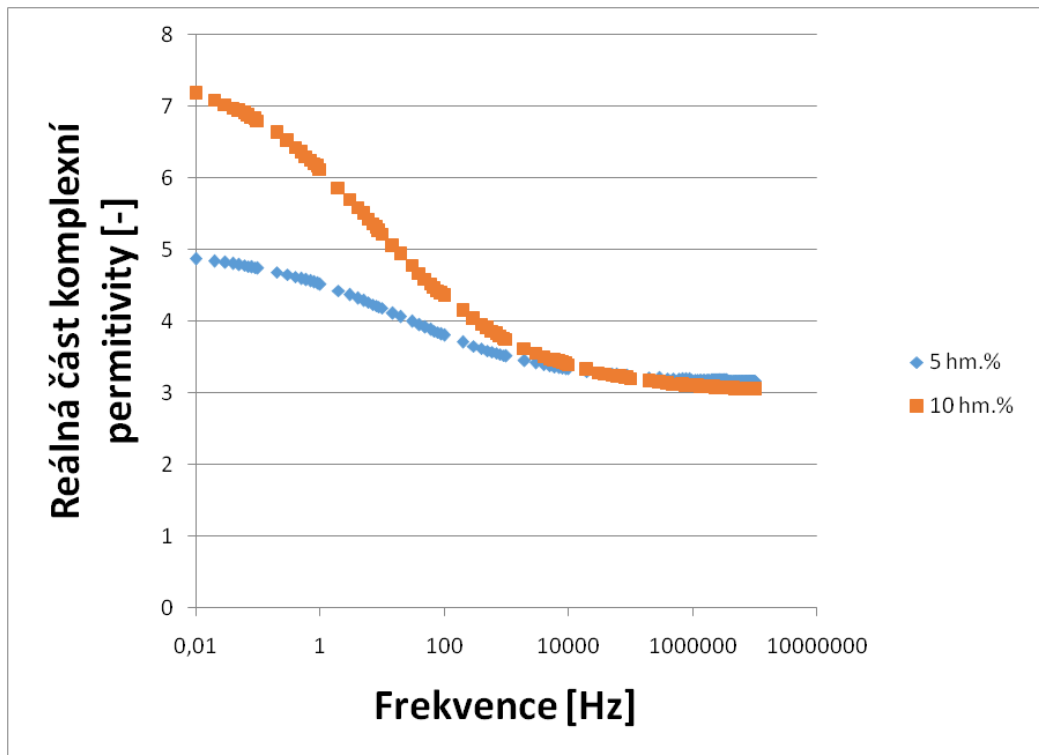
Je zřejmé, že G' převažoval nad G'' pro všechny tři koncentrace, což ukazuje nárůst hodnot viskoelastických modulů o několik řádů ve srovnání s ER systémy v nepřítomnosti elektrického pole (zejména vzorek ER systému obsahující 15 hm.% částic sepiolitu). Toto chování potvrzuje, že došlo k přechodu z kapalného do pevného stavu, který přetrvával v širokém rozsahu frekvencí.



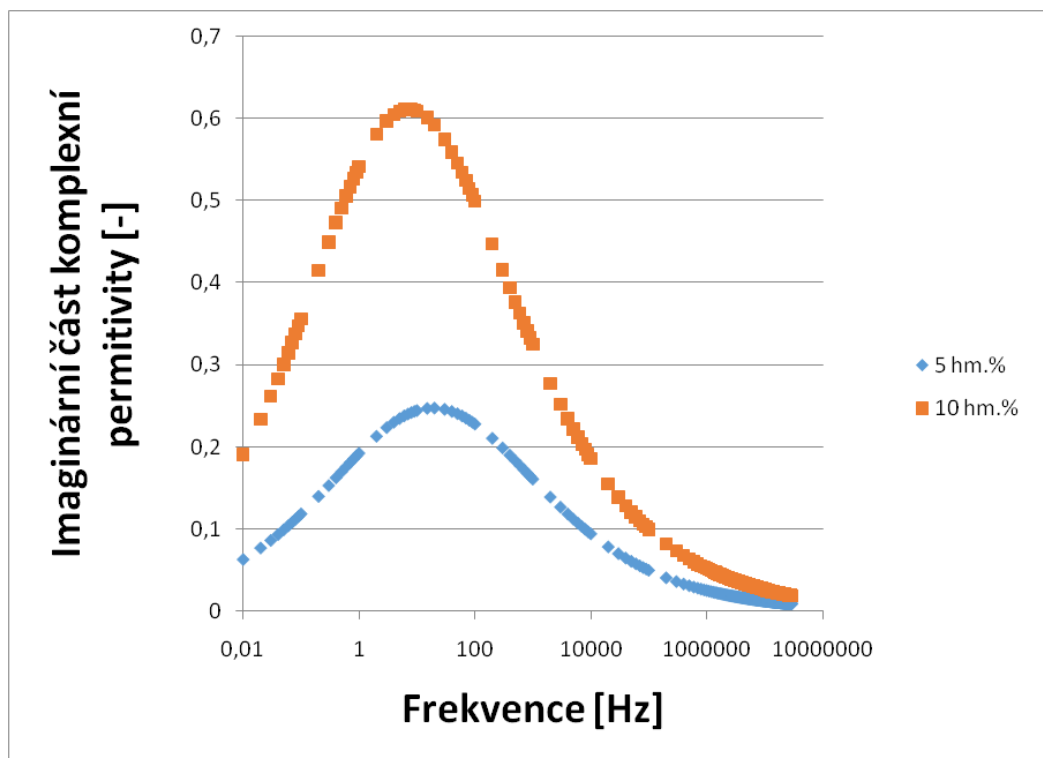
Obr. 26: Závislost viskoelastického modulu G' a G'' na frekvenci f pro ER systémy obsahující částice sepiolitu o různé koncentraci (5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%)

10.3 Měření dielektrických vlastností

Vzhledem k tomu, že mezifázová polarizace ER systému má stěžejní vliv na jeho ER účinnost, byla dále v této práci použita dielektrická spektroskopie jako doplňkový nástroj k doplnění výsledků získaných z reologických měření ER vzorků. Předpokládalo se, že t_{rel} (bod ve kterém ϵ'' dosáhne maximální hodnoty v závislosti na frekvenci) by měl ležet mezi 10^2 – 10^5 Hz a dielektrická relaxační síla by měla být vysoká, aby ER systém vykazoval výraznou ER aktivitu. Proto byly měřeny dielektrické vlastnosti ER systému obsahujícího 5 hm.% částic sepiolitu a to z důvodu, že tento systém vykazoval nejvyšší hodnoty e a ER systém s 10 hm.% částic sepiolitu pro účely srovnání. Rovnice (19) byla použita na analýzu naměřených dat k rozlišení uvedených dielektrických parametrů (viz tab. 2). Přítomnost relaxačních píků je jasně patrná na obr. 27 a obr. 28.



Obr. 27: Závislost reálné části komplexní permitivity ϵ' na frekvenci f pro ER systémy s koncentrací částic sepiolitu 5 hm.% a 10 hm.%.



Obr. 28: Závislost imaginární části permitivity ϵ'' na frekvenci f pro ER systémy s koncentrací částic sepiolitu 5 hm.% a 10 hm.%.

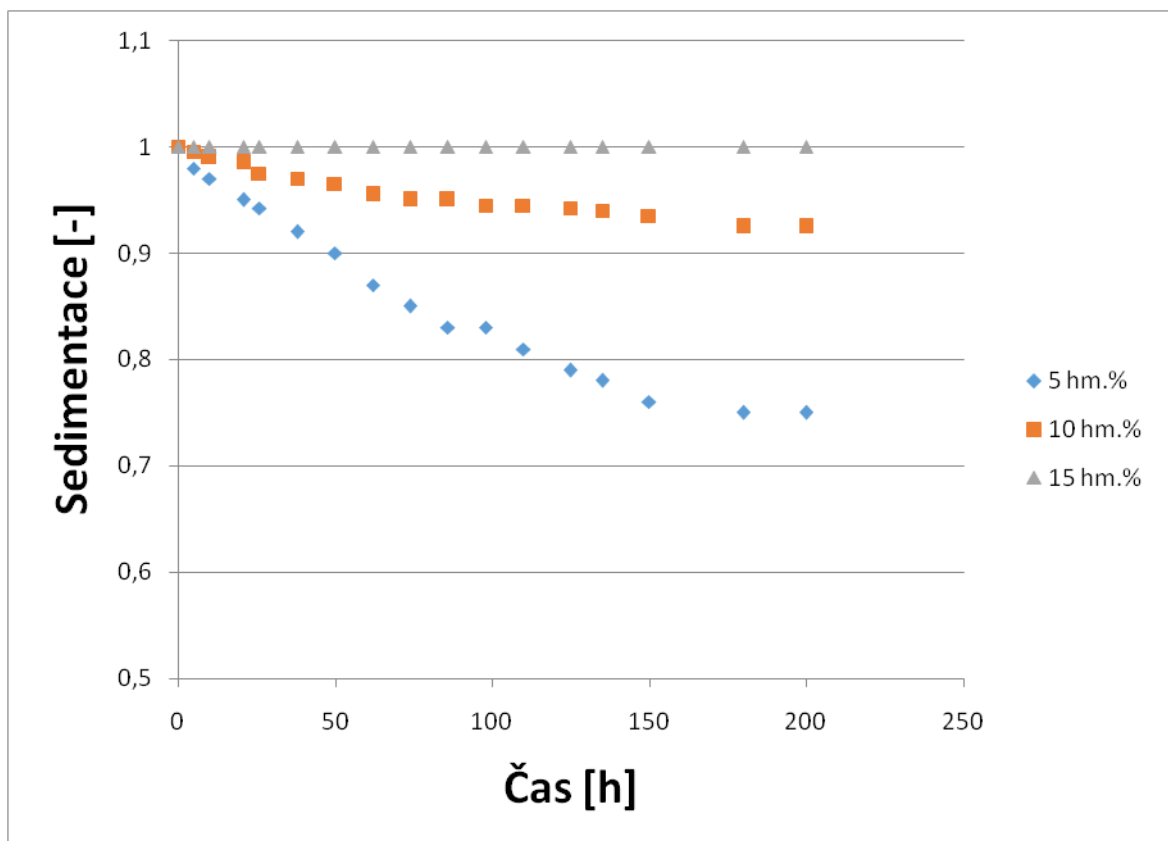
Sloupec t_{rel} popisuje rychlost mezifázové polarizace, $\Delta\epsilon'$ představuje rozsah elektrostatické interakce mezi částicemi a silikonovým olejem. V případě ER systému tvořeného 10 hm.% částic sepiolitu bylo zjištěno, že $\Delta\epsilon'$ je 2,5 krát vyšší pro vzorek s 5 hm.% částic sepiolitu. Kromě toho je maximální hodnota na vrcholu křivky pro ϵ'' významně vyšší pro ER systém s 10 hm.% částic sepiolitu.

Tab. 2: Dielektrické parametry pro ER systémy obsahující částic sepiolitu (5 hm.% a 10 hm.%) získané z modelu Havriliak - Negami

Koncentrace částic	ϵ'_s	ϵ'_∞	$\Delta\epsilon'$	t_{rel} (s)	a	b
5 hm.%	4,98	3,14	1,84	$1,01 \times 10^{-2}$	0,34	0,94
10 hm.%	7,51	2,99	4,52	$3,90 \times 10^{-2}$	0,36	0,81

Špatná sedimentační stabilita ER systémů představuje obecný problém, což omezuje jejich použití v reálných aplikacích. Proto bylo na základě dat z reologických měření udávajících tvorbu vnitřní gelové struktury ER systémů tvořených částicemi sepiolitu dispergovaných v silikonovém oleji přistoupeno dále k analýze sedimentační stability těchto systémů o různých koncentracích dispergovaných částic.

Jak ukazuje *obr. 29* ER systém obsahující 5 hm.% částic sepiolitu prokázal sedimentační poměr 0,75 po 200 hodinách v klidovém stavu, kdy i tato hodnota ve srovnání se stávajícími ER systémy představuje výrazný pokrok v dlouhodobé stabilitě těchto inteligentních systémů. Navíc ER systém obsahující 10 hm.% částic sepiolitu vykazoval výrazně zvýšenou stabilitu, se sedimentačním poměrem 0,93 ve stejném časovém rámci. Předpoklad pozitivního vlivu vytvořené vnitřní gelové struktury v neaktivním stavu u systémů částic sepiolitu v silikonovém oleji byl zcela potvrzen pro ER systém obsahující 15 hm.% daných částic, kdy byl dosažen mimořádný sedimentační poměr 1, což je potvrzením, že vzorek vykazuje určitou hodnotu τ_0 i v nepřítomnosti vnějšího elektrického pole, čímž je potlačena sedimentace dispergovaných částic. Jak již bylo uvedeno, je důležité najít rovnováhu mezi vynikajícím sedimentačním poměrem a úrovní e , která odpovídá zamýšlené aplikaci.



Obr. 29: Sedimentační stabilita ER systémů obsahujících částice sepiolitu (5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%) v silikonovém oleji

ZÁVĚR

Tato práce se zabývala zvýšením sedimentační stability ER systému použitím jílovitého materiálu jakožto dispergované fáze. Sledované systémy byly připraveny smícháním částic sepiolitu se silikonovým olejem v různých koncentracích (5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%). Analýzou připravených ER systémů bylo zjištěno, že částice sepiolitu v silikonovém oleji tvořily gelovou síť s prahovým smykovým napětím již při absenci vnějšího elektrického pole, což následně zlepšilo stabilitu sedimentace. Bylo zjištěno, že sedimentační poměr byl 0,75 pro ER systémy obsahující 5 hm.% částic sepiolitu, dále pak 0,93 pro ER systémy obsahující 10 hm.% částic sepiolitu a 1,00 pro ER systémy obsahující 15 hm.% částic sepiolitu. Uvedené hodnoty sedimentačního poměru jsou uvedeny pro ER systémy po 200 hodinách v klidovém režimu.

Dále bylo prokázáno, že vyšší koncentrace dispergovaných částic vedla ke zvýšené ER aktivitě. Hodnoty statického prahového napětí byly stanoveny pro narůstající koncentraci částic sepiolitu v řadě 11,2 Pa a 21,5 Pa a 70,0 Pa při intenzitě elektrického pole 3kV/mm.

Nejvyšší ER účinnost byla nicméně pozorována u ER systému obsahující 5 hm.% částic sepiolitu, zatímco vzorek s 15 hm.% částic sepiolitu vykazoval nejnižší ER účinnost. Toto bylo vysvětleno skutečností, že čím bylo vyšší množství částic v systému, tím byla vyšší také hodnota statického prahového napětí ER systému v klidovém stavu. Přítomnost gelové sítě v ER systémech pro 10 hm.% a 15 hm.% byla potvrzena následně také pomocí oscilačního měření ve smykovém poli.

Provedení dielektrické spektroskopie odhalilo, že ER systémy vykazovaly podobné relaxační časy mezifázové polarizace. Nicméně dielektrická relaxační síla byla vyšší pro vzorek s 10 hm.% částic sepiolitu v porovnání se vzorkem obsahujícím 5 hm.% částic sepiolitu. V souhrnu lze tedy ER účinnost a sedimentační stabilitu přizpůsobit koncentraci částic sepiolitu. Snaha o získání systému s největší stabilitou sedimentace totiž může vést k nežádoucímu poklesu ER účinnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Winslow, W.M.: Induced fibrillation of suspensions, *Journal of Applied Physics*, 20, 1949, 1137-1140.
- [2] Shen, M.; Cao, J.G.;Zhu, J.T.; Xue, H.T.; Zhou, L.W.: Van der Waals interaction in colloidal giant electrorheological systems, *International Journal of Modern Physics B*, 19, 2005, 1170-1176.
- [3] Misono, Y.; Negita, K.: Shear-induced particle rotation and its effect on electrorheological properties and dielectric properties in cellulose suspension, *Physical Review E*, 70, 2004, 061412.
- [4] Hao, T., *Electrorheological Fluids: The Non-aqueous Suspensions*, 1. vydání, Cambridge, Massachusetts, USA, ELSEVIER, 2005, 561 s., ISBN-13 978-0-444-52180-4.
- [5] Winslow, W.M.: Methods and means of translating electrical impulses into mechanical force, US Patent 21 47 750, 1947.
- [6] Akhavan, J.: Electro-rheological polymers, *Proceedings of the institution of mechanical engineers part G-Journal of Aerospace Engineering*, 221, 2007, 577-587.
- [7] Wen, W.J.; Huang, X.X.; Yang, S.H.; Lu, K.Q.;Sheng, P.: The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles, *Nature Materials*, 11, 2003, 727-730.
- [8] Wang, BX.; Zhao, XP.; Zhao, Y.; Ding, CL.: Titanium oxide nanoparticles modified with chromium ion and its giant electrorheological activity, *Composites Science and Technology*, 67, 2007, 3031-3038.
- [9] Huang, X.; Wen, W.; Yang S.; Sheng P.: Mechanisms of the giant electrorheological effect, *Solid State Communications*, 139, 2006, 581-588.
- [10] Boissy, C.; Atten, P.; Foule, J.N.: On a negative electrorheological effect, *Journal of Electrostatics*, 35, 1995, 13-20.
- [11] Negita, K.; Misono, Y.; Yamaguchi, T.; Shinagawa, J.: Dielectric and electrical properties of electrorheological carbon suspensions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 321, 2008, 452-458.
- [12] Kim, S.G.;Lim, Y.J.; Sung, J.H.; Choi, J.H.; Seo, Y.: Emulsion polymerized polyaniline synthesized with dodecylbenzene-sulfonic acid and its electrorheological characteristics: Temperature effect, *Polymer*, 48, 2007, 6622-6631.
- [13] Block, H.; Kelly, J.P.; Qin, A.; Watson, T.: Materials and Mechanisms in Electrorheology, *Langmuir*, 6, 1990, 6-14.

- [14] Espin, M.J.; Delgado, A.V.; Płocharski, J.: Quasi-static electrorheological properties of hematite/silicone oil suspensions under DC electric fields, *Langmuir*, 21, 2005, 4896-4903.
- [15] Kanu, R.; Shaw, M.: Enhanced electrorheological fluids using anisotropic particles, *Journal of Rheology*, 42, 1998, 657-670.
- [16] Gong, X.Q.; Wu, J.B.; Huang, X.X.; Wen, W.J.; Sheng, P.: Influence of liquid phase on nanoparticle-based giant electrorheological fluid, *Nanotechnology*, 19, 2008, 165602.
- [17] Hong, C.H.; Choi, H.J.: Shear stress analysis of phosphorylated potato starch based electrorheological fluid, *Korea-Australia Rheology Journal*, 19, 2007, 221-225.
- [18] Negita, K.; Itou, H.; Yakou, T.: Electrorheological effect in suspension composed of starch powder and silicone oil, *Journal of Colloid and Interface Science*, 209, 1999, 251-254.
- [19] Huo, L.; Liao, F.H.; Li, R.J.; Zhang, S.H.; Zhang, O.; Ma, S.Z.; Xu, M.Y.; Lu, Y.m.: Electrorheological properties of chitosan nitrate suspension, *Colloids and Surface A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 316, 2008, 125-130.
- [20] Yoon, D.J.; Kim, Y.D.: Electrorheological properties of polypyrrole-SnO₂-methyl cellulose nanocomposite suspensions, *Journal of Material Science*, 42, 2007, 5534-5538.
- [21] Wei C., Zhu Y., Jin Y., Yang X., Li C.: Fabrication and characterization of mesoporous TiO₂/polypyrrole based nanocomposite for electrorheological fluid, *Materials Research Bulletin*, 43, 2008, 3263-3269.
- [22] Hou, J.; Shi, L.; Zhu, Q.: Electrorheological properties and structure of (Ba-TiO(C₂O₄)NH₂CONH₂), *Journal of Solid State Chemistry*, 179, 2008, 1874-1878.
- [23] Sung, B.H.; Ko, Y.G.; Choi, U.S.: Novel synthesis and electrorheological properties of monodispersed submicrone-sized hollow polyaniline dicarboxylate salt form suspensions, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 292, 2007, 217-223.
- [24] Gong, X.Q.; Wu, J.B.; Huang, X.X.; Wen, W.J.; Sheng, P.: Influence of liquid phase on nanoparticle-based giant electrorheological fluid, *Nanotechnology*, 19, 2008, 165602.
- [25] Jordan, M.; Schwendt, A.; Hill, D.; Burton, S.; Makris, N.: Zeolite-based electrorheological fluids: Testing, modeling and instrumental artifacts, *Journal of Rheology*, 41, 1997, 75-91.
- [26] Zheng, L.; Deng, Z.X.; Li, Y.N.: Electrorheological properties of titania particles with CE a Y composite doping as an anhydrous ER fluids, In proceedings of the 9th

- international conference on electrorheological (ER) fluids and magnetorheological (MR) suspensions, China, 2005, 121-126.
- [27] Lim, J.Y.; Kim, S.T.; Park, B.J.; Choi, H.J.: Preparation and electrorheological characteristics of PANI/MWNT nanocomposite, *International Journal of Modern Physics B*, 21, 2007, 5003-5009.
- [28] Kim, Y.D.; Kim, J.H.: Synthesis of polypyrrole-SBS composites and particle size effect on the electrorheological properties of their suspensions, *Synthetic Metals*, 158, 2008, 479-483.
- [29] Wen, W.J.; Huang, X.X.; Yang, S.H.; Lu, K.Q.; Sheng, P.: The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles, *Nature Materials*, 11, 2003, 727-730.
- [30] Wang, B.X.; Zhao, X.P.; Zhao, Y.; Ding, C.L.: Titanium oxide nanoparticles modified with chromium ion and its giant electrorheological activity, *Composites Science and Technology*, 67, 2007, 3031-3038.
- [31] Huang, X.; Wen, W.; Yang S.; Sheng P.: Mechanisms of the giant electrorheological effect, *Solid State Communications*, 139, 2006, 581-588.
- [32] Shen, M.; Cao, J.G.; Zhu, J.T.; Xue, H.T.; Zhou, L.W.: Van der Waals interaction in colloidal giant electrorheological systems, *International Journal of Modern Physics B*, 19, 2005, 1170-1176.
- [33] Zhang, K.; Lim, J.Y.; Choi, H.J.: Core-shell structured carbon nanotube/ poly (methyl methacrylate) composite and its electrorheological activity, *Diamond and Related Materials*, 17, 2008, 1604-1608.
- [34] Hou, J.; Shi, L.; Zhu, Q.: Electrorheological properties and structure of $(BaTiO_3)_x(C_2O_4)_y(NH_2CONH_2)_z$, *Journal of Solid State Chemistry*, 179, 2008, 1874-1878.
- [35] Schwarz M.: *Encyclopedia of smart material*, Volume 1, John Wiley & Sons, 2002, 376-390, ISBN 978-0-471-17780-7.
- [36] Kawai, A.; Ide, Y.; Inoue, A.; Ikzaki, F.: Electrorheology of miscible blended liquid-crystalline polymer: A dielectric property approach, *Journal of Chemical Physics*, 109, 1998, 4587-4591.
- [37] Parthasarathy, M.; Klingenberg, D.J.: Electrorheology: Mechanisms and models, *Materials Science & Engineering R-Reports*, 17, 1996, 57-103.
- [38] Espin, M.J.; Plochanski, J.: Effect of pollution on the interfacial properties of electrorheological suspensions, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 306, 2007, 126-136.

- [39] Sung, B.H.; Choi, U.S.; Jang, H.G.; Park, Y.S.: Novel approach to enhance the dispersion stability of ER fluids based on hollow polyaniline sphere particles, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 274, 2006, 37-42.
- [40] Akhavan, J.: Electro-rheological polymers, *Proceedings of the institution of mechanical engineers part G-Journal of Aerospace Engineering*, 221, 2007, 577-587.
- [41] Quadrat, O., Stejskal, J.: Polianiline in Electrorheology, *Journal Ind. Eng. Chem.*, 2006, 12, 3, s. 352-361.
- [42] Choi, H.J., Jhon, M.S.: Electrorheology of polymers and nanocomposites, *Soft Matter*, The Royal Society of Chemistry, 2009, 5, s. 1562-1567.
- [43] Cheng, Q., Pavlínek, V., Lengálová, A., a kol.: Conducting polypyrrole confined in ordered mesoporous silica SBA-15 channels: Preparation and its electrorheology, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2006, 93, s. 263-269.
- [44] Stěnička, M., Pavlínek, V., Sába, P., a kol.: Electrorheology of suspensions of variously protonated polyaniline particles under steady and oscillatory shear, *Applied Rheology*, 2010, 20, s. 55371, 1-7.
- [45] Belza, T., Pavlínek, V., Sába, P., Quadrat, O.: Electrorheological properties of suspensions of silica nanoparticles modified by urea and N, N-dimethylformamide, *Colloids and Surfaces A : Physico chemici Engineerig Aspects*, 2007, 297, s. 142-146.
- [46] Vilčáková, J.: Polymerní kompozity přírodní a syntetické, UTB, Zlín, letní semestr, 2009/2010, [přednášky].
- [47] Holzmüller, W., Altenburg, K.: Fyzika polymerů, 1. vydání, Praha, SNTL-Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 628 s.
- [48] Swartz, M.: Encyklopedia of smart materials, New York, USA, John Wiley & Sons, 2002, 1193 s., ISBN 0-471-17780-6.
- [49] Meissner, B., Zilvar, V., Fyzika polymerů, Struktura a vlastnosti polymerních materiálů, 1. vydání, Praha, SNTL-Státní nakladatelství technické literatury Alfa, 1987, 306 s., ISBN 04-634-87.
- [50] Stoklasa, K.: Vlastnosti polymerních materiálů, UTB, Zlín, letní semestr 2009/2010, [přednášky].
- [51] Fox, P. F., McSweeney, P. L. H., Cogan, T. M.: Cheese - Chemistry, Physics and Microbiology, 3. vydání, Elsevier, 2004, 466 s., ISBN 0-12-263651-6.
- [52] Kužvart, M., Weiss, Z.: Jílové minerály. Jejich nanostruktura a využití, UK Praha, 2005.

-
- [53] Bernard, J. H., Rost, R.: Encyklopedický přehled minerálů, Academia Praha, 1992.
- [54] Šucha V.: Íly v geologických procesoch. Univerzita Komenského Bratislava, 2001, s. 9–53. ISBN 80-223-1547-8.
- [55] Cho, M. S., Cho, H. J., Chin I. J., Ahn, W. S.: Electrorheological characterization of zeolite suspensions, 1999, Microporous Mesoporous Mat. 32(3): 233-239.
- [56] Marins, J. A., Plachý, T., Kuzhir, P.: Iron-sepiolite magnethoreological fluids with improved performances, 2019, 63(1):125-139.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ER	Elektroreologický
EMR	Elektromagnetoreologický
MR	Magnetoreologický
E	Intenzita elektrického pole
η	Smyková viskozita
τ	Smykové napětí
$\dot{\gamma}$	Rychlost smykové deformace
τ_y	Prahové napětí
τ_0	Prahové napětí
η_{pl}	Plastická viskozita
PANI	Polyanilín
PPY	Polypyrol
q	Parametr úměrný tuhosti struktury
α	Parametr charakterizující odezvu organizovanosti struktury
G	Modul pružnosti
γ	Smyková deformace
γ_0	Amplituda deformace
ω	Úhlová frekvence
δ	Fázový posun
t	Čas
t_{rel}	Relaxační čas
τ_0	Amplituda napětí
G'	Soufázový modul
G''	Ztrátový modul

$\tan \delta$	Ztrátový úhel
d	Tloušťka dielektrika
ε_r	Relativní permitivita
ε	Dielektrická konstanta daného prostředí
ε_0	Absolutní permitivita vakua
ε_r^*	Komplexní relativní permitivita
ε'	Reálná část komplexní permitivity
ε''	Imaginární složka komplexní permitivity
$\Delta\varepsilon$	Polarizovatelnost
σ	Vodivost
SO	Silikonový olej
G'_E	Soufázový modul v elektrickém poli
G'_0	Soufázový modul bez elektrického pole

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Schématické znázornění ER systému a) bez aplikovaného vnějšího elektrického pole, b) s aplikovaným vnějším elektrickým polem, c) s aplikovaným smykovým polem a vnějším elektrickým polem. [6]</i>	11
<i>Obr. 2: Schématické znázornění negativního ER efektu [4]</i>	12
<i>Obr. 3: Molekulární struktura PANI [4]</i>	15
<i>Obr. 4: Závislost prahového napětí a intenzity elektrického pole pro různě protonovaný PANI [23]</i>	15
<i>Obr. 5: Polymerizace PPY [4]</i>	16
<i>Obr. 6: Závislost prahového napětí a intenzity elektrického pole při různé koncentraci PPY [26]</i>	16
<i>Obr. 7: Krystalová struktura sepiolitu. Oktaedrická síť (1),</i>	19
<i>Obr. 8: Závislost smykového napětí vs. frekvence elektrického pole [11]</i>	21
<i>Obr. 9: Vztah mezi smykovým napětím a rychlostí smykové deformace pro ER systém na bázi TiO₂ tyčinek při různých teplotách v závislosti na intenzitě elektrického pole [13]</i>	21
<i>Obr. 10: Vztah prahového napětí na objemovém zlomku v závislosti na intenzitě</i>	22
<i>Obr. 11: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro systém PANI částic při různých intenzitách elektrického pole [kV/mm]: (■) 0; (○) 0,5; (▲) 1; (▽) 1,5; (◆) 2; (◁) 2,5; (▶) 3.[43]</i>	24
<i>Obr. 12: Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace pro systém PANI částic při různých intenzitách elektrického pole E [kV/mm]:(■) 0; (○) 0,5; (▲) 1; (▽) 1,5; (◆) 2; (△) 2,5; (▶) 3. [44]</i>	24
<i>Obr. 13: Napěťová odezva na deformaci A – ideálně elastického materiálu, B – ideálně vis-kózního materiálu, C – viskoelastického materiálu, při dynamických experimentech [51]</i>	26
<i>Obr. 14: Znázornění dielektrika v elektrickém poli, d – tloušťka dielektrika [4]</i>	27
<i>Obr. 15: Frekvenční závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na úhlové frekvenci [50]</i>	29
<i>Obr. 16: Reometr Bohlin Gemini</i>	34
<i>Obr. 17: Vysokonapěťový zdroj stejnosměrného proudu</i>	35
<i>Obr. 18: Soustava pro měření dielektrických vlastností</i>	36
<i>Obr. 19: SEM snímek částic sepiolitu při měřítku 5 μm</i>	37

<i>Obr. 20: SEM snímek částic sepiolitu při měřítku 10 μm.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 21: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace po ER systémy obsahující 5 hm.% částic sepiolitu při různé intenzitě elektrického pole</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 22: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace po ER systémy obsahující 10 hm.% částic sepiolitu při různé intenzitě elektrického pole</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 23: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace po ER systémy obsahující 15 hm.% částic sepiolitu při různé intenzitě elektrického pole</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 24: Závislost ER účinnosti na rychlosti smykové deformace pro ER systémy s koncentrací částic sepiolitu(5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%) v přítomnosti elektrického pole o intenzitě 3 kV/mm</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 25: Závislost viskoelastického modulu G' a G'' na deformaci pro ER systém obsahující částice sepiolitu o různé koncentraci (5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%)</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 26: Závislost viskoelastického modulu G' a G'' na frekvenci f pro ER systémy obsahující částice sepiolitu o různé koncentraci (5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%)</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 27: Závislost reálné části komplexní permitivity ϵ' na frekvenci f pro ER systémy s koncentrací částic sepiolitu 5 hm.% a 10 hm.%</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 28: Závislost imaginární části permitivity ϵ'' na frekvenci f pro ER systémy s koncentrací částic sepiolitu 5 hm.% a 10 hm.%</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 29: Sedimentační stabilita ER systémů obsahujících částice sepiolitu (5 hm.%, 10 hm.% a 15 hm.%) v silikonovém oleji</i>	<i>47</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Hodnoty smykového napětí pro jednotlivé koncentrace částic sepiolitu.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 2: Dielektrické parametry pro ER systémy obsahující částic sepiolitu (5 hm.% a 10 hm.%) získané z modelu Havriliak - Negami</i>	<i>46</i>