

Reologické chování suspenzí v elektrickém poli

Bc. Václav Valtr

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav VALTR**

Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Technologie a management**

Téma práce: **Reologie suspenzí v elektrickém poli**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na zadané téma
2. Připravte materiály a elektroreologické suspenze
3. Provedte analýzu elektrických, dielektrických a reologických vlastností suspenzí s ohledem na jejich složení
4. Vyhodnoťte a diskutujte dosažené výsledky

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. T. Hao, *Electrorheological fluids: The non aqueous suspensions*, 1st ed., Cambridge, Massachusetts, USA, 2005, ISBN 978-0-444-52180-4
2. M. Schwartz, *Encyclopedia of smart materials*, New York, USA, 2002, ISBN 0-471-17780-6
3. F. Kremer, A Schoenhals, *Broadband dielectric spectroscopy*, Berlin, Germany, ISBN 3-540-43407-0
4. Časopisecké publikace dostupné v databázích prostřednictvím Knihovny UTB

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Vladimír Pavlínek**
Centrum polymerních materiálů

Datum zadání diplomové práce: **15. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2010**

Ve Zlíně dne 15. února 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně, 20.5.2010


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o chování suspenzí vodivého polymeru polyanilinu v silikonovém oleji, když jsou vystaveny účinkům vnějšího elektrického pole. U suspenzí byly studovány reologické, viskoelastické a dielektrické vlastnosti, které byly korelovány se složením suspenzí.

Klíčová slova: Suspenze, polyanilin, silikonový olej, reologické, viskoelastické a dielektrické vlastnosti, elektrické pole.

ABSTRACT

Master thesis deals with the behavior of suspensions of conductive polymer, polyaniline, in silicone oil when they are exposed to external electric field. The suspensions were studied by rheological, viscoelastic and dielectric properties, which were correlated with the composition of suspensions.

Key words: Suspensions, polyaniline, silicone oil, rheological, viscoelastic and dielectric properties, electric field.

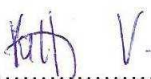
Dovolte, abych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Dr. Ing. Vladimíru Pavlínkovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu zpracování.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Miroslavu Mrlíkovi za svůj čas, který mi věnoval při měření elektroeologických a dielektrických vlastností.

Závěrem bych chtěl poděkovat všem, kteří mě během studia podporovali, a to zejména své rodině.

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

Ve Zlíně, 20. 05. 2010


.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	9	
I	TEORETICKÁ ČÁST	10
1	ELEKTROREOLOGICKÉ SUSPENZE	11
2	ELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT	12
2.1	POZITIVNÍ ELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT	12
2.2	NEGATIVNÍ ELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT	13
2.3	ELEKTROMAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT	14
3	ELEKTROREOLOGICKÉ MATERIÁLY	15
3.1	DISPERZNÍ FÁZE	15
3.2	DISPERGOVANÁ FÁZE	16
3.2.1	Anorganické materiály	16
3.2.2	Organické materiály	16
3.2.3	Vodivé polymery	16
4	ELEKTROREOLOGICKÉ CHOVÁNÍ SUSPENZÍ	20
4.1	SMYKOVÉ NAPĚTÍ.....	20
4.2	PRAHOVÉ NAPĚTÍ	22
4.3	VISKOZITA A CHARAKTER DISPERZNÍHO PROSTŘEDÍ.....	23
4.4	VISKOELASTICKÉ VLASTNOSTI	24
5	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ER EFEKT	28
5.1	INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE	28
5.2	FREKVENCE ELEKTRICKÉHO POLE	29
5.3	OBJEMOVÝ ZLOMEK	30
5.4	TEPLOTA	31
6	STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE	33
II	PRAKTICKÁ ČÁST	34
7	EXPERIMENT	35
7.1	PŘÍPRAVA PANI.....	35
7.2	PŘÍPRAVA SUSPENZÍ	35
7.3	ELEKTROREOLOGICKÁ MĚŘENÍ	36
7.4	DIELEKTRICKÁ MĚŘENÍ	37
8	DISKUZE	38
8.1	ELEKTROREOLOGICKÉ CHOVÁNÍ	38
8.2	DIELEKTRICKÉ CHOVÁNÍ	58
ZÁVĚR	61	
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	62	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66	
SEZNAM OBRÁZKŮ	68	
SEZNAM TABULEK	72	

ÚVOD

Elektroreologické (ER) kapaliny jsou koloidní suspenze obsahující elektricky polarizovatelné částice v izolační kapalině. Reologické vlastnosti (např. viskozita, smykové napětí, viskoelastické moduly) se mohou u takových suspenzí snadno řídit použitím vnějšího elektrického pole o intenzitě v řádech $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Elektrické pole indukuje polarizaci jednotlivých částic a interakce mezi polarizovanými částicemi vedou k vytvoření řetězkové struktury v suspenzi ve směru siločar elektrického pole. Organizovaná struktura klade zvýšený odpor proti toku a tak se významně mění reologické vlastnosti. Tento jev se nazývá ER efekt. Změny jsou velmi rychlé a vratné. Pokud přestane působit elektrické pole, struktura ztrácí svoji pevnost a částice se mohou vrátit do náhodného uspořádání.

Relativní permitivita, vodivost částic, objemový zlomek částic, vodivost izolační kapaliny, stejně jako charakter aplikovaného elektrického pole (stejnoseměrné, střídavé) jsou všechno parametry, které chování ER tekutin ovlivňují. Dalšími důležitými faktory jsou geometrie částic (tj. tvar a velikost) a stupeň polydispersity, viskozita izolační kapaliny, intenzita elektrického pole, rychlost smykové deformace [1].

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROREOLOGICKÉ SUSPENZE

ER suspenze bývají nejčastěji definovány jako dvoufázové systémy, které se skládají z částic rozptýlených v izolačním oleji o objemové frakci 0,02 – 0,50. Ty pak bývají vystaveny vnějšímu elektrickému poli o intenzitě 0,5 – 3 kV.mm⁻¹ [2].

Reologické vlastnosti ER suspenzí by měly být schopny reagovat na působení vnějšího elektrického pole. Bez působení vnějšího elektrického pole by měla viskozita suspenzí vykazovat nízké hodnoty. Procházející proud by měl být nulový nebo velmi nízký, aby byly minimalizovány elektrické ztráty a minimalizován ohřev suspenze. ER suspenze by měly být schopné operovat v širokém rozmezí provozních teplot, kde mají výhodu suspenze neobsahující vodu či vlhkost, která omezuje horní mez teploty použití. Navíc často ztrátou vlhkosti ztrácí i své ER vlastnosti (schopnost reagovat na elektrické pole). Částice použité k přípravě suspenzí mohou být organického i anorganického původu. S ohledem na dlouhodobou stabilitu připravených suspenzí je třeba dbát na vhodnou hustotu částic a izolačního oleje. V neposlední řadě by ER suspenze měly vykazovat silný ER efekt, a to při aplikaci jak střídavého, tak stejnosměrného napětí [3].

2 ELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT

ER efekt je definován jako změna reologických vlastností, jako je viskozita, smykové napětí a modul pružnosti ve smyku, v přítomnosti vnějšího elektrického pole. Reologické vlastnosti lze vlivem elektrického pole zvyšovat nebo snižovat. Ve všech případech jsou změny určovány fyzikálními vlastnostmi obou fází [4].

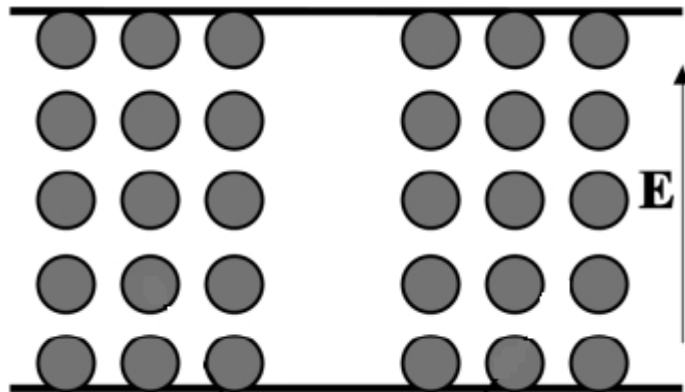
ER suspenze mohou vykazovat několik typů ER efektů. Z hlediska změny viskozity, smykového napětí nebo modulu, mohou být rozlišeny pozitivní a negativní efekty. V prvním případě se reologické vlastnosti zvyšují s intenzitou elektrického pole, ve druhém snižují [5].

2.1 Pozitivní elektoreologický efekt

Ideální ER kapaliny s pozitivním elektoreologickým efektem by měly mít:

- a) prahové napětí rovnající se nebo větší než 5 kPa v elektrickém poli do $2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$,
- b) nízkou proudovou hustotou, která prochází ER kapalinou nejlépe do hodnoty nižší než $20 \text{ } \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,
- c) široký rozsah pracovních teplot od $-30 - 120 \text{ } ^\circ\text{C}$,
- d) krátkou dobou odezvy. Doba odezvy ER kapaliny by měla odpovídat hodnotě přibližně 10^{-3} s ,
- e) vysokou stabilitu. ER kapaliny by měl být chemicky a fyzikálně stabilní. Nemělo by docházet k sedimentaci částic a k problémům s degradací materiálu [6].

Zvláštním případem pozitivního ER efektu, jenž byl nedávno objeven Wenem [7], je tzv. giant ER efekt. V tomto případě, po vyvození vnějšího elektrického pole, polarizované částice tvoří agregáty do sloupců seřazených ve směru pole, jak je znázorněno na obr. 1. Bylo zjištěno, že takové chování je přičítáno malé velikosti (v řádech nanometrů) a velkému povrchu, a tedy vysoké polarizovatelnosti částic [8].

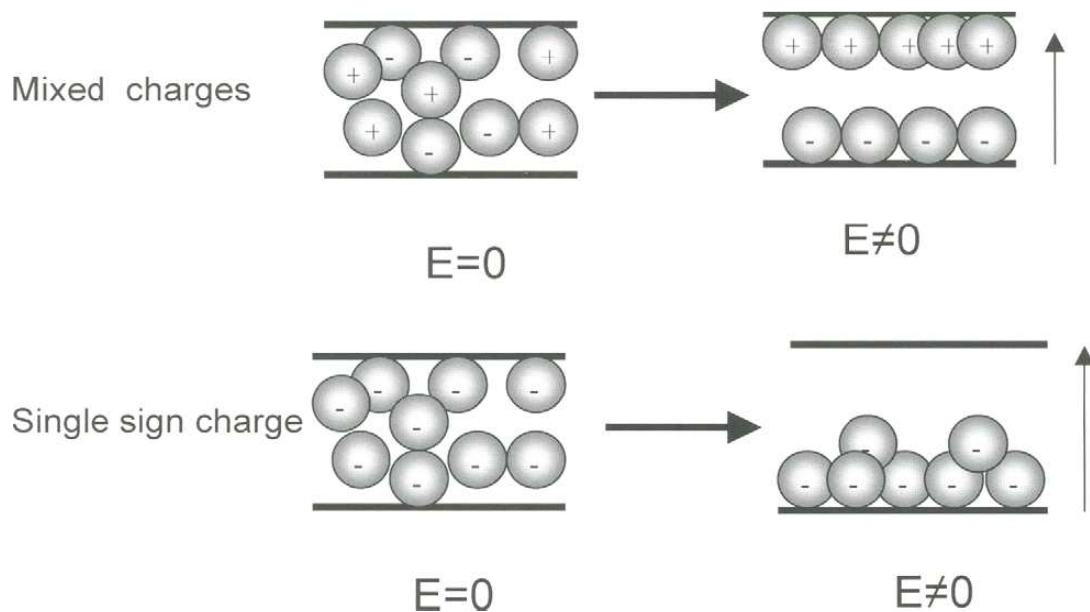


Obr. 1 Schematické znázornění sloupců řetězců směrem podél elektrického pole [9]

2.2 Negativní elektoreologický efekt

Na rozdíl od pozitivního ER efektu, negativní ER efekt představuje jev, kdy zdánlivá viskozita ER kapaliny klesá působením vnějšího elektrického pole.

Na obr. 2 jsou znázorněny částice rozmístěné nerovnoměrně, kde některé z nich jsou nabitě záporně a některé kladně (smíšené náboje) nebo rovnoměrně (jednoznaménkové náboje). V elektrickém poli se částice přesunují směrem k oběma elektrodám. Tento jev, který je také nazýván elektroforéza, vede k oddělování fází v suspenzi a snižování viskozity [10, 11].



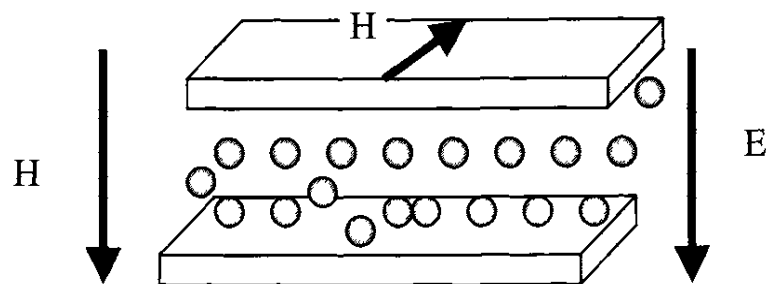
Obr. 2 Oddělování fází na základě elektrického pole v důsledku elektroforézy, což vede k negativnímu ER efektu [6]

2.3 Elektromagnetoreologický efekt

Kombinace elektrického a magnetického pole mohou mít výrazný vliv na reologické vlastnosti některých kapalin ve srovnání se situací, kdy působí pouze jedno pole [12, 13]. Elektromagnetoreologickým (EMR) efektem se nazývá synergický efekt zvýšení viskozity dle kombinace použitých polí [14].

Směr aplikovaného magnetického pole může být buď souběžný nebo kolmý k aplikovanému elektrickému poli, jak je znázorněno na obr. 3.

EMR efekt je silnější než ER a magnetoreologický (MR) efekt, kdy ER efekt působí pouze v elektrickém poli a MR efekt působí pouze v magnetickém poli [15].



Obr. 3 Schématické znázornění částic v EMR efektu, kde H představuje intenzitu magnetického pole a E představuje intenzitu elektrického pole [6]

3 ELEKTROREOLOGICKÉ MATERIÁLY

Elektroreologické materiály jsou v nepřítomnosti elektrického pole obvykle kapaliny, případně pasty, gely nebo elastomery, jejichž reologické vlastnosti silně závisí na intenzitě vnějšího elektrického pole. Aplikace elektrického pole způsobí změnu mikrostruktury materiálu, která se v průběhu milisekund projeví výrazným vzrůstem viskozity. Při dostatečně silných polích se kapalina změní na viskoelastickou tuhou látku, která se po odstranění pole téměř okamžitě vrátí zpět do původního kapalného stavu. V tuhém stavu jsou vlastnosti jako pevnost v tahu, pevnost ve smyku, schopnost tlumení, či schopnost pohltit energii nárazu výrazně závislé na intenzitě elektrického pole [16].

3.1 Disperzní fáze

Disperzní fázi ER kapalin je obvykle izolační olej. Ideální kapalina tvořící disperzní fázi by měla mít:

- a) vysoký bod varu a nízký bod tuhnutí. Jinými slovy být kapalinou v širokém rozsahu teplot,
- b) nízkou viskozitu pro udržení viskozity celé suspenze na nízké úrovni při vypnutém elektrickém poli,
- c) vysokou elektrickou pevnost, tj. odolávat vysokým elektrickým polím,
- d) vhodnou hustotou,
- e) vysokou chemickou stabilitu. Kapalné medium se nesmí rozkládat nebo chemicky reagovat s jinými materiály po přípravě ER suspenzí,
- f) hydrofobicitu a neadsorbovat příliš vlhkosti z prostředí,
- g) nízkou toxicitu a nízkou cenu [3, 6].

V současné době používané olejové materiály zahrnují silikonový olej, rostlinné oleje, minerální oleje, parafín, petrolej, chlorované uhlovodíky, transformátorové oleje, atd. Dále jsou také používány oleje o vysoké hustotě, jako je např. fluoro-silikonový olej [6].

3.2 Dispergovaná fáze

Dispergovaná fáze bývá tvořena z pevných částic. Tyto částice by měli mít následující vlastnosti:

- a) velikost v rozmezí 0,1 – 100 μm pro ER efekt a stabilitu kapaliny,
- b) neměly by tvořit aglomeráty,
- c) neměly by v suspenzích sedimentovat [17].

3.2.1 Anorganické materiály

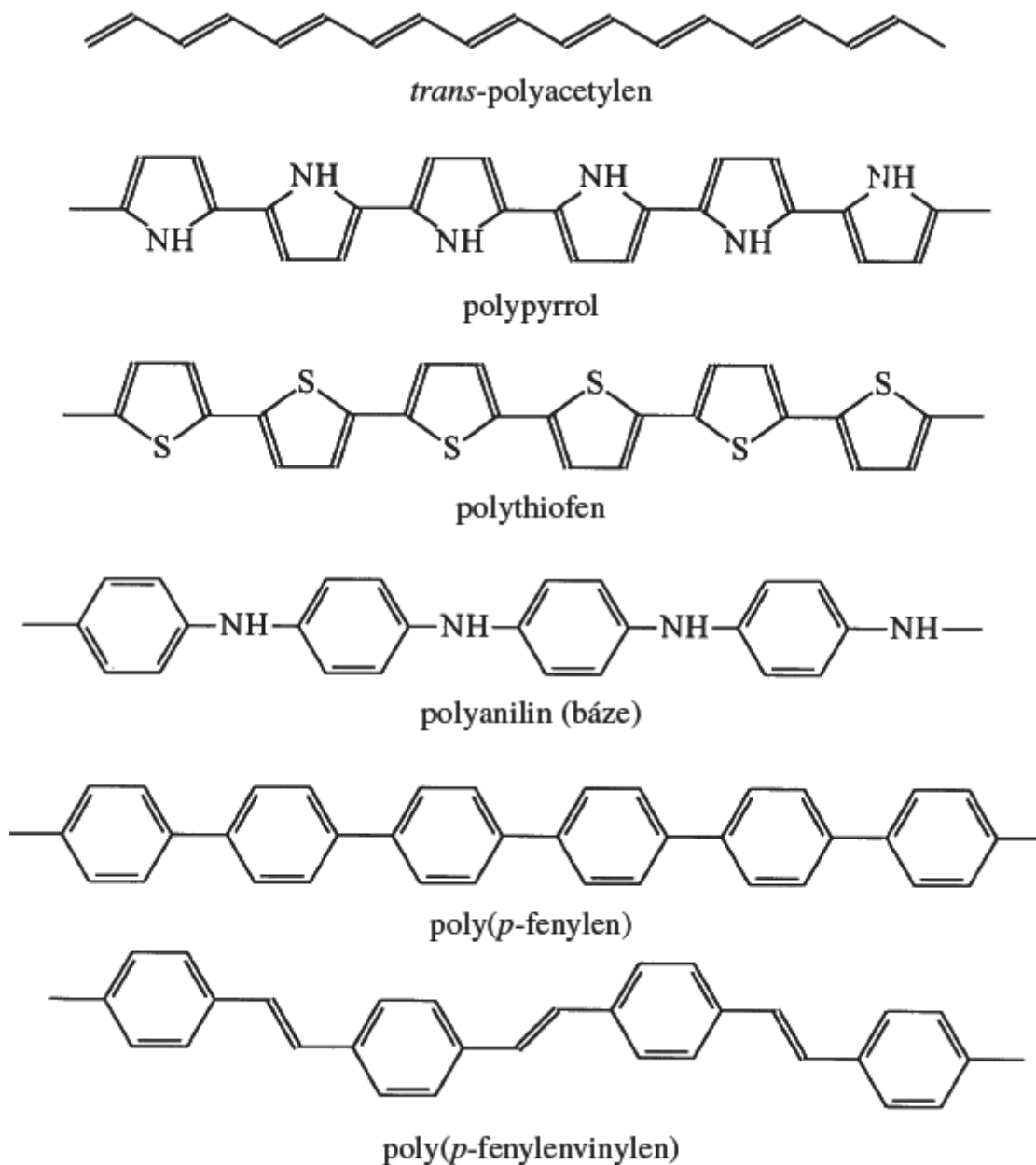
U některých kovových oxidů, jako jsou BaTiO_3 , TiO_2 , zeolit [18 – 20] nebo u keramických materiálů slinutých z několika oxidů bylo zjištěno, že vykazují dobrý ER efekt. Většina anorganických materiálů pro přípravu ER kapalin obsahuje vlhkost, která je velkou nevýhodou tohoto typu kapalin. Částice mají navíc vysokou hustotu, což se projevuje zvýšenou sedimentací, jež vede k jejich nestabilitě. Navíc jsou částice příliš tvrdé a abrazivní k ER zařízením [6].

3.2.2 Organické materiály

Používané organické a polymerní materiály lze rozdělit do dvou kategorií. První z nich představuje materiály s konjugovanými π -vazbami. Sem patří například polyakrylonitril nebo skupina vodivých polymerů, která bude představena dále. Druhou skupinou jsou materiály, které mají vysoce polarizovatelné skupiny, jako jsou hydroxy-, kyano-, amino-, apod. na molekulovém řetězci. Sem patří například celulóza [21], škrob [22], dextran, chitosan, atd. Nicméně ER efekt u organických materiálů bývá o něco slabší v porovnání s materiály anorganickými. Mají však výhodu menší hustoty a také nižší abrazivnosti [17].

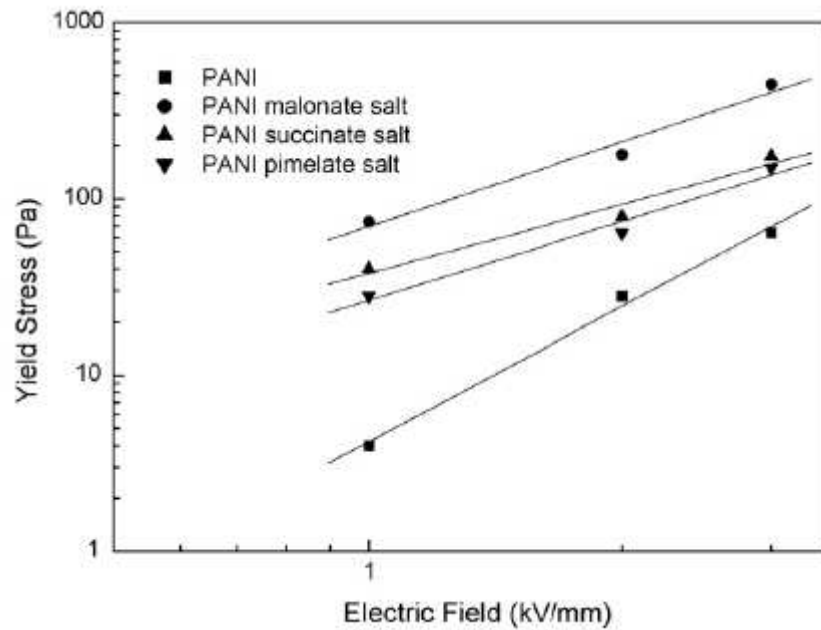
3.2.3 Vodivé polymery

Vodivé polymery vykazují, na rozdíl od polymerů ostatních, vlastní elektrickou vodivost. Příkladem jsou polyacetylen, polypyrol (PPy), polythiofen, polyanilin (PANI), polyfenylen či poly(p-fenylenvinylen), které jsou znázorněny na obr. 4. Vodivé polymery jsou tvořeny systémem konjugovaných dvojných vazeb. Na rozdíl od běžných polovodičů mohou vodivé polymery měnit svou strukturu, a tedy i své vlastnosti v reakci na okolní prostředí [23].



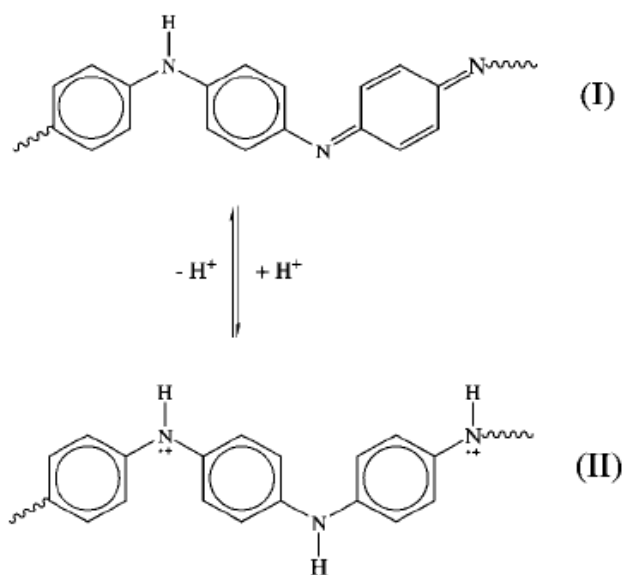
Obr. 4 Vodivé polymery [23]

Vodivost PANI, vhodnou pro přípravu účinných ER suspenzí, lze upravit protonací pomocí různých kyselin. Pak se intenzita ER účinku významně mění s úrovní protonace, jak je vidět na obr. 5 [24].



Obr. 5 Závislost prahového napětí na intenzitě elektrického pole pro suspenze různých typů PANI v silikonovém oleji [24]

Protonace je důvodem pro vysokou vodivost a další důležité vlastnosti vodivých polymerů. Základním procesem protonace je přenos náboje mezi organickým polymerem a dopantem. Když jsou náboje odstraněny (nebo přidány) z polymerního řetězce pomocí chemické reakce, mění se geometrické parametry, jako jsou vazebné úhly, délky a hybridizace, což vede k drastické změně vodivosti. Úroveň dopování a oxidace jsou nejvýznamnější faktory, které ovlivňují elektrické vlastnosti PANI. Různé dopanty produkují PANI s různými vlastnostmi, vhodné pro specifické aplikace. Jedním z nejčastějších mechanismů protonace PANI je známé protonování pomocí kyseliny, kde silná minerální kyselina změní nevodivou formu emeraldinové báze (EB) do vodivé emeraldinové soli (ES), jak je zobrazeno na obr. 6 [25].



Obr. 6 Schéma protonace PANI z emeraldinové báze (EB) I na případnou emeraldinovou sůl (ES) II [25]

4 ELEKTROREOLOGICKÉ CHOVÁNÍ SUSPENZÍ

4.1 Smykové napětí

Bez vnějšího elektrického pole, za ustáleného stavu, ER kapaliny vykazují obvykle prakticky Newtonské chování. Při smykovém napětí dochází k lineárnímu zvýšení rychlosti smykové deformace vyjádřeného rovnicí:

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

kde τ je smykové napětí, η viskozita a $\dot{\gamma}$ rychlost smykové deformace.

Kdežto při aplikaci elektrického pole dochází u ER kapalin k rychlým a reversibilním změnám jejich reologických vlastností. Smykové napětí se prudce zvyšuje s intenzitou elektrického pole a kapalina vykazuje prahové napětí jako projev ER efektu [2]. Takové chování bývá často nazýváno jako Binghamské:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{pro } \tau > \tau_0) \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad (\text{pro } \tau < \tau_0) \quad (3)$$

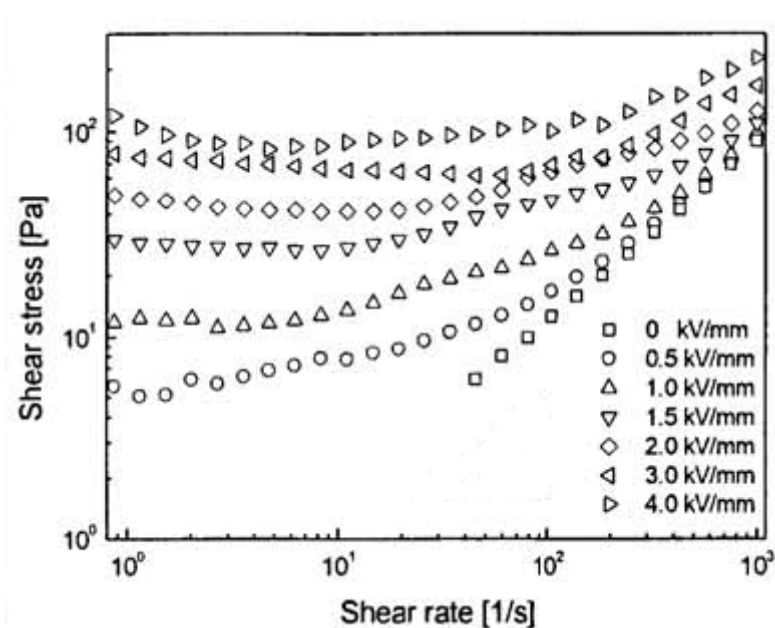
kde τ je smykové napětí, $\dot{\gamma}$ rychlost smykové deformace, τ_0 prahové napětí a η_{pl} plastická viskozita. τ_0 je silně závislé na řadě faktorů, včetně složení systému, intenzitě pole či koncentraci částic [26].

Výše uvedenou rovnicí (2) pro Binghamský model je možné zobecnit v Herschel-Bulkley model:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

kde n je index ne-Newtonského chování [27].

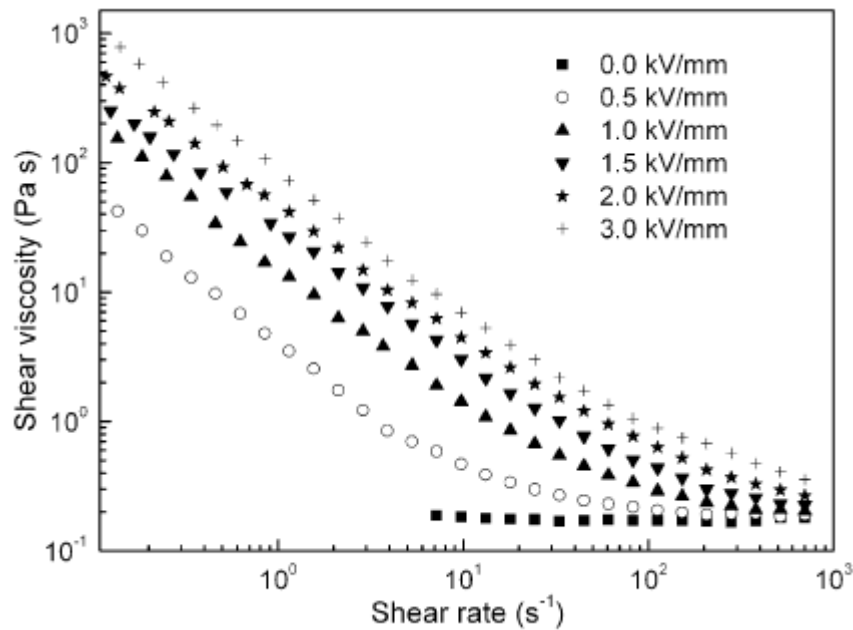
Obr. 7 znázorňuje typické chování ER kapaliny. Bez elektrického pole suspenze vykazuje chování Newtonské kapaliny. V přítomnosti elektrického pole se smykové napětí zvyšuje prudce s intenzitou elektrického pole a kapalina vykazuje vyšší prahové napětí, což znamená, že suspenze je silně zpevněná pod elektrickým polem (jako Binghamská kapalina) [28].



Obr. 7 Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro suspenzi 15 obj.% PANI v silikonovém oleji při různých intenzitách vnějšího elektrického pole [28]

Je patrné, že nad hodnotou intenzity elektrického pole kolem $0,5 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ smykové napětí vykazuje oblast plató v oblasti nízkých rychlostí smykové deformace. Poté se suspenze chovají téměř jako Newtonské kapaliny. To je způsobeno tím, že dochází k interakcím mezi elektrostatickými a hydrodynamickými silami. V oblasti nízkých rychlostí smykové deformace elektrostatické síly převládají nad hydrodynamickými. S rostoucí rychlostí smykové deformace dochází k destrukci řetězců částic a smykové napětí může i mírně klesat. Naopak v oblasti vysokých rychlostí smykové deformace hydrodynamické síly ovládají tokové chování a smykové napětí roste lineárně se smykovou deformací. Kromě toho je delší plató za vyšších intenzit elektrického pole připisováno silnějším interakcím mezi částicemi, které udržují řetězce stabilnější pro relativně široký rozsah smykových deformací [29].

S rostoucí rychlostí smykové deformace dochází ke zničení struktur řetězců částic a viskozita v přítomnosti elektrického pole dosahuje hodnot, které se blíží viskozitě suspenze bez přítomnosti elektrického pole, jak je znázorněno na obr. 8 [29].



Obr. 8 Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace pro suspenzi 10 obj.% PPy-MCM-41 v silikonovém oleji při různých intenzitách vnějšího elektrického pole [29]

Nedávno Cho a kol. [30] navrhli následující konstitutivní reologickou stavovou rovnici pro ER kapaliny při aplikaci elektrického pole, která má složité chování popisovat:

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + \left(t_1 \dot{\gamma}\right)^\alpha} + \eta_\infty \left(1 + \frac{1}{\left(t_2 \dot{\gamma}\right)^\beta}\right) \dot{\gamma} \quad (5)$$

kde α souvisí s poklesem smykového napětí v oblasti nízkých rychlostí smykové deformace, t_1 a t_2 jsou časové konstanty a η_∞ je smyková viskozita při nekonečné rychlosti smykové deformace a je interpretována jako smyková viskozita při nulovém elektrickém poli. Exponent β se pohybuje od $0 \leq \beta \leq 1$, protože $d\tau/d\dot{\gamma} \geq 0$ nad kritickou rychlostí smykové deformace [31].

4.2 Prahové napětí

Polarizační model zobecňuje závislost prahového napětí ER kapalin na materiálových parametrech, jako jsou dielektrické vlastnosti částic a kapaliny, objemový zlomek částic a vyvozená intenzita elektrického pole [32]. Na základě modelu pak bylo odvozeno, že pra-

hové napětí τ_0 je úměrné druhé mocnině intenzity elektrického pole, jehož intenzita je E_0 , vyjádřeno rovnicí:

$$\tau_0 = \phi K_f E_0^2 f(\beta) \quad (6)$$

kde ϕ je objemový zlomek částic, E_0 je intenzita elektrického pole a $\beta = (\varepsilon_p - \varepsilon_m)/(\varepsilon_p + 2\varepsilon_m)$ je bezrozměrný dielektrický parametr. Zde ε_p a ε_m jsou permitivity částic resp. kapaliny. Tento polarizační model je znám jako ideální pro data obsahující malé ϕ a E_0 [33].

Nedávno byla představena rovnice popisující prahové napětí pro široké spektrum intenzit elektrického pole, kdy Choi a spol. [34] zavedli kritickou intenzitu elektrického pole E_c . Navrhovaná rovnice prahového napětí je:

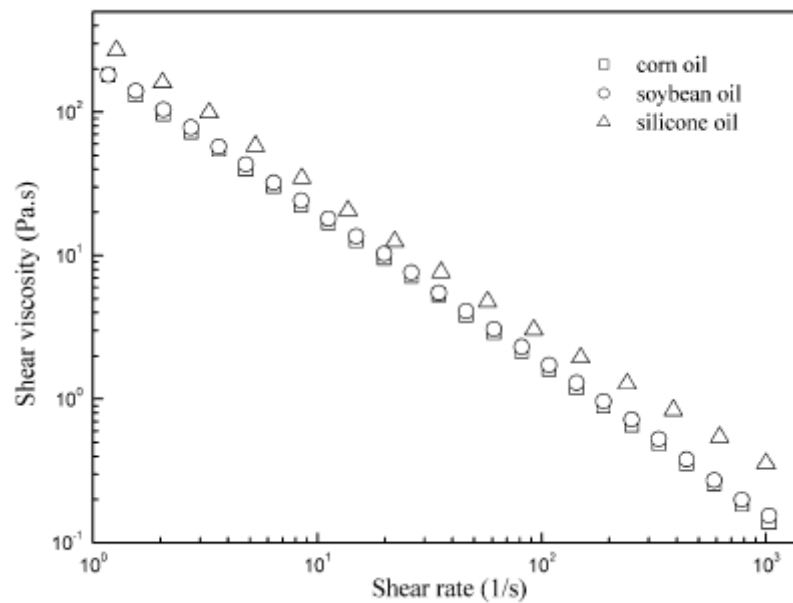
$$\tau_0(E_0) = \alpha E_0^2 \left(\frac{\tanh \sqrt{E_0 / E_c}}{\sqrt{E_0 / E_c}} \right) \quad (7)$$

kde parametr α závisí na dielektrické konstantě kapaliny a objemové zlomku částic a E_c je kritické elektrické pole, které je úměrné vodivosti.

4.3 Viskozita a charakter disperzního prostředí

Na obr. 9 je znázorněna změna viskozity suspenzí obsahujících různé oleje (o stejné viskozitě) jako disperzní prostředí. Vzájemná interakce dispergované fáze a disperzního prostředí, schopnost částic polarizovat se v daném prostředí, pak významně ovlivňuje intenzitu ER efektu. Stejná dispergovaná fáze v různých disperzních prostředích tak vede k různě intenzivním efektům [35].

Nicméně systematická studie, která by vliv viskozity disperzní fáze na intenzitu ER efektu řešila, v dostupné literatuře neexistuje.



Obr. 9 Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace u suspenzí chitosanu (25 hm.%) ve třech různých olejích při intenzitě elektrického pole $2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$: \square kukuřičný olej, \circ olej ze sojových bobů, Δ silikonový olej [35]

4.4 Viskoelastické vlastnosti

Viskoelastické vlastnosti jsou dalším projevem ER kapalin, které vyplývají ze struktury řetězců částic a jsou předmětem rozsáhlého teoretického a experimentálního výzkumu, protože mají širokou škálu aplikací [36].

Při dynamickém namáhání je vzorek podroben střídavé smykové deformaci a měří se výsledné smykové napětí. Nejčastější formou střídavé deformace je sinusová a deformace je obvykle smyková. Amplituda smykové deformace je velmi malá (často menší než 1 %) tak, aby napěťová odezva byla úměrná vstupní amplitudě deformace, tj. aby byla v oblasti lineární viskoelastivity. Jiným způsobem měření je vyvození sinusově proměnného napětí a sledování odezvy v deformaci. V prováděných experimentech je materiál podroben sinusové smykové deformaci o konstantní amplitudě γ_0 a úhlové frekvenci ω tak, aby se smyková deformace měnila v čase [37]:

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

Když je amplituda deformace dostatečně malá, odezva napětí bude také sinusová:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad (9)$$

kde σ_0 je amplituda napětí.

Pro komplexní modul G^* a tím spojené moduly soufázový G' a ztrátový G'' je dána následující rovnice:

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (10)$$

Pro vyjádření výše uvedených modulů se používá:

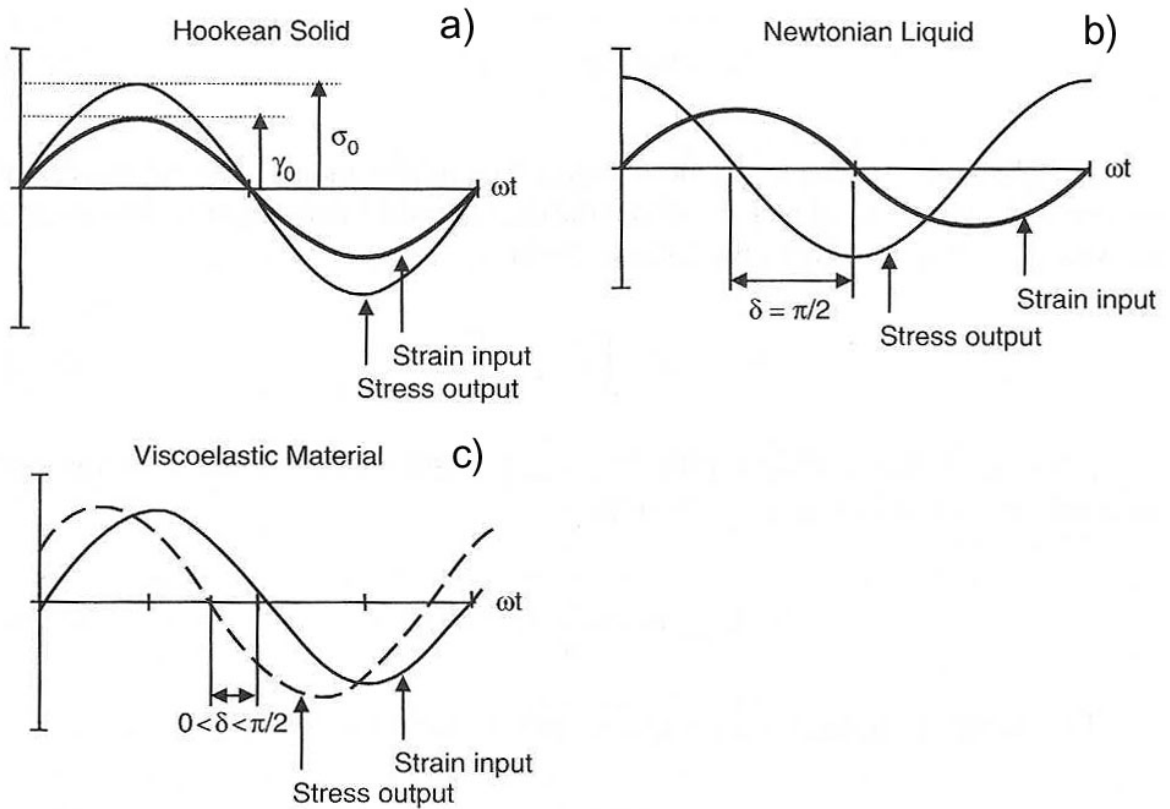
$$G'(\omega) = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cdot \cos(\delta) \quad (11)$$

$$G''(\omega) = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cdot \sin(\delta) \quad (12)$$

Často bývají dynamické odezvy vyjádřeny termínem ztrátový úhel vyjádřený vztahem:

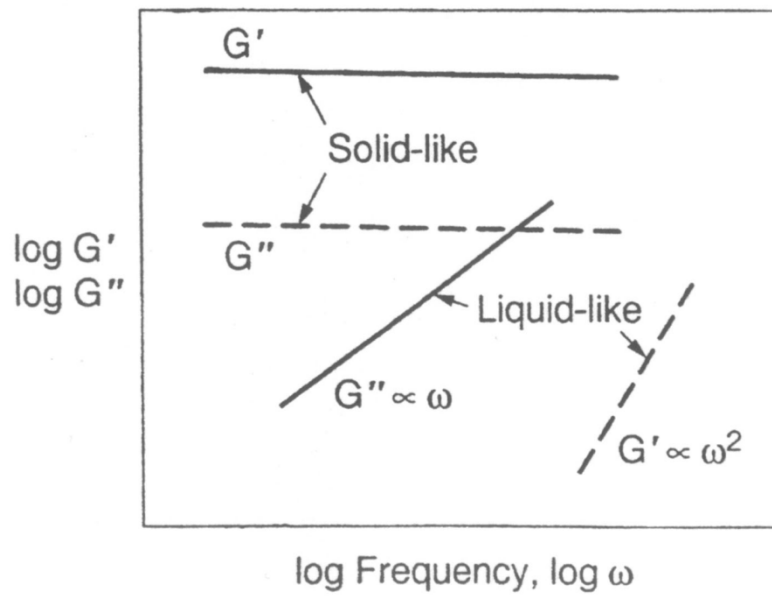
$$\tan \delta(\omega) = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} \quad (13)$$

Pro dynamická (oscilační) měření jsou typické křivky znázorněny na obr. 10. Pro ideální elastické látky je hodnota ztrátového úhlu rovna nule, takže veškerá energie je uložena (10a). Pro viskózní kapaliny $\delta = \pi/2$, takže veškerá energie je spotřebována v průběhu deformace (10b). Odpovídající hodnoty pro $\tan \delta$ jsou pak 0 a ∞ . U viskoelastických materiálů, $0 < \delta < \pi/2$, a tím i relativní množství uložené energie nebo spotřebované se odvozuje od velikosti fázového úhlu (10c) [37].



Obr. 10 Sinusové napětí vstupní a typické napětí-deformace pro elastické pevné materiály, viskózní kapaliny a viskoelastické materiály [37]

V oblasti lineární viskoelasticity se chování ER kapalin mění tak, jak je uvedeno na obr. 11. Bez vlivu elektrického pole je ztrátový modul G'' větší než soufázový modul G' , oba moduly se významně mění s úhlovou frekvencí. Dominuje viskózní charakter kapaliny. V elektrickém poli se však chování ER kapalin dramaticky mění. Oba viskoelastické moduly prudce vzrůstají, soufázový modul G' je výrazně vyšší než ztrátový modul G'' a navíc se stávají v podstatě nezávislými na úhlové frekvenci. Takové chování je charakteristické pro tuhé elastické látky [38].



Obr. 11 Závislost souřazového modulu G' a ztrátového modulu G'' na frekvenci a úhlové frekvenci ω [38]

5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ER EFEKT

ER efekt závisí na intenzitě elektrického pole, frekvenci elektrického pole, objemovém zlomku částic, teplotě atd. Stručný přehled o tom, jak tyto parametry ovlivňují ER efekt je uvedeno v následujících podkapitolách.

5.1 Intenzita elektrického pole

Prahové napětí ER kapaliny značně závisí na intenzitě elektrického pole. Existuje také kritická intenzita elektrického pole E_c a ER kapaliny by neměly vykazovat žádný ER efekt v elektrickém poli, jehož intenzita je menší než kritická. Tato hodnota se vyjadřuje vztahem:

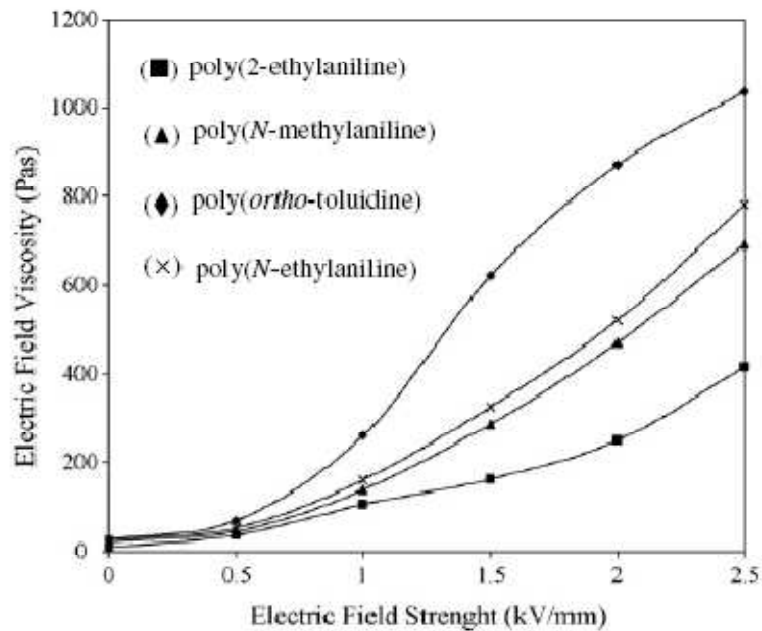
$$E_c = \frac{\rho - c}{|\alpha|} \sqrt{8\pi k_B T / (c\rho\bar{v}\epsilon_m)} \quad (14)$$

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

$$\alpha = \frac{g}{g + \epsilon_m / (\epsilon_p - \epsilon_m)} \quad (15)$$

kde ϵ_p je permitivita částic a g je číselná konstanta týkající se geometrie částic. Hodnota $g = 1/3$ platí pro částice kulového tvaru, hodnoty $g > 1/3$ mají částice tyčového tvaru a $g < 1/3$ u částic diskových [6].

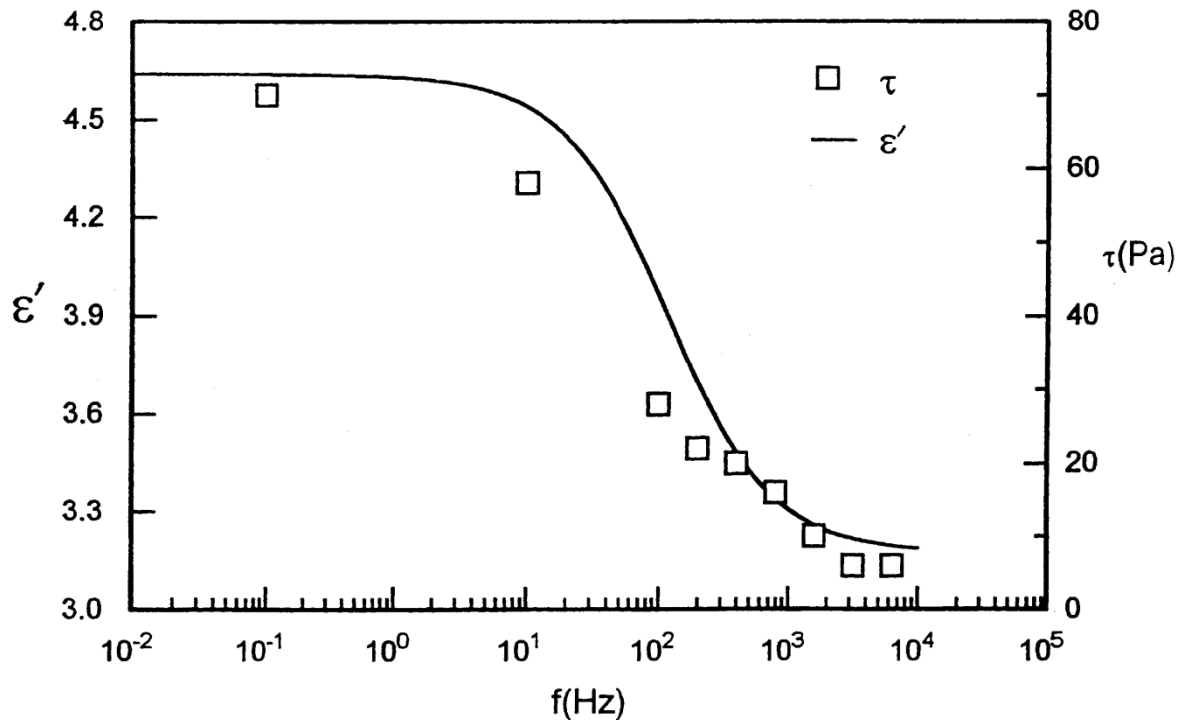
Jak je patrné z obr. 12, s rostoucí intenzitou elektrického pole dochází ke zvýšení viskozity [39].



Obr. 12 Závislost síly elektrického pole na viskozitě elektrického pole pro různé deriváty PANI [39]

5.2 Frekvence elektrického pole

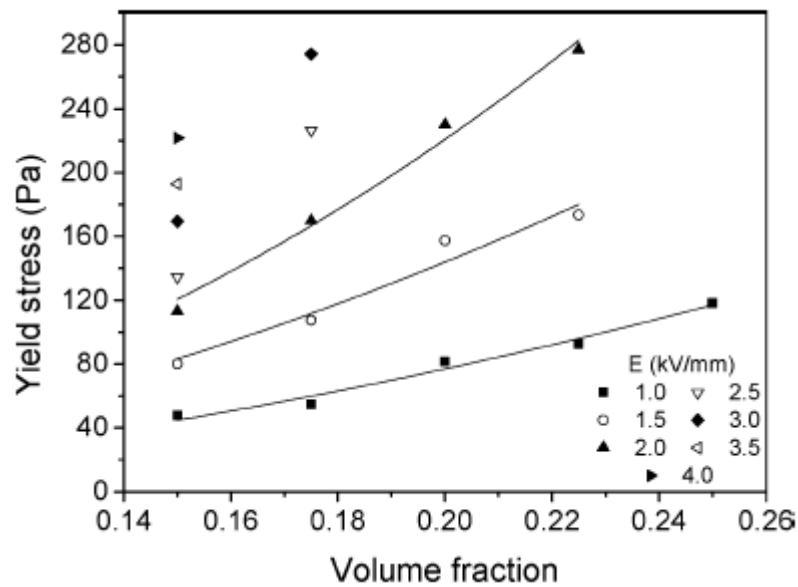
K vyvození ER efektu se obvykle využívá stejnosměrného elektrického pole. Nicméně použití střídavého elektrického pole přináší některé výhody. V první řadě je třeba zmínit potlačení elektroforézních dějů (migraci a ulpívání částic na jedné z elektrod) a dále pak studium mechanismů ER efektu a stanovení reakčních časů procesu. Vzhledem k tomu, že reakční doba ER kapaliny je přibližně 1 ms, klesá intenzita ER efektu s rostoucí frekvencí použitého elektrického pole, obr. 13 [6, 40, 41].



Obr. 13 Závislost prahového napětí τ a permitivity ϵ' na frekvenci f [6]

5.3 Objemový zlomek

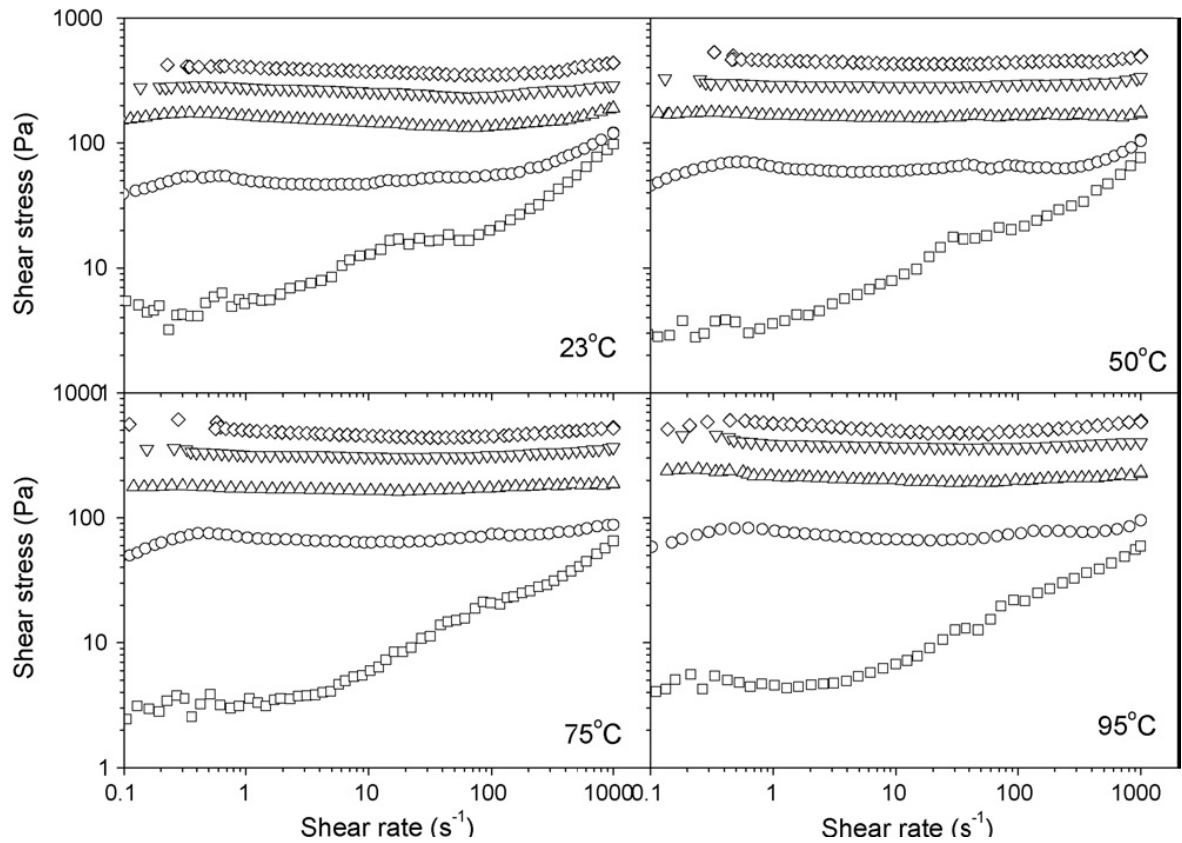
ER efekt většinou závisí na koncentraci dispergované fáze. Pokud objemový zlomek částic nepřekročí kritickou hranici koncentrace, tak nedojde k žádným změnám smykového napětí či viskozity. Optimální objemový zlomek částic pro ER efekt se pohybuje v rozmezí mezi 15 až 40 %. Vysoký objemový zlomek může vést k nestabilitě kapaliny nebo k poklesu ER efektu. Jak objemový zlomek ovlivňuje reologické vlastnosti je znázorněno na obr. 14. Objemový zlomek částic zvyšuje prahové napětí [42].



Obr. 14 Závislost prahového napětí na objemovém zlomku pro různé intenzity elektrického pole [26]

5.4 Teplota

Existují dva způsoby, jak může teplota měnit ER efekt. První z nich je, že teplota změní polarizovatelnost ER suspenze, jakož i vodivost částic a dielektrické vlastnosti. Druhý je, že teplota má přímý dopad na tepelný pohyb částic. Brownův pohyb je intenzivnější při vyšší teplotě a částice nejsou schopny vytvořit fibrilované struktury uvnitř suspenze, proto se ER efekt stává slabší. Zda zvýšení teploty posílí nebo oslabí ER efekt, skutečně závisí na faktorech souvisejících s touto teplotou. Jak je vidět na obr. 15, smykové napětí se zvyšuje s rostoucí teplotou [6].



Obr. 15 Závislost mezi smykovým napětím a rychlostí smykové deformace Na-titanátových tyčinek při různých teplotách a pro různé intenzity elektrického pole E [kV·mm⁻¹]: □ 0, ○ 1, △ 2, ▽ 3, ◇ 4 [43]

6 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cíle diplomové práce jsou následující:

1. Příprava suspenzí PANI/silikonový olej (SO) s použitím PANI o různé vodivosti a SO o různé viskozitě
2. Měření reologických, dielektrických a viskoelastických vlastností v elektrickém poli
3. Vyhodnocení dosažených výsledků s ohledem na roli vodivosti PANI a viskozity SO v účinnosti ER efektu

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 EXPERIMENT

7.1 Příprava PANI

Kyselinou fosforečnou byla provedena řízená protonace PANI, který byl předem připraven oxidací 0,2 M anilin hydrochloridu a 0,25 M peroxidisíranu amonného ve vodě při 20°C. Takto získaná PANI sůl (vodivost 4,4 S.cm⁻¹) byla převedena na PANI bázi v pětinašobném přebytku 1 M hydroxidu amonného (50 ml na 1 g PANI soli) po dobu dvou dnů, dále byla přefiltrována a následně usušena na vzduchu. Vodivost PANI báze byla 3,6.10⁻⁹ S.cm⁻¹. Část PANI báze (0,5 g) byla suspendována ve 100 ml vodného roztoku kyseliny fosforečné o různých koncentracích po dobu 24 h. Získaný produkt byl přefiltrován, propláchnutý acetonem a usušen. Stupeň protonace jednotlivých vzorků byl ovlivněn molární koncentrací C_A použité kyseliny [44]. Ze získané řady byly pro účely diplomové práce vybrány dva vzorky, a to polynilínová báze a vzorek protonovaný 0,01 mol.l⁻¹ kyselinou fosforečnou, viz tabulka 1. Připravené materiály se výrazně odlišují svou vodivostí, což se projeví odlišným chováním suspenzí v elektrickém poli.

Tabulka 1 Hustota ρ a vodivost σ PANI báze a protonovaného PANI ve vodném roztoku kyseliny fosforečné o molární koncentraci C_A

Vzorek	C_A [mol.l ⁻¹]	ρ [g.cm ⁻³]	σ [S.cm ⁻¹]
PANI báze	0	1,132	3,6.10 ⁻⁹
PANI protonovaný	0,01	1,264	4,7.10 ⁻⁵

7.2 Příprava suspenzí

Suspenze, o koncentraci 10 hm.%, byly připraveny smícháním polyanilinové báze resp. protonovaného PANI v silikonových olejích o různých viskozitách, viz tabulka 2, kde SO 50: Lukosiol M50, výrobce Lučební závody, a.s. Kolín, ČR (viskozita $\eta = 50$ mPa.s, hustota $\rho = 0,97$ g.cm⁻³, permitivita $\varepsilon' = 2,85$), SO 100: Fluid 200, výrobce Dow Corning, UK (viskozita $\eta = 100$ mPa.s, hustota $\rho = 0,965$ g.cm⁻³, permitivita $\varepsilon' = 2,62$), SO 200: Lukosiol M200, výrobce Lučební závody, a.s. Kolín, ČR (viskozita $\eta = 200$ mPa.s, hustota ρ

= 0,97 g.cm⁻³, permitivita $\epsilon' = 2,89$). Jednotlivé suspenze byly před každým měřením mechanicky míchány skleněnou tyčinkou a poté po dobu 30 s pomocí ultrazvuku.

Tabulka 2 Složení suspenzí

Vzorek	PANI	η SO [mPa.s]
č. 1	báze	50
č. 2	báze	100
č. 3	báze	200
č. 4	protonovaný	50
č. 5	protonovaný	100
č. 6	protonovaný	200

7.3 Elektoreologická měření

ER vlastnosti byly měřeny na rotačním reometru Bohlin Gemini (Malvern Instruments UK), uvedeném na obr. 16, s geometrií deska-deska. Rotující vrchní deska o průměru 40 mm a stacionární spodní deska byly odděleny mezerou 0,5 mm. Měření bylo provedeno v režimu řízených rychlostí smykových deformací v rozmezí 0,1 – 300 s⁻¹ a elektrickém poli o intenzitě 0 – 3 kV.mm⁻¹. Ke zvolené geometrii byl připojen vysokonapěťový zdroj stejnosměrného proudu TREK (TREK 668B, USA).

Na stejném zařízení, se stejnou geometrií, byly také měřeny v oscilačním režimu viskoelastické vlastnosti ER suspenzí. Využívalo se jak možnosti řízené deformace, tak řízeného smykového napětí. Všechna měření byla prováděna při teplotě 25 °C.



Obr. 16 Rotační reometr Bohlin Gemini

7.4 Dielektrická měření

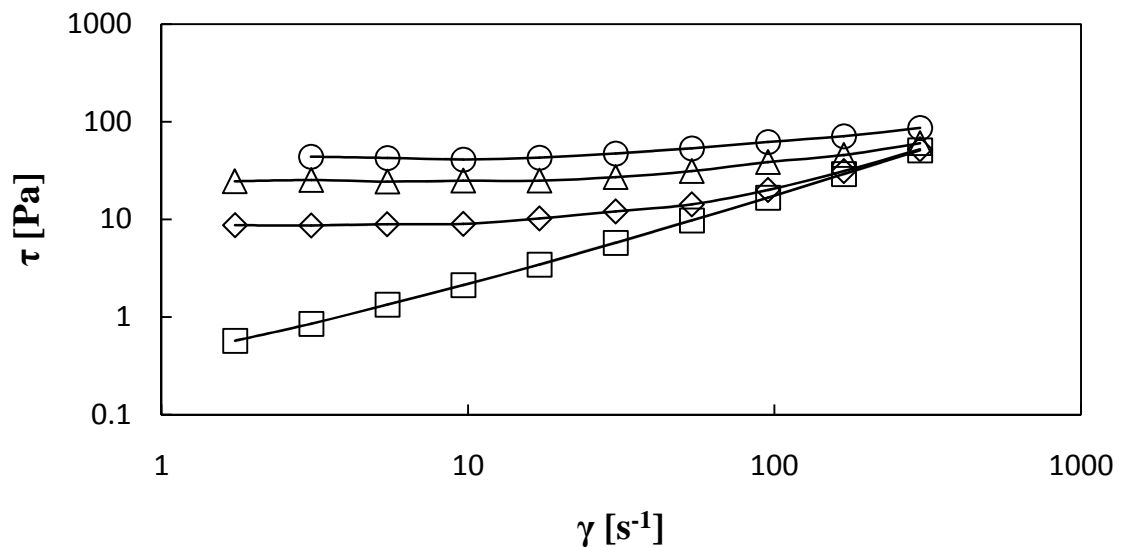
Dielektrické vlastnosti připravených suspenzí byly měřeny pomocí impedančního analyzátoru Agilent 4294A (Agilent, USA) s použitím cely pro měření kapalin 16452A (Agilent, USA).

Byly vyhodnocovány hodnoty permitivity ϵ' a ztrátového faktoru ϵ'' v závislosti na frekvenci v rozsahu 40 Hz – 30 MHz. Monitorovací napětí bylo 0,5 V.

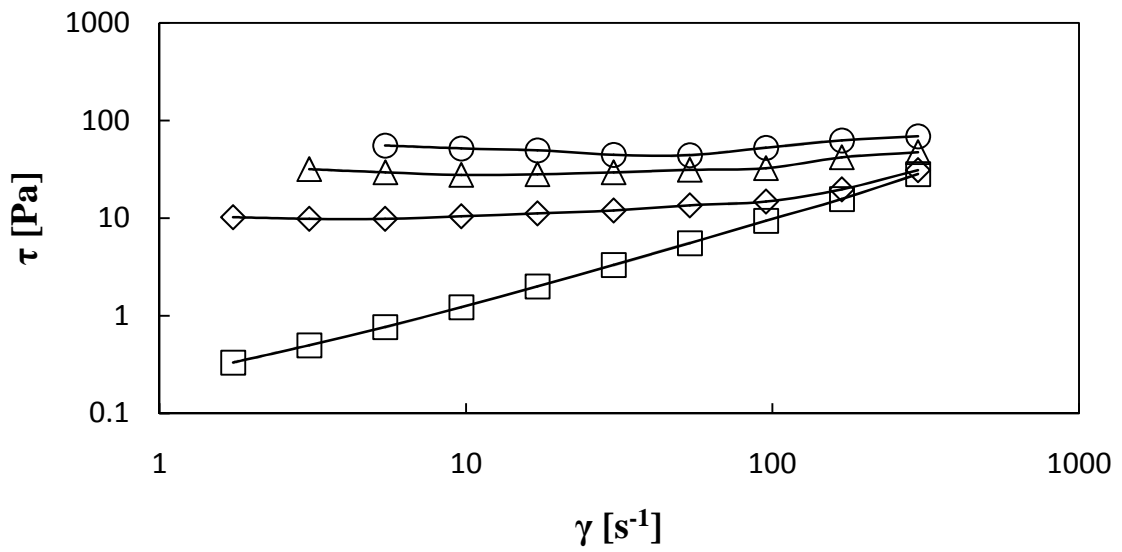
8 DISKUZE

8.1 Elektoreologické chování

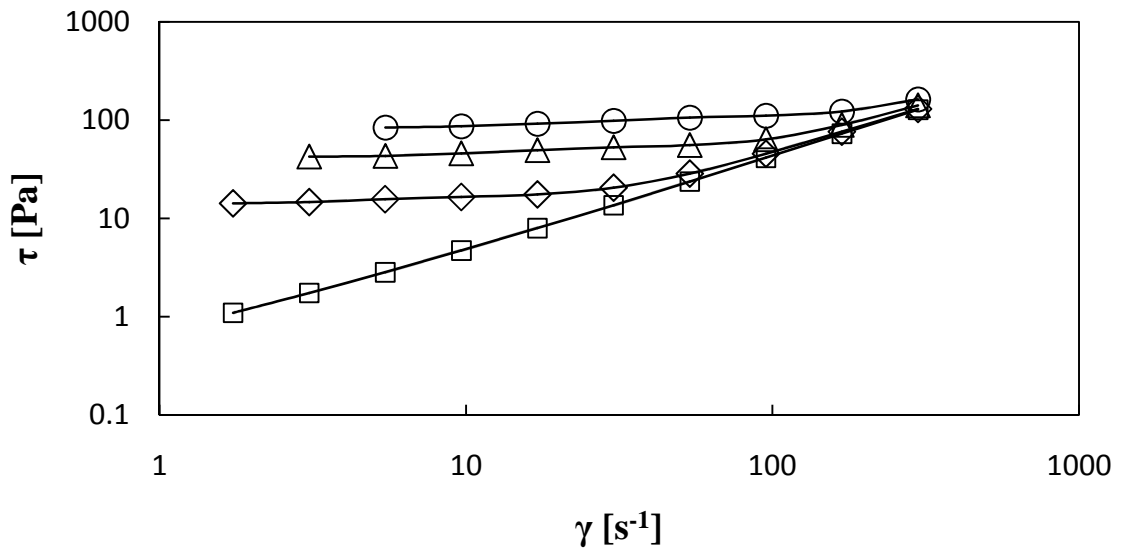
Na obr. 17 – 22 je znázorněna závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro jednotlivé suspenze v různě silných elektrických polích. Bez vlivu elektrického pole smykové napětí roste lineárně s rychlostí smykové deformace a tím vzorky vykazují Newtonské chování. Při aplikaci elektrického pole suspenze ukazují prahové napětí v důsledku vytvoření řetězkových struktur mezi elektrodami. Při nízkých smykových deformacích převládají elektrostatické síly nad hydrodynamickými v důsledku silné interakce mezi částicemi v rámci aplikovaného elektrického pole. Naopak při vyšších smykových deformacích převládají hydrodynamické síly nad elektrostatickými. S rostoucí smykovou deformací jsou řetězce průběžně ničeny a vzorky vykazují chování podobné jako bez elektrického pole.



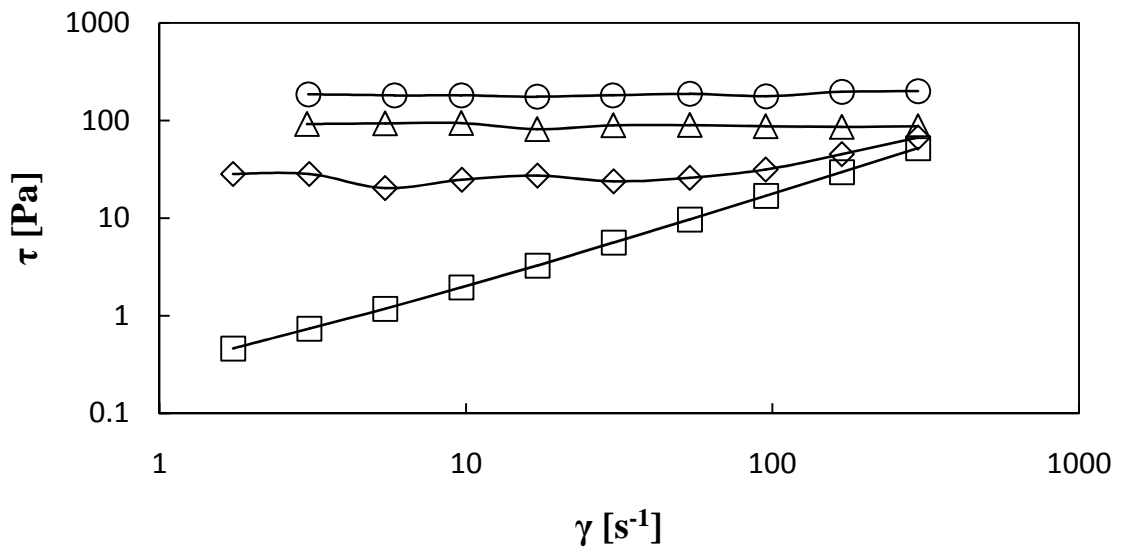
Obr. 17 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 1 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



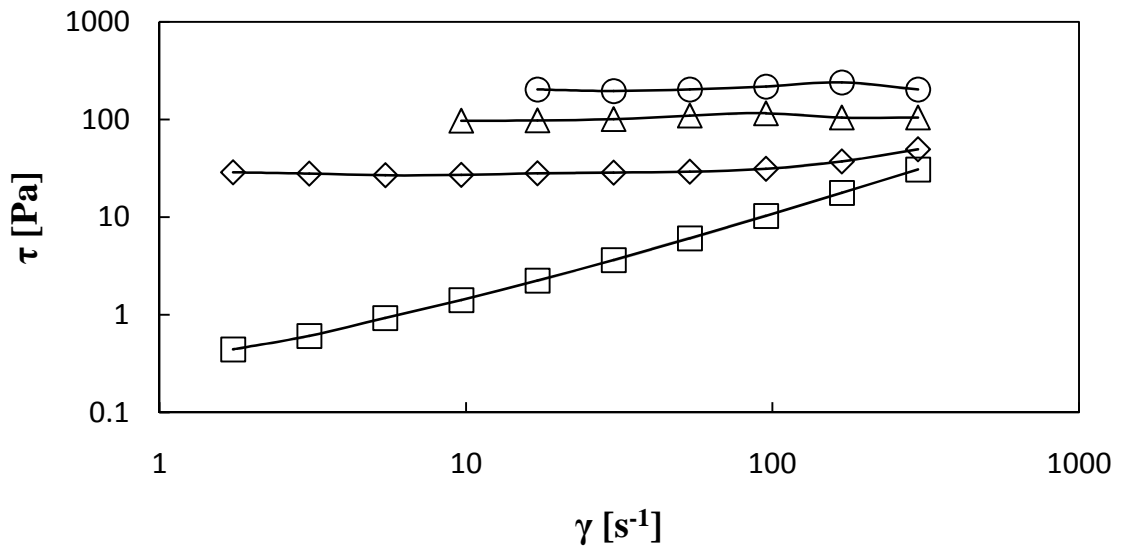
Obr. 18 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV \cdot mm^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



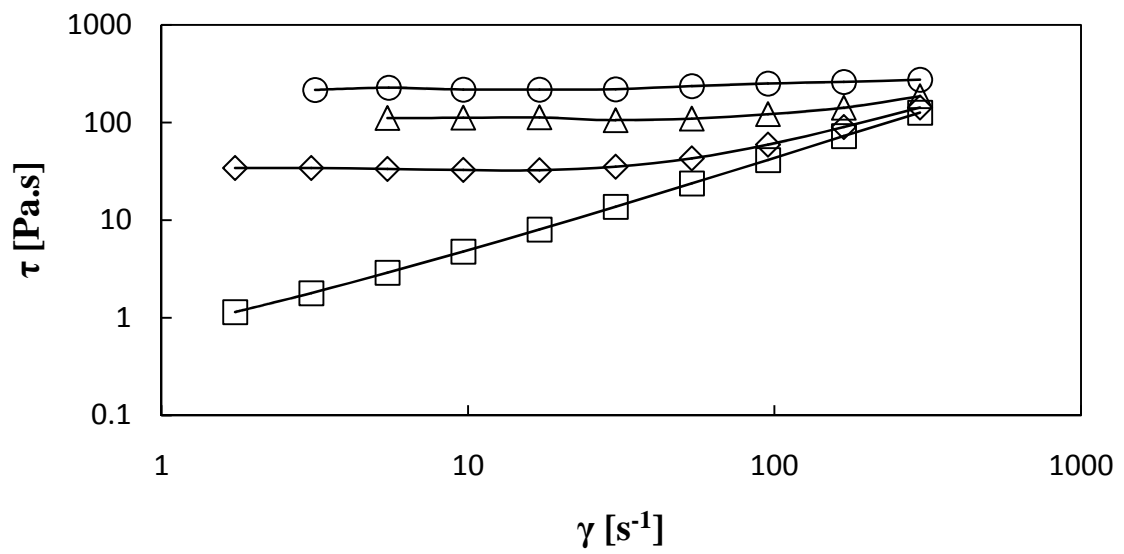
Obr. 19 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 3 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV \cdot mm^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



Obr. 20 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [kV.mm⁻¹]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



Obr. 21 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 5 v elektrickém poli o různé intenzitě E [kV.mm⁻¹]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



Obr. 22 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 6 v elektrickém poli o různé intenzitě E [kV.mm⁻¹]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3

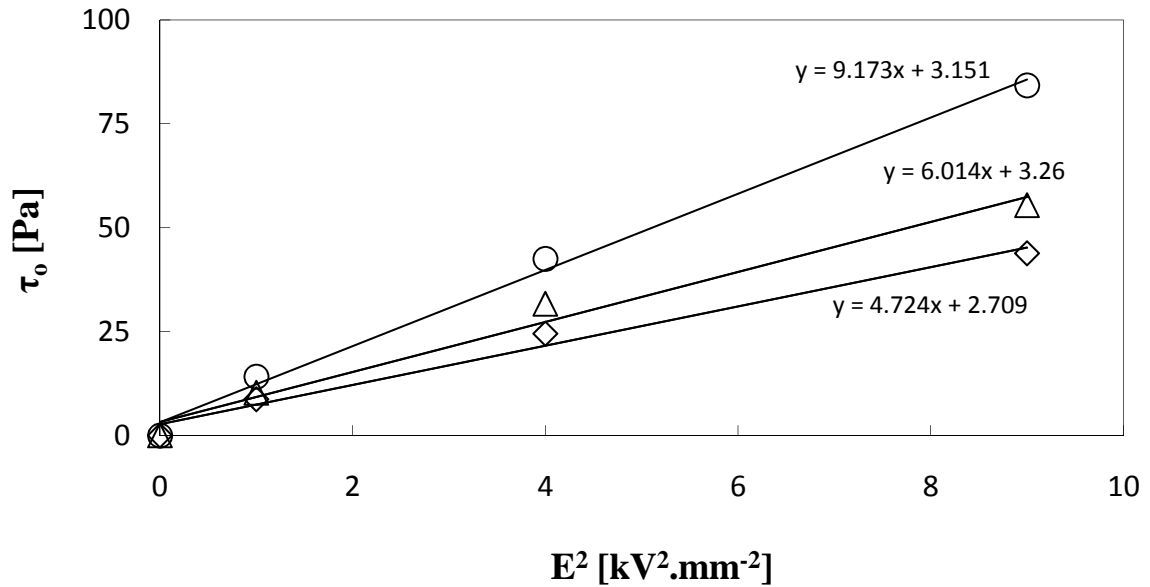
Tabulka 3 znázorňuje odečtené hodnoty prahových napětí u jednotlivých sledovaných vzorků suspenzí. Prahové napětí bylo odečteno extrapolací smykového napětí na nulovou hodnotu rychlosti smykové deformace v obr. 17 – 22. Z tabulky 3 je patrné, že výrazně silnější ER efekt měřený velikostí prahového napětí je u vzorků suspenzí obsahujících protonovaný PANI.

Tabulka 3 Hodnoty prahového napětí extrapolovaného na nulovou hodnotu smykové deformace pro různé intenzity elektrického pole

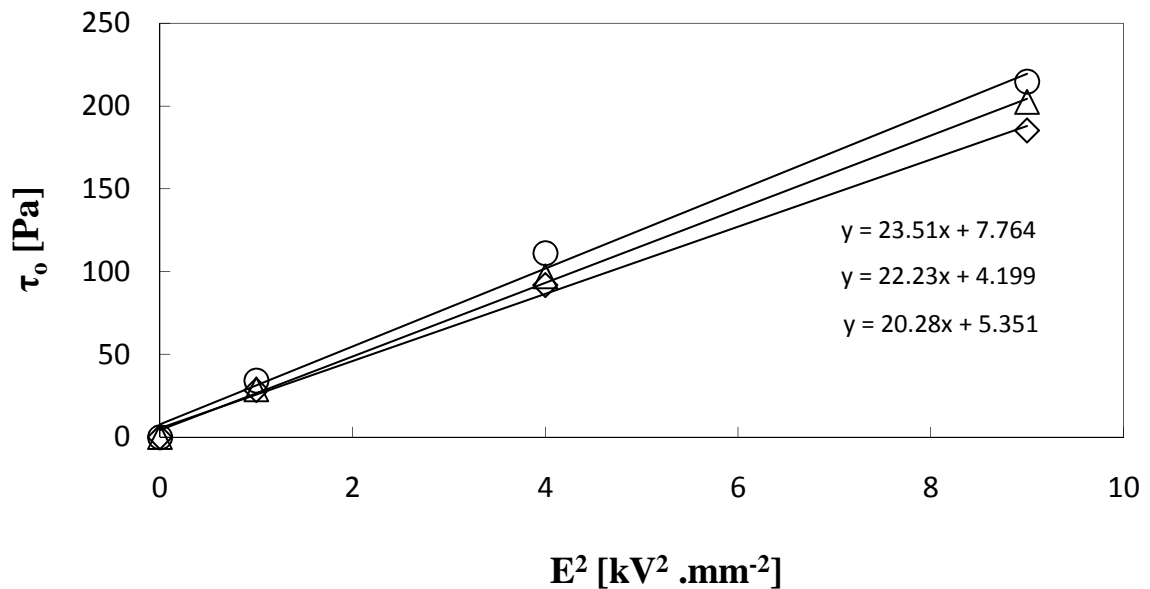
Vzorek	E [kV.mm ⁻¹]	τ_0 [Pa]
č. 1	1	8,685
	2	24,48
	3	43,81
č. 2	1	10,24
	2	31,64
	3	55,36
č. 3	1	14,21
	2	42,5
	3	84,32
č. 4	1	28,38
	2	91,72
	3	185,26
č. 5	1	28,78
	2	96,97
	3	202,4
č. 6	1	34,15
	2	111,2
	3	214,9

Závislost prahového napětí na intenzitě elektrického pole je znázorněna na obr. 23 a 24. První z nich je pro vzorky suspenzí s PANI bází a druhý pro vzorky suspenzí protonovaného PANI. Z obr. 23 je patrné, že směrnice závislosti vzrůstá s viskozitou použitého oleje, v případě suspenzí s PANI bází. Naproti tomu u protonovaného PANI (obr. 24), kde je ER efekt silnější, tj. pevnost struktur indukovaných elektrickým polem je větší, se tato

směrnice s viskozitou oleje téměř nemění. Hodnota směrnice vyjadřuje citlivost systému na působení elektrického pole, schopnost vytvářet pevné řetízkové struktury, a ta je vyšší u protonovaného PANI.

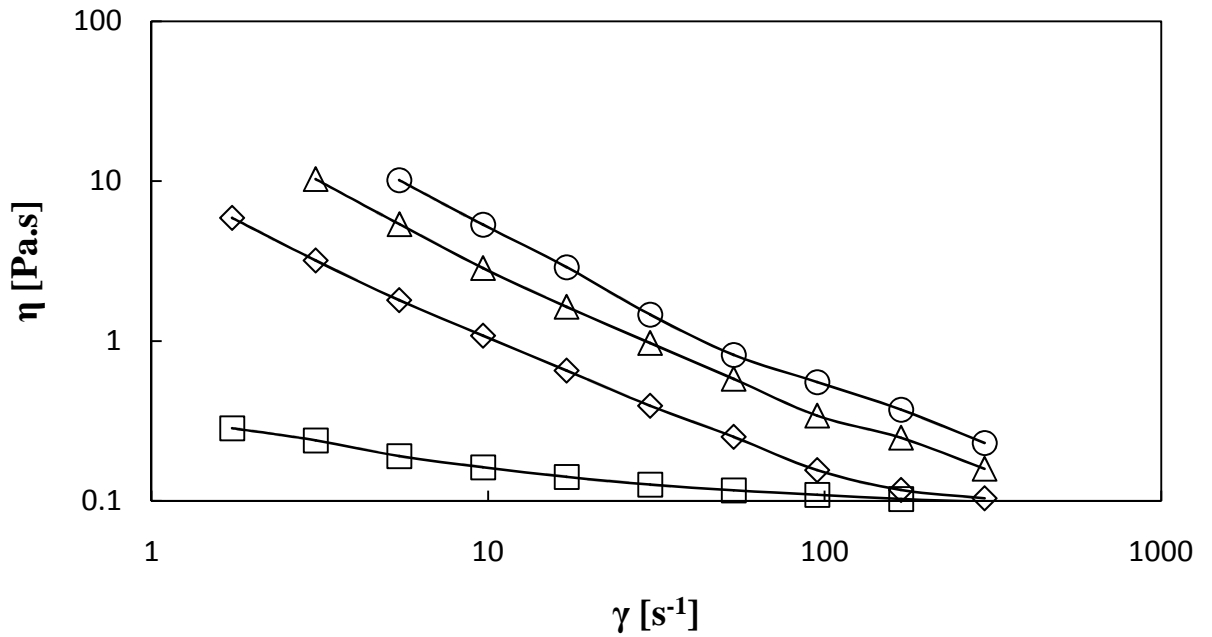


Obr. 23 Závislost extrapolovaného prahového napětí τ_0 na intenzitě elektrického pole E pro PANI bázi v různých olejích: \diamond SO 50, Δ SO 100, \circ SO 200

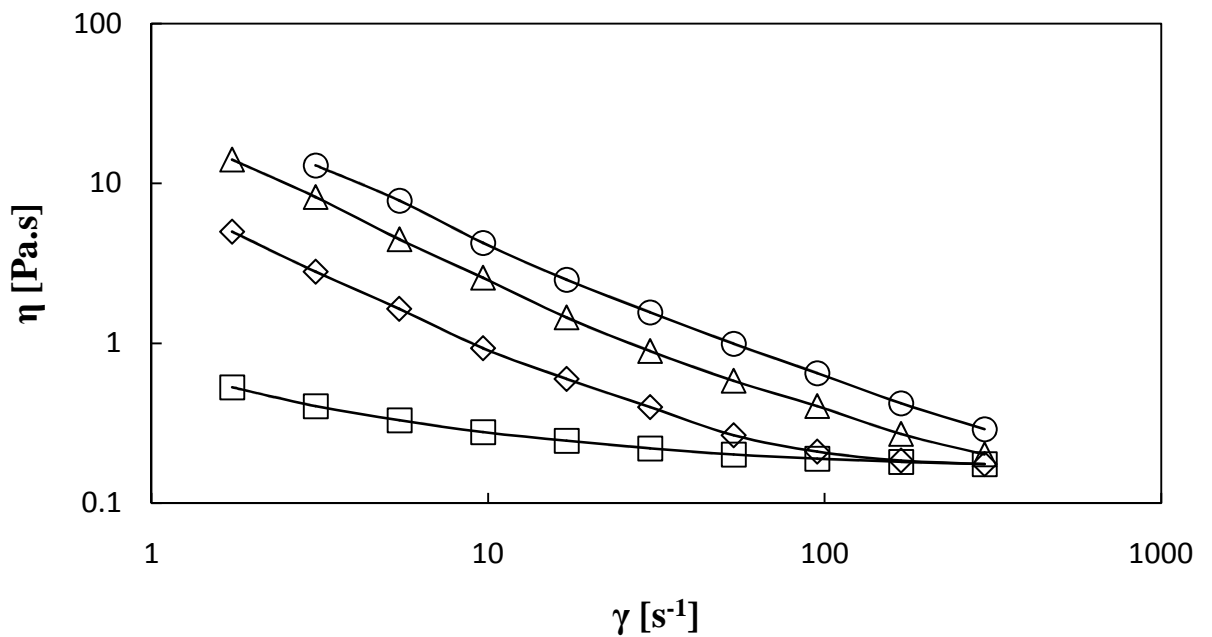


Obr. 24 Závislost extrapolovaného prahového napětí τ_0 na intenzitě elektrického pole E pro protonovaný PANI v různých olejích: \diamond SO 50, Δ SO 100, \circ SO 200

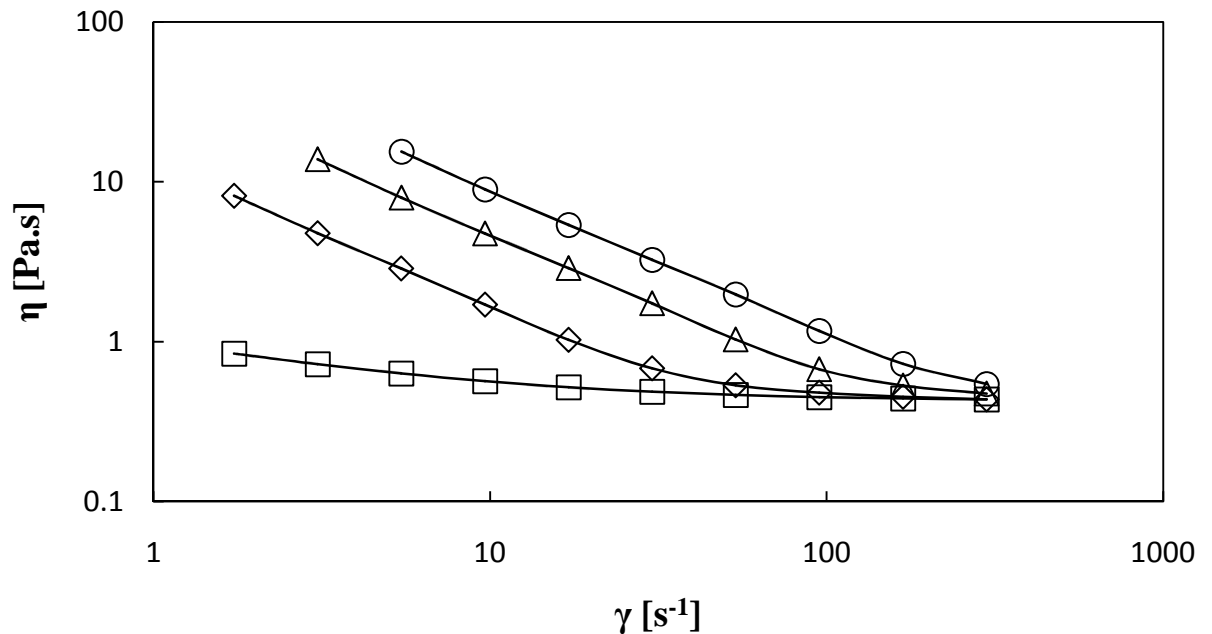
Na obr. 25 – 30 je znázorněna závislost viskozity na rychlosti smykové deformace, pro jednotlivé suspenze v různě silných elektrických polích.



Obr. 25 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 1 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3

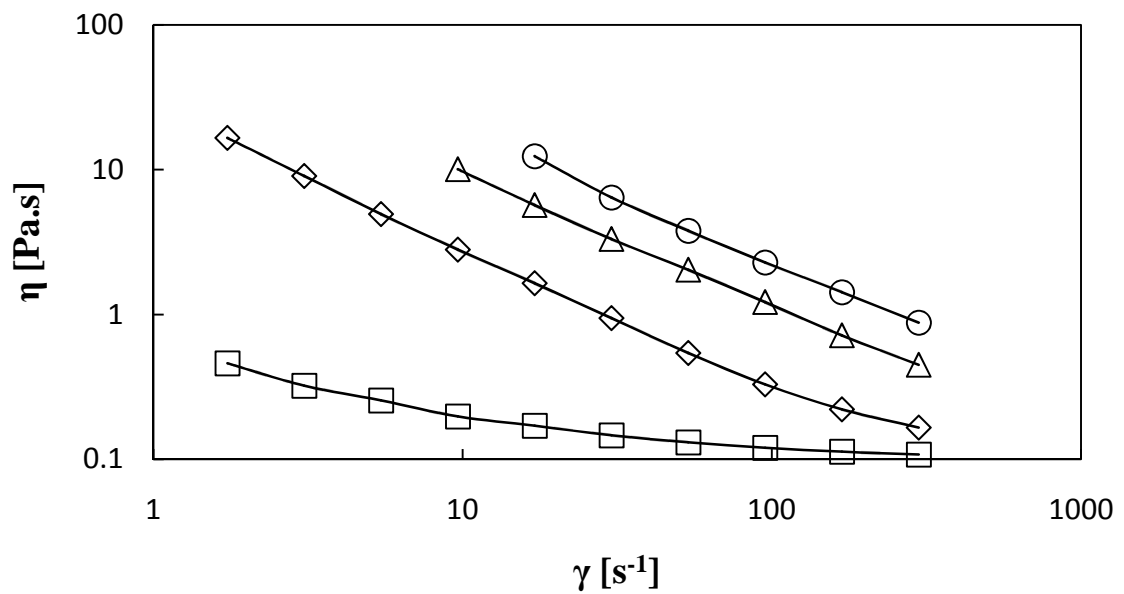


Obr. 26 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3

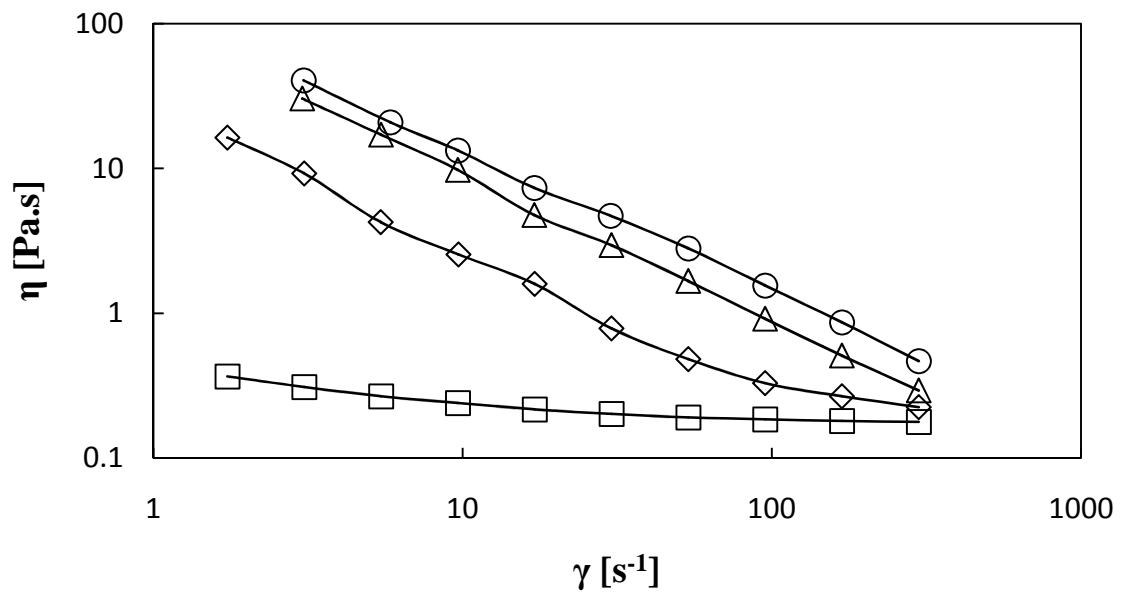


Obr. 27 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 3 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV.mm^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3

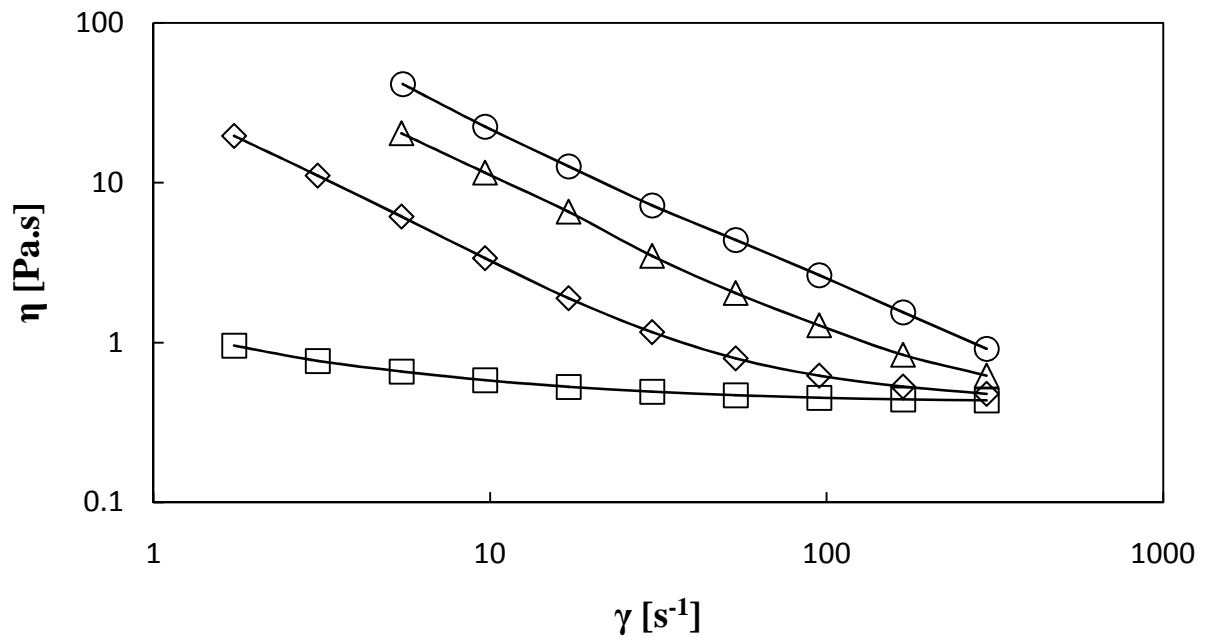
Bez působení vnějšího elektrického pole se suspenze chovají jako téměř Newtonské kapaliny. V elektrickém poli dochází ke zvýšení viskozity především v oblasti nízkých rychlostí smykových deformací. S rostoucí rychlostí smykové deformace se pak viskozita snižuje. Suspenze tak vykazují značně pseudoplastické chování. Suspenze obsahující PANI bázi vykazují slabší ER efekt než suspenze s protonovaným PANI. Pokles viskozity se zvýšenou rychlostí smykové deformace je způsobován narůstajícími hydrodynamickými silami, které překonávají síly elektrostatické. Následně se viskozita v poli srovná s viskozitou bez pole při dosažení kritické rychlosti smykové deformace γ_{krit} . Hodnota kritické rychlosti smykové deformace se mění s polarizovatelností částic, kdy u protonovaného PANI je vyšší než u báze, což je ovlivněno silnějšími elektrostatickými silami. Kritická rychlost smykové deformace je také závislá na viskozitě použitého oleje, kde použité médium s rostoucí viskozitou posouvá γ_{krit} do oblasti nižších hodnot rychlostí smykové deformace.



Obr. 28 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV \cdot mm^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3

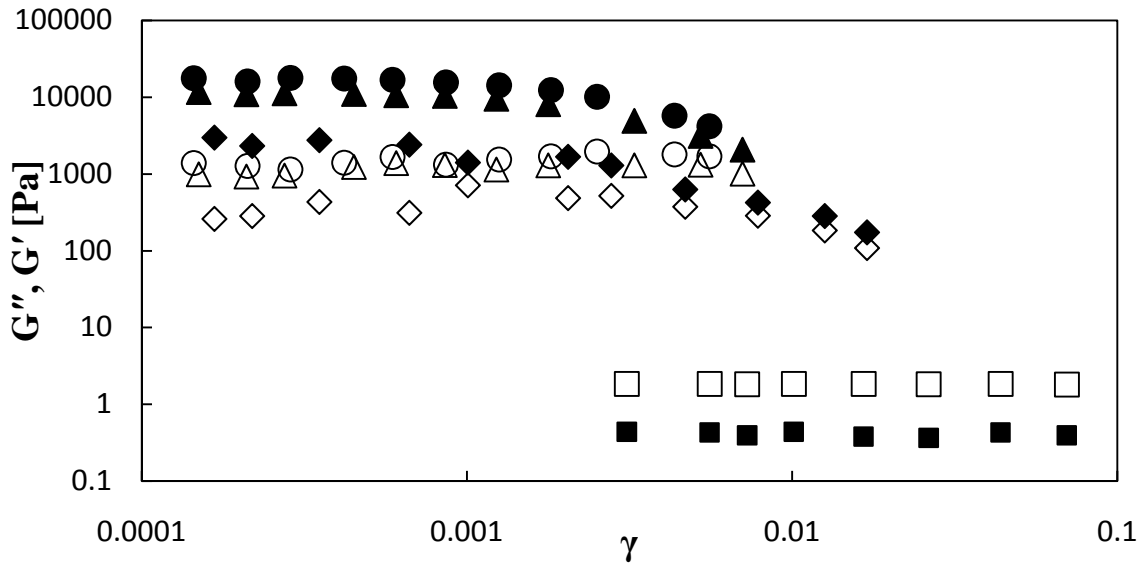


Obr. 29 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 5 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV \cdot mm^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3

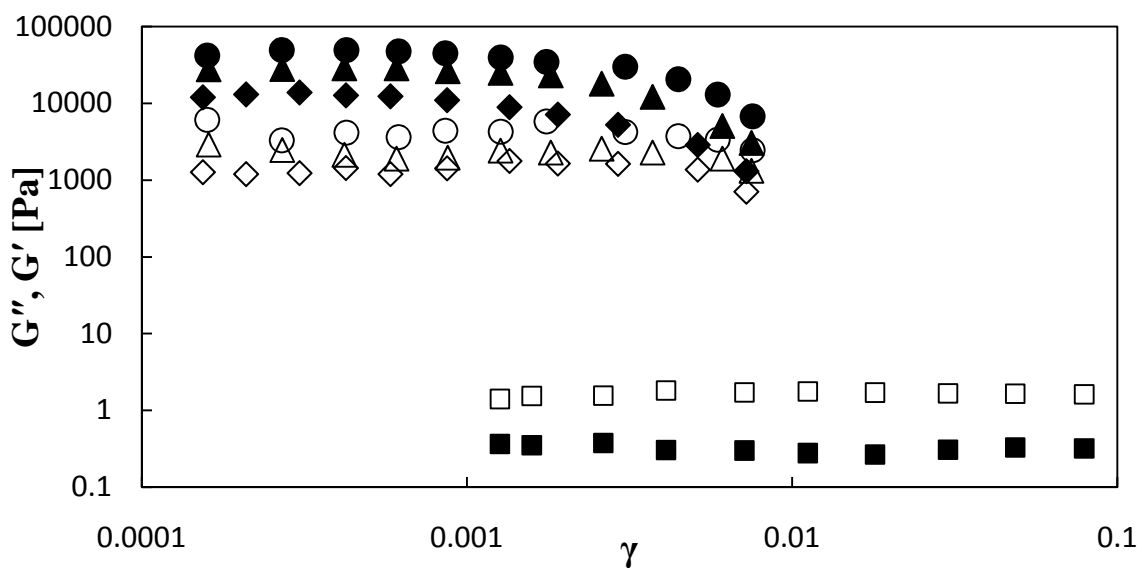


Obr. 30 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 6 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV.mm^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3

Obr. 31 a 32 znázorňují závislosti viskoelastických modulů G' a G'' na amplitudě deformace. Pro ilustraci byly vybrány suspenze PANI báze a protonovaného PANI v SO o viskozitě 100 mPa.s (vzorky č. 2 a 4), u ostatních suspenzí byly průběhy obdobné. Bez vlivu elektrického pole se suspenze chová jako kapalina, ztrátový modul G'' je vyšší než soufázový modul G' . Oba moduly jsou nezávislé na amplitudě v měřeném rozsahu. Vlivem elektrického pole se charakter suspenzí mění. Soufázový modul G' je vyšší než ztrátový G'' a průběh obou vykazuje plató v oblasti malých deformací následované poklesem. Oblast deformací, ve které jsou viskoelastické moduly nezávislé na deformaci, představují tzv. oblast lineární viskoelasticity. Z obr. 31 a 32 je patrné, že tato oblast je podstatně kratší při vystavení suspenzí elektrickému poli.



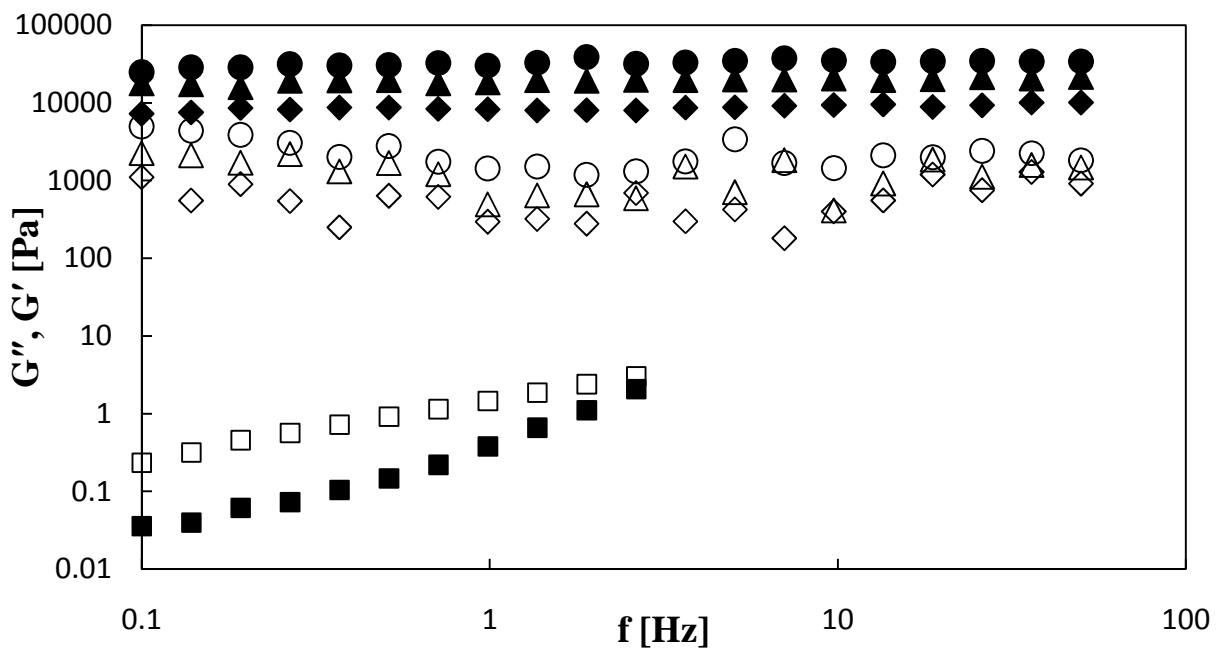
Obr. 31 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na amplitudě deformace γ u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



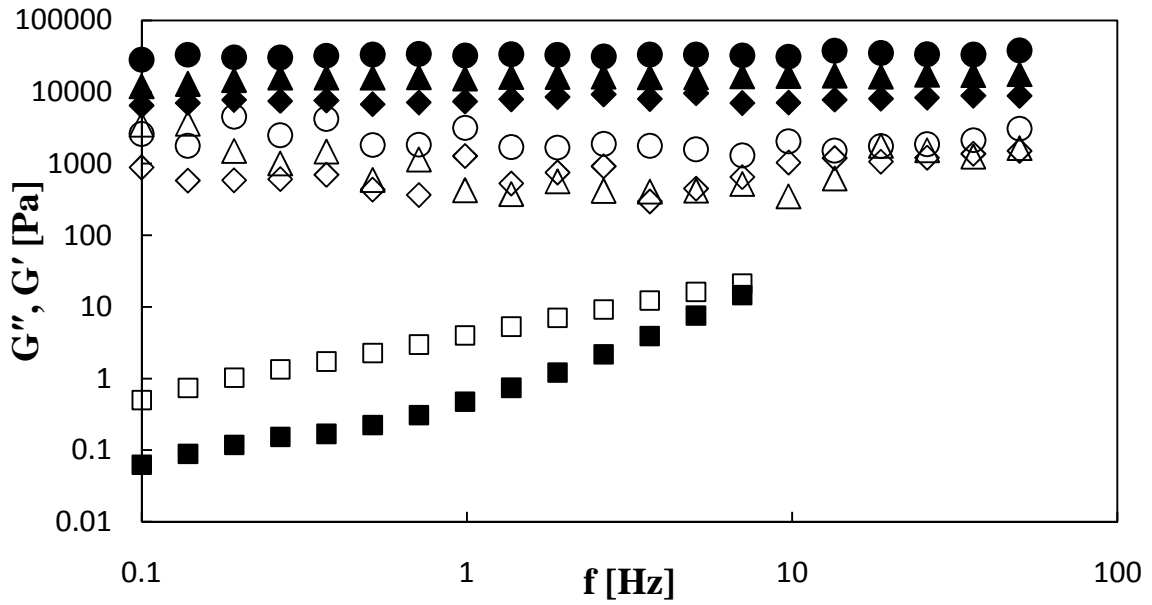
Obr. 32 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na amplitudě deformace γ u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3

Na základě stanovení oblasti lineární viskoelastivity byla zvolena vhodná amplituda deformace jako $5 \cdot 10^{-4}$. Při této amplitudě deformace byla provedena měření viskoelastických modulů G' a G'' ve frekvenčním rozsahu 0,1 – 50 Hz. Dosažené výsledky jsou uvedeny na obr. 33 – 38. Bez vlivu elektrického pole u všech studovaných vzorků převládá vis-

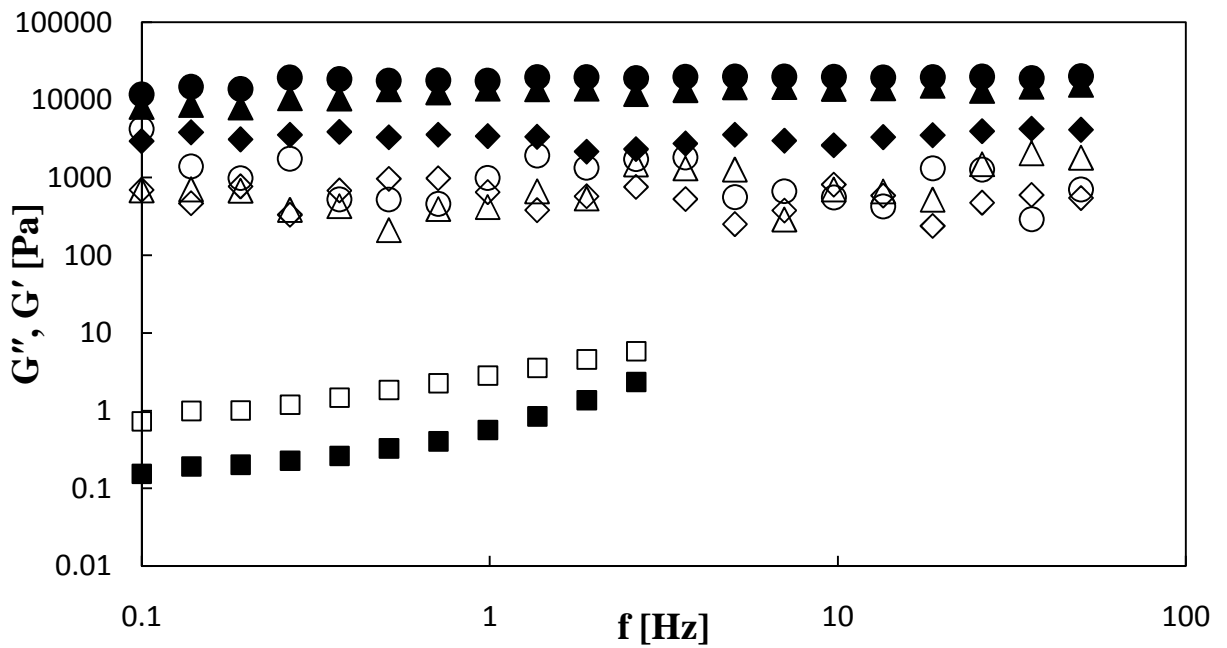
kózní charakter kapalin, ztrátový modul G'' je větší než soufázový G' a oba moduly mírně vzrůstají s frekvencí. Vlivem vnějšího elektrického pole se pak charakter mění očekávaným způsobem. Vytvoření struktur a částic vzájemně se přitahujících elektrostatickými silami má za následek ztuhnutí suspenze. To se projevuje několikanásobným (cca o šest řádů) vzrůstem obou modulů, zejména však vzrůstem soufázového G' . Tento modul zohledňuje tuhost vytvořených struktur. Jeho velikost vzrůstá s použitou intenzitou elektrického pole a díky vyšší polarizovatelnosti částic dosahuje vyšších hodnot u suspenzí protonovaného PANI.



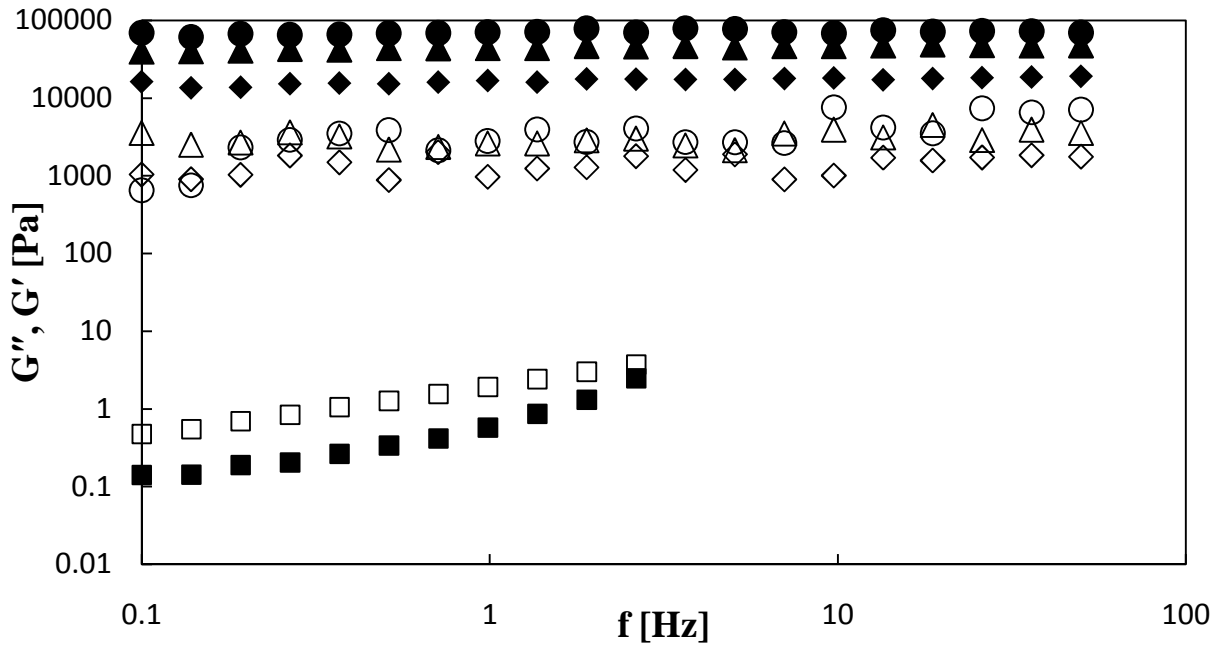
Obr. 33 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 1 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



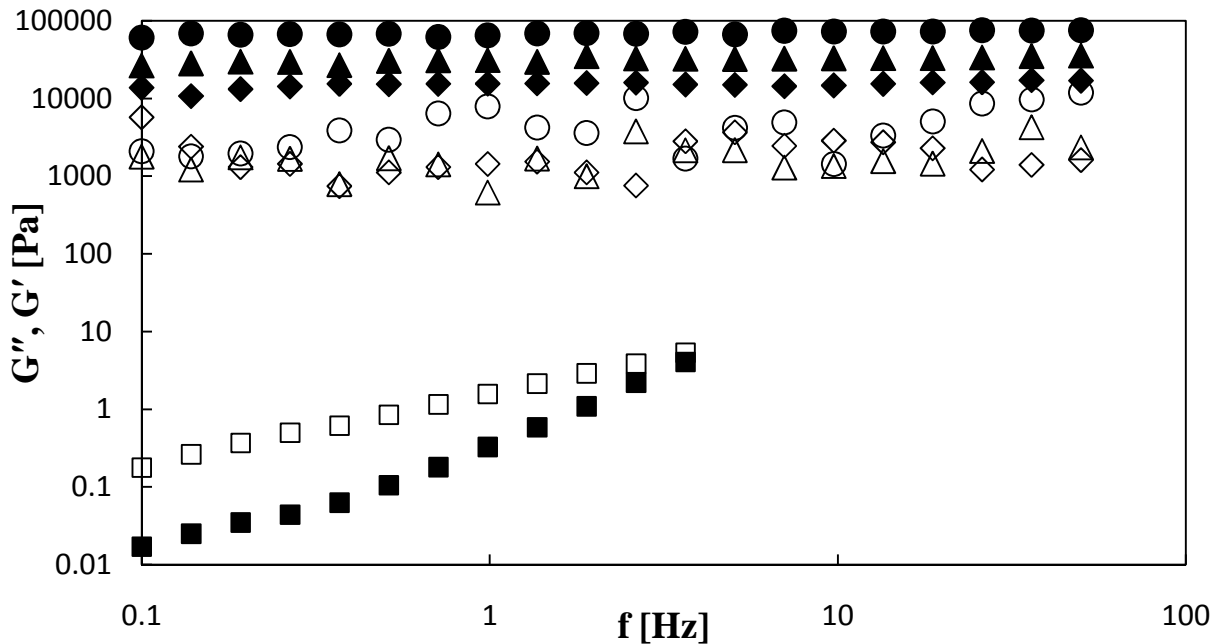
Obr. 34 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



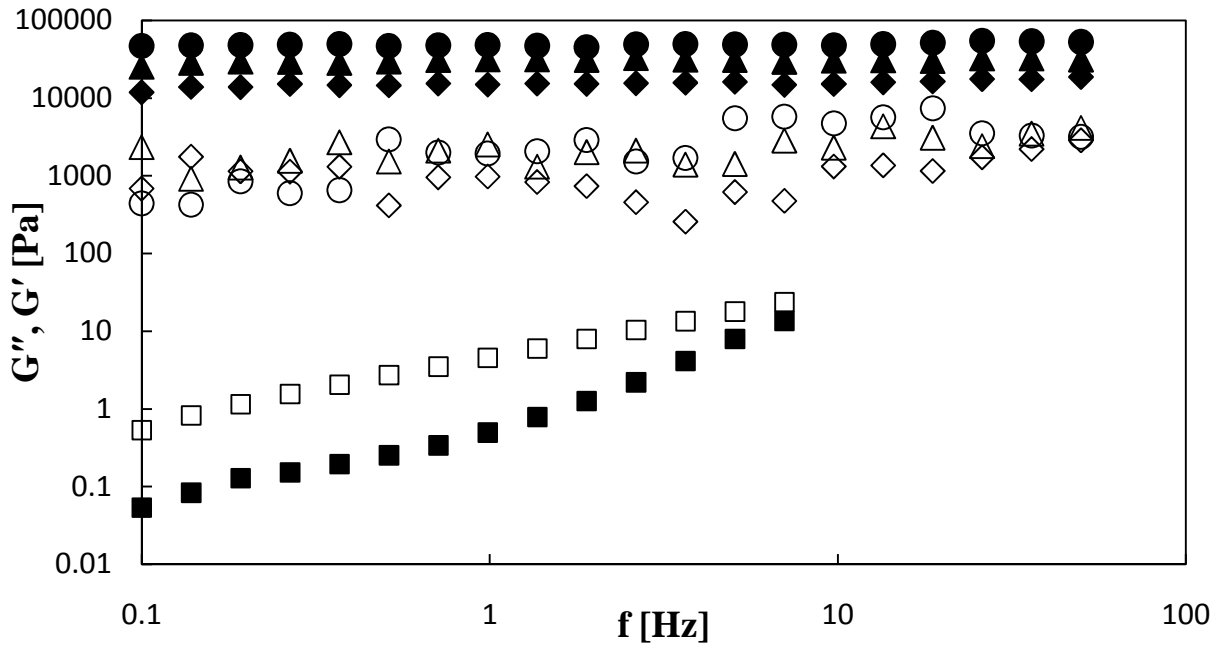
Obr. 35 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 3 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3



Obr. 36 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, \triangle 2, \circ 3



Obr. 37 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 5 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, \triangle 2, \circ 3



Obr. 38 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a souřazového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 6 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, \triangle 2, \circ 3

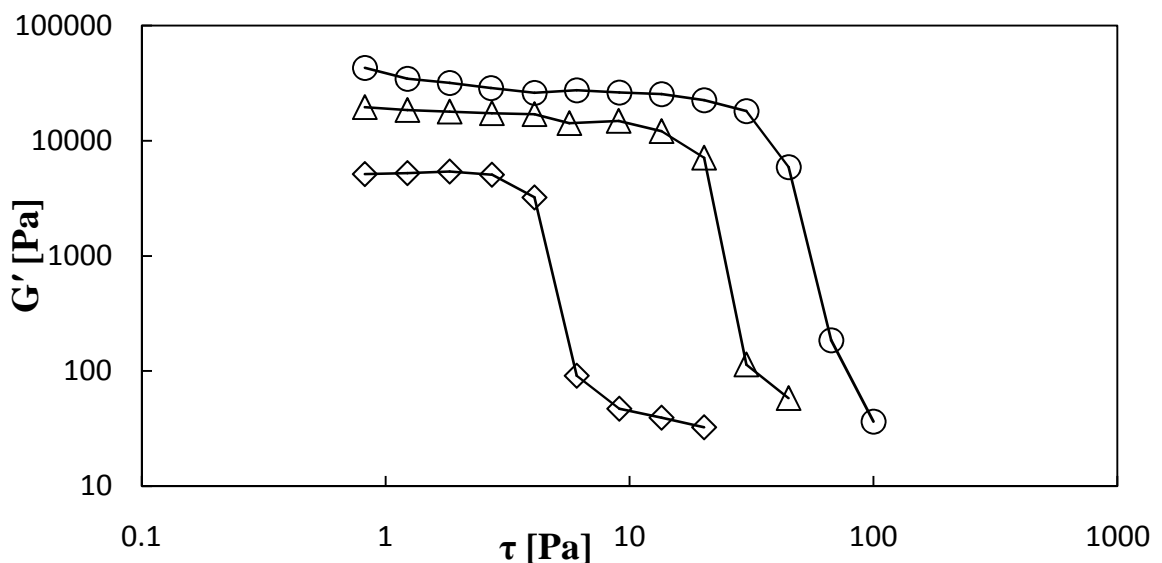
Tabulka 4 sumarizuje odečtené hodnoty souřazového modulu G' u jednotlivých studovaných suspenzí při různých intenzitách elektrického pole. Z tabulky je patrné, že souřazový modul G' je dosti závislý na viskozitě použitého oleje tvořícího disperzní fázi suspenzí. Tuhost systémů klesá s rostoucí viskozitou oleje. Tento trend je pozorován, jak u suspenzí PANI báze, tak u suspenzí protonovaného PANI.

Tabulka 4 Hodnoty soufázového modulu G' pro frekvenci $f = 1$ Hz pro různé intenzity elektrického pole

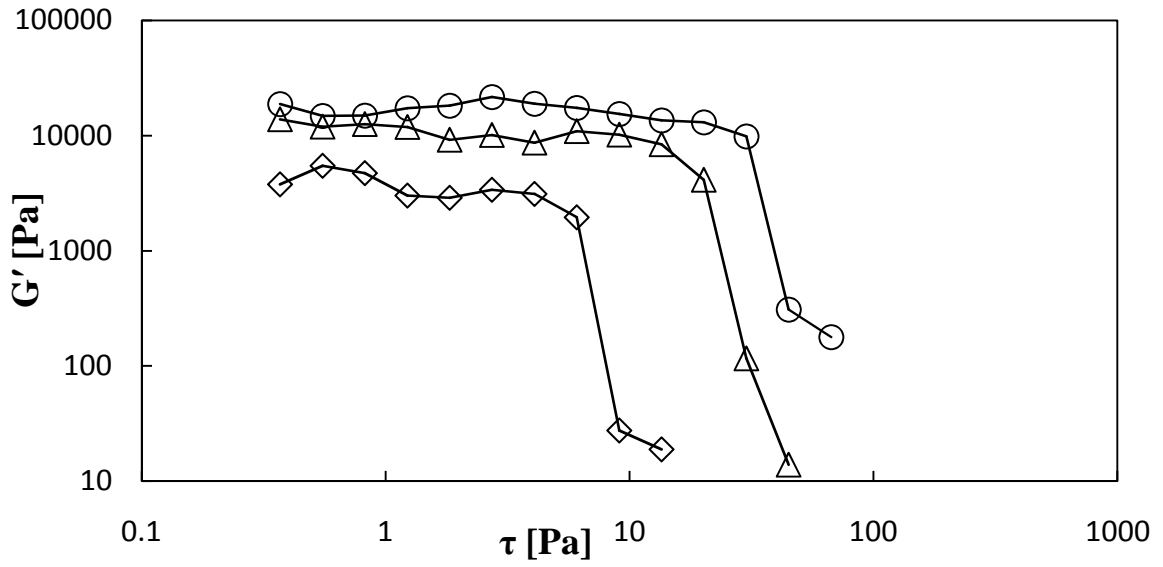
Vzorek	E [kV.mm ⁻¹]	G' [Pa]
č. 1	0	0,3789
	1	8245
	2	18460
	3	32430
č. 2	0	0,4746
	1	7412
	2	15540
	3	30210
č. 3	0	0,5638
	1	3420
	2	13960
	3	17680
č. 4	0	0,3262
	1	16830
	2	43760
	3	70900
č. 5	0	0,5747
	1	15520
	2	31310
	3	65020
č. 6	0	0,4983
	1	14960
	2	31500
	3	48490

Pomocí oscilačního měření je možné stanovit statické prahové napětí. Tento postup je také vhodnější, protože reflektuje okamžik, kdy začne struktura téci [45].

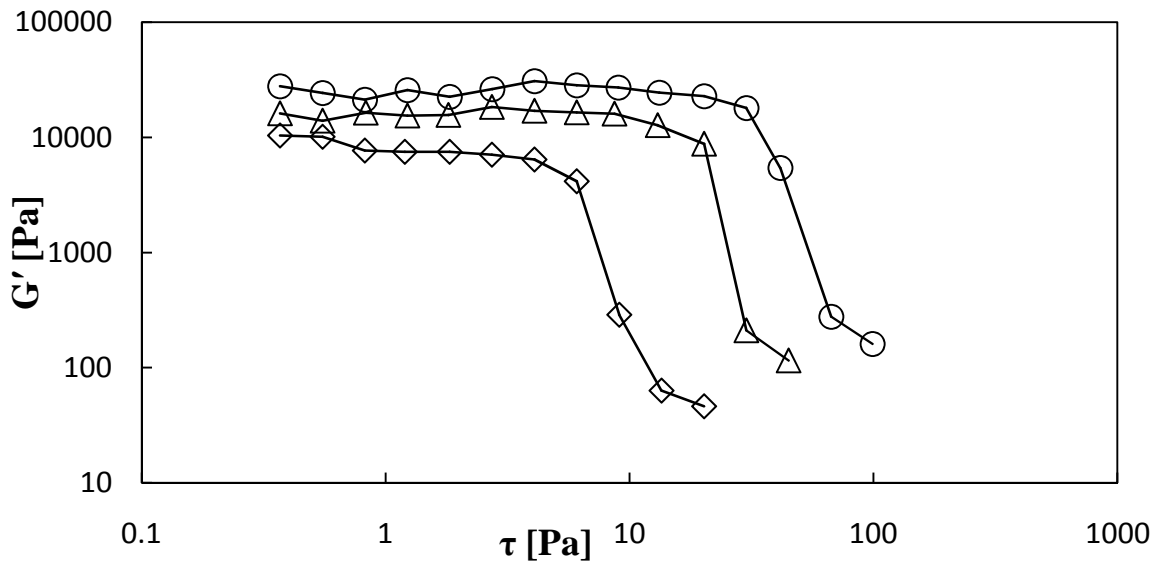
Měření se provádí tak, že se postupně mění amplituda vyvozeného smykového napětí a statické prahové napětí je pak spojeno s okamžikem poklesu soufázového modulu G' . Výsledky těchto měření jsou znázorněny na obr. 39 – 44, ve kterých je patrné, že hodnota statického prahového napětí se zvyšuje s rostoucí intenzitou elektrického pole a je vyšší u suspenzí protonovaného PANI. Odečtené hodnoty jsou pak v tabulce 5. Z dosažených výsledků je patrné, že hodnota statického prahového napětí se mění jen málo s viskozitou použitého oleje jako disperzního prostředí suspenzí. Stanovené hodnoty statického prahového napětí jsou výrazně menší než v případě vyhodnocení extrapolací na nulovou hodnotu rychlosti smykové deformace z tokových křivek uvedených na obr. 17 – 22. Důvodem je tedy pravděpodobně příspěvek viskozity disperzního prostředí, který je významný při reologických měřeních, kdy geometrie vykonává rotační pohyb a měřené smykové napětí tak zohledňuje i viskozitu použitého oleje. V oscilačních měřeních díky malým deformacím se pak uplatňuje zejména vytvořená ER struktura.



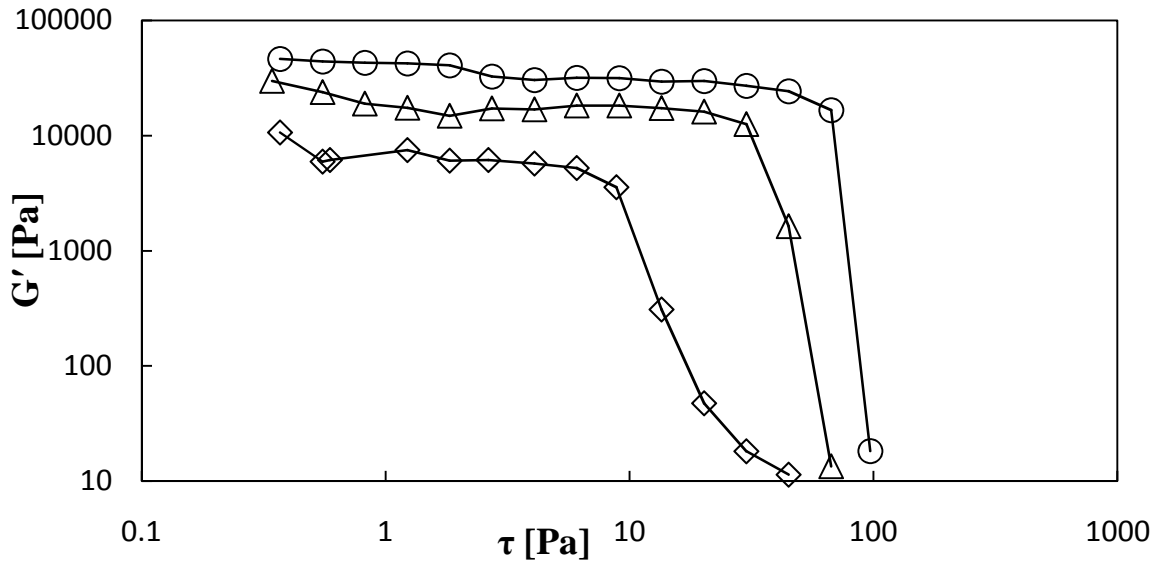
Obr. 39 Závislost soufázového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 1 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3



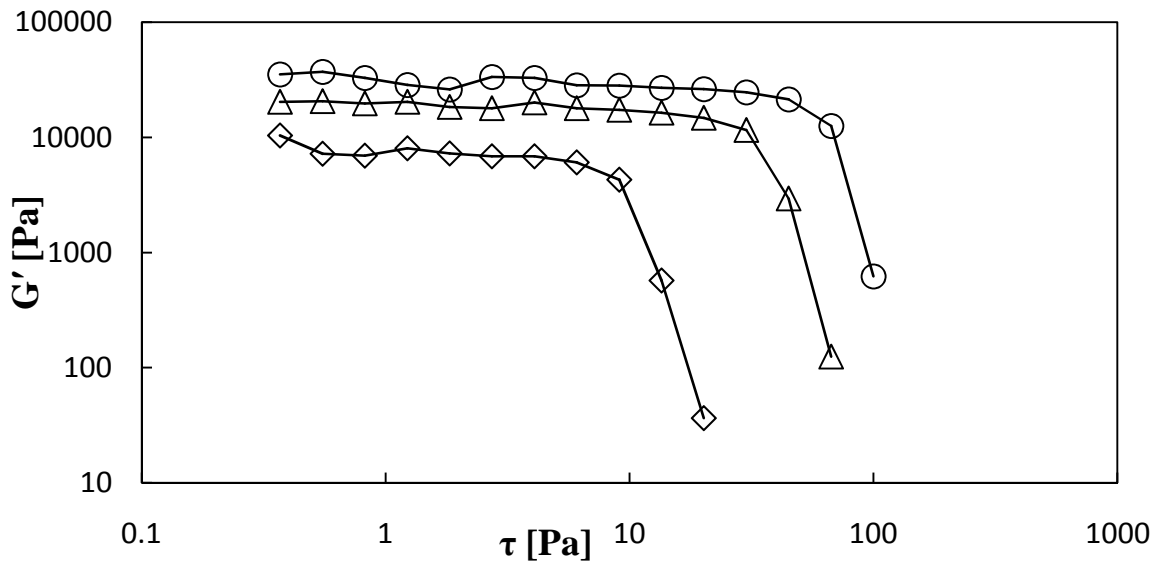
Obr. 40 Závislost souřásového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV \cdot mm^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3



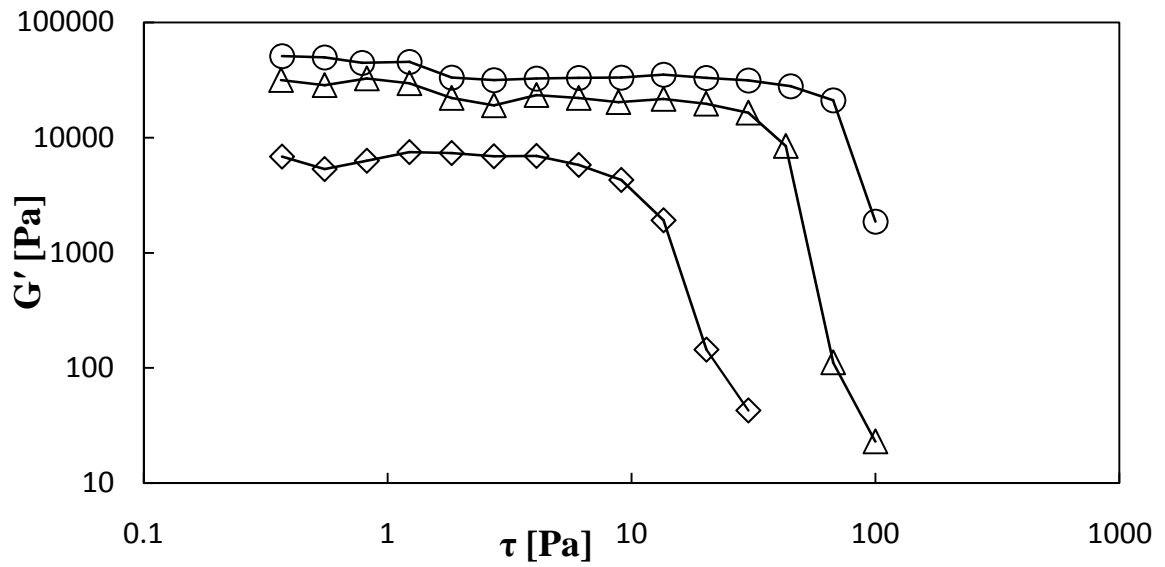
Obr. 41 Závislost souřásového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 3 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV \cdot mm^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3



Obr. 42 Závislost souřásového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV \cdot mm^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3



Obr. 43 Závislost souřásového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 5 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$kV \cdot mm^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3



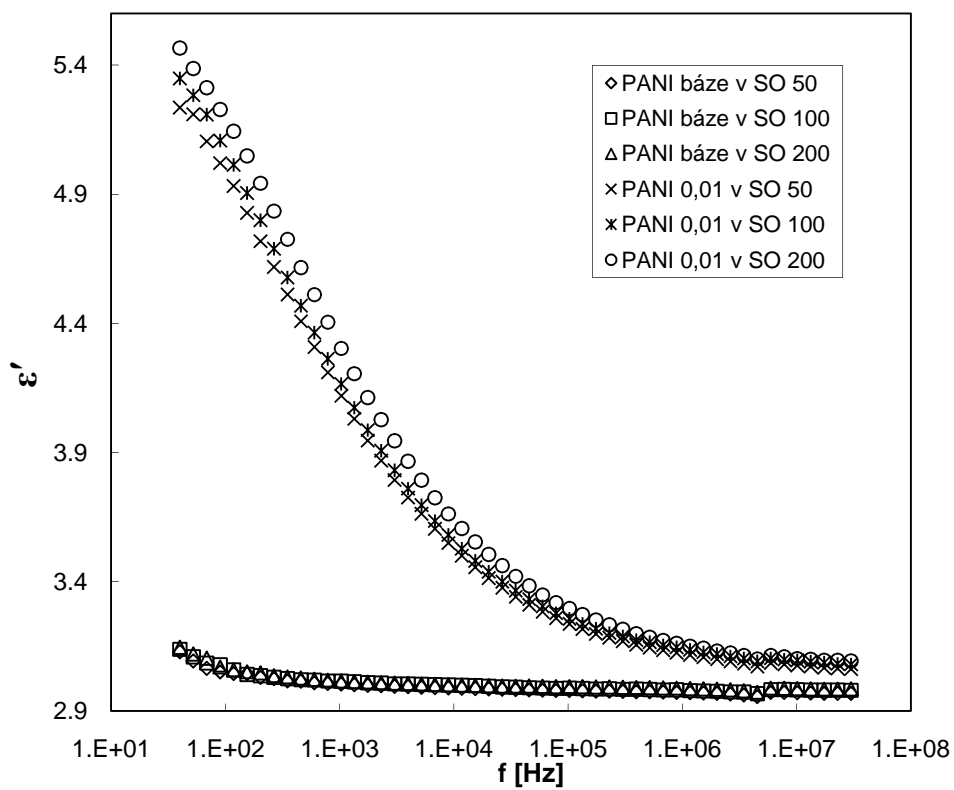
Obr. 44 Závislost souřáznového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 6 v elektrickém poli o různé intenzitě E [kV.mm⁻¹]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3

Tabulka 5 Hodnoty statického prahového napětí pro různé intenzity elektrického pole stanovené z viskoelastických měření

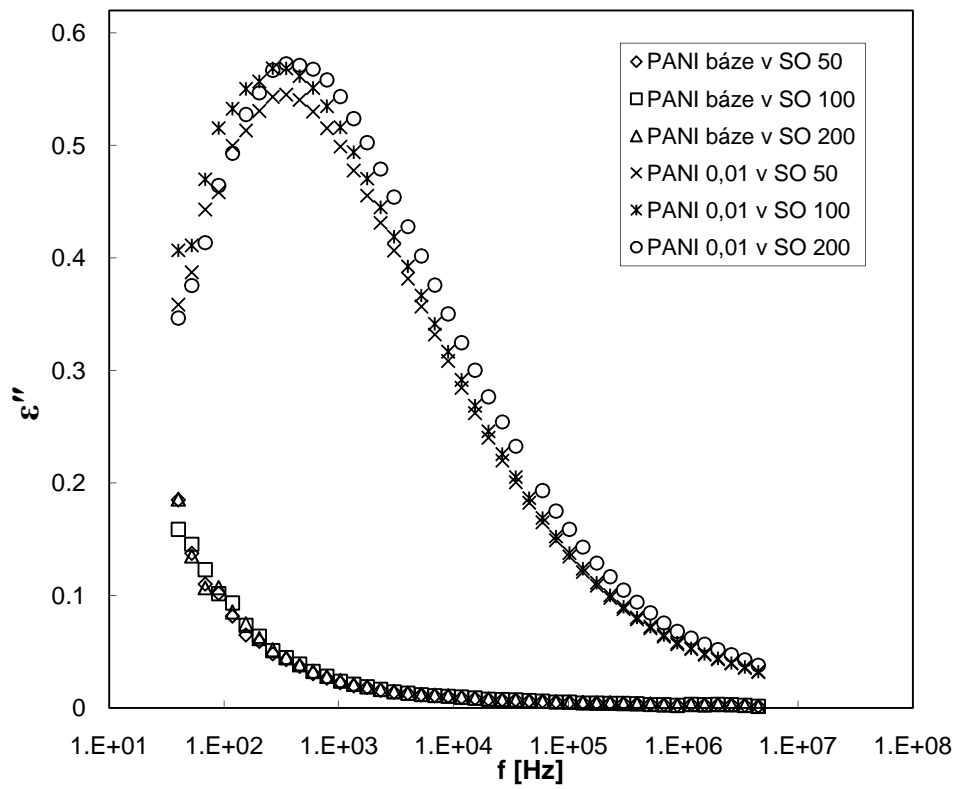
Vzorek	E [kV.mm ⁻¹]	τ_0 [Pa]
č. 1	1	4
	2	20
	3	40
č. 2	1	6
	2	20
	3	30
č. 3	1	6
	2	20
	3	40
č. 4	1	8
	2	30
	3	60
č. 5	1	9
	2	35
	3	60
č. 6	1	12
	2	40
	3	67

8.2 Dielektrické chování

Na následujících obr. 45 a 46 jsou znázorněny závislosti dielektrických vlastností, jako jsou permitivita ϵ' a ztrátový faktor ϵ'' na frekvenci. Suspenze obsahující PANI bázi vykazují podstatně nižší permitivitu než suspenze obsahující protonovaný PANI, což má za následek také nižší ER efekt pozorovaný v reologických a viskoelastických měřeních. Pozice maxima ztrátového faktoru se posouvá k vyšším frekvencím v případě protonace PANI. Je to potvrzení silnější mezifázové polarizace, což odpovídá také pozorovanému intenzivnějšímu ER efektu. Použití SO o různých viskozitách nemá na dielektrické vlastnosti suspenzí významnější vliv.



Obr. 45 Závislost permitivity ϵ' na frekvenci f



Obr. 46 Závislost ztrátového faktoru ϵ'' na frekvenci f

ZÁVĚR

V diplomové práci byly studovány suspenze dvou vzorků PANI lišících se mírou protonace, které tvořily dispergovanou fázi a tři typů SO o rozdílné viskozitě, které tvořily disperzní prostředí. Protonace pomocí kyseliny fosforečné výrazně zvyšovala vodivost PANI a použité vzorky se ve vodivosti lišily o cca 4 řády. Tato skutečnost se pak projevila v různě silném ER efektu při vystavení suspenzí vnějšímu elektrickému poli, která byla popisována změnou reologických a viskoelastických vlastností. Diskutován byl také vliv viskozity dispersního prostředí.

Měřením reologických vlastností suspenzí bylo zjištěno, že vlivem elektrického pole se mění charakter tokového chování z téměř Newtonského na Binghamské vyznačující se prahovým napětím. Hodnota prahového napětí stanovená extrapolací na nulovou rychlost smykové deformace se zvyšuje s intenzitou elektrického pole a s mírou protonace PANI použitého jako dispergované fáze. Na prahové napětí zjištěné touto metodou má vliv viskozita SO, zejména u suspenzí obsahujících PANI bázi.

Viskoelastické vlastnosti suspenzí byly ovlivněny jak protonací PANI, tak viskozitou použitého silikonového oleje. Oblast lineární viskoelasticity se vlivem elektrického pole, které indukuje strukturální změny suspenzí, posouvá do oblasti velmi nízkých deformací. Viskoelastické moduly, soufázový G' a ztátový G'' , se významně mění. V elektrickém poli je dominantní soufázový modul G' , jako projev elasticity struktur. Vyšších hodnot je dosaženo u suspenzí protonovaného PANI. S rostoucí viskozitou použitého silikonového oleje se soufázový modul G' snižuje u suspenzí obou vzorků PANI.

Pro srovnání možných postupů ve stanovení prahového napětí byla využita kromě rotačních měření také měření oscilační. Statické prahové napětí, stanovené z oscilačních měření, je výrazně nižší než prahové napětí stanovené z měření rotačních. Viskozita použitého silikonového oleje ovlivňuje statické prahové napětí jen velmi málo.

Dielektrické vlastnosti se výrazně mění s protonací PANI a jsou reflektovány ve výsledcích reologických i viskoelastických měření. S protonací se maximum píku ztrátového faktoru ε'' posouvá do vyšších hodnot frekvencí, tj. zkracuje se relaxační čas systému. Typ použitého silikonového oleje na dielektrické vlastnosti suspenzí neměl výraznější vliv.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Parmar, K.P.S.; Méheust, Y.; Schjelderupsen, B.; Fossum, J.O.: Electrorheological suspensions of laponite in oil: Rheometry studies, *Langmuir*, 24, 2008, 1814 – 1822.
- [2] Parthasarathy, M.; Klingenberg, D.J.: Electrorheology: mechanisms and models, *Journal of Materials Science and Engineering*, R17, 1996, 57 – 103.
- [3] Kim, D.H.; Kim, Y.D.: Electrorheological properties of polypyrrole and its composite ER fluids, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13, 2007, 879 – 894.
- [4] Winslow, W.M.: Methods and means of translating electrical impulse into mechanical force, US Patent 21 47 750, 1947.
- [5] 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.
- [6] T. Hao, *Electrorheological fluids: The non aqueous suspensions*, 1st ed., Cambridge, Massachusetts, USA, 2005, ISBN 978-0-444-52180-4.
- [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] Huang, X.X.; Wen, W.; Yang, S.; Sheng, P.: Mechanisms of the giant electrorheological effect, *Solid State Communications*, 139, 2006, 581 – 588.
- [9] Hao, T.; Kawai, A.; Ikazaki, F.: Dielectric criteria for the electrorheological effect, *Langmuir*, 15, 1999, 918 – 921.
- [10] Wu, C.W.; Conrad, H.: Negative electrorheological effect and electrical properties of a Teflon/silicone oil suspension, *Journal of Rheology*, 41, 1997, 267 – 281.
- [11] Boissy, C.; Atten, P.; Foulc, J.-N.: On a negative electrorheological effect, *Journal of Electrostatics*, 35, 1995, 13 – 20.

- [12] Fujita, T.; Mochizuki, J.; Lin, I.J.: Viscosity of electrorheological magneto-dielectric fluid under electric and magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 122, 1993, 29 – 33.
- [13] Minagawa, K.; Watanabe, T.; Munakata, M.; Koyama, K.: A novel apparatus for rheological measurements of electro-magneto-rheological fluids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 52, 1994, 59 – 67.
- [14] Minagawa, K.; Watanabe, T.; Koyama, K.; Sasaki, M.: Significant synergistic effect of superimposed electric and magnetic fields on the rheology of iron suspension, *Langmuir*, 10, 1994, 3926 – 3928.
- [15] Koyama, K.; Minagawa, K.; Watanabe, T.; Kumakura, Y.; Takimoto, J.: Electro-magneto-rheological effects in parallel-field and crossed-field systems, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 58, 1995, 195 – 206.
- [16] Potůček, Z.; Sedlák, P.: *Smart materiály a jejich využití*, ČVUT Praha, 2007.
- [17] Hao, T.: Electrorheological suspensions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 97, 2002, 1 – 35.
- [18] Wu, Q.; Zhao, B.Y.; Chen, L.S.; Fang, C.; Hu, K.A.: Preparation and electrorheological property of rare earth modified amorphous $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ gel electrorheological fluid, *Journal of Colloid and Interface Science*, 282, 2005, 493 – 498.
- [19] Wang, B.; Zhao, X.: Core/Shell nanocomposite based on the local polarization and its electrorheological behavior, *Langmuir*, 21, 2005, 6553 – 6559.
- [20] Cho, M.S.; Choi, H.J.; Chin, I.J.; Ahn, W.S.: Electrorheological characterization of zeolite suspensions, *Microporous and Mesoporous Materials*, 32, 1999, 233 – 239.
- [21] Sung, J.H.; Cho, M.S.; Choi, H.J.; Jhon, M.S.: Electrorheology of semiconducting polymers, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 10, 2004, 1217 – 1222.
- [22] Park, D.P.; Sung, J.H.; Kim, C.A.; Choi, H.J.; Jhon, M.S.: Synthesis and electrorheology of potato starch phosphate, *Journal of Applied Polymer Science*, 91, 2004, 1770 – 1773.
- [23] Prokeš, J.; Stejskal, J.; Omastková, M.: Polyanilin a polypyrrol – dva představitelé vodivých polymerů, *Chemické Listy*, 95, 2001, 484 – 492.

- [24] 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.
- [25] De Medeiros, D.W.O.; Dos Santos, D.S.; Dantas, T.N.C.; Pereira, M.R.; Giacometti, J.A.; Fonseca, J.L.C.: Zeta potential and doping in polyaniline dispersions, *Journal of Material Science*, 21, 2003, 251 – 257.
- [26] 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.
- [27] Malkin, A.Y.; Isayev, A.I.: *Rheology: concepts, methods and applications*, Toronto, Kanada, 2006, ISBN 1-895198-33-X.
- [28] Hwang, J.Y.; Cho, M.S.; Choi, H.J. Jhon, M.S.: Synthesis of polyaniline using stabilizer and its electrorheological properties, *Synthetic Metals*, 135, 2003, 21 – 22.
- [29] Cheng, Q.; Pavlínek, V.; Lengálová, A.; Li, C.; Belza, T.; Sába, P.: Electrorheological properties of new mesoporous material with conducting polypyrrole in mesoporous silica, *Microporous and Mesoporous Materials*, 94, 2006, 103 – 199.
- [30] Cho, M.S.; Choi, H.J.; Jhon, M.S.: Shear stress analysis of a semiconducting polymer based electrorheological fluid system, *Polymer*, 46, 2005, 11484 – 11488.
- [31] Hong, C.H.; Choi, H.J.: Comment on “Preparation and electrorheological properties of polyquin(2,3-b)acridine-12,14(5,7)dione-based suspensions”, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 295, 2007, 288 – 290.
- [32] Esmond, H.; See, H.: Identification of an ER fluid in unsteady flow with random electric field and solidification, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20, 2009, 205 – 215.
- [33] Song, X.; Lin, Y.: Study on electrorheological properties of novel polymer-Ce⁴⁺ complex, *Journal of Materials Science*, 41, 2006, 2055 – 2057.

- [34] Choi, H.J.; Cho, M.S.; Kim, J.W.; Kim, C.A.; Jhon, M.S.: A yield stress scaling function for electrorheological fluids, *Applied Physics Letters*, 78, 2001, 3806 – 3808.
- [35] Hong, C.H.; Sung, J.H.; Choi, H.J.: Effects of medium oil on electroresponsive characteristics of chitosan suspensions, *Journal of Colloid Polymer Science*, 287, 2009, 583 – 589.
- [36] Kim, J.W.; Cho, M.S.; Choi, H.J.; Kim, S.G.; Kim, C.A.; Jhon, M.S.: Electrorheological fluid characterization via a vertical oscillation rheometer, *Journal of Polymer Testing*, 20, 2001, 913 – 918.
- [37] Gunasekaran, S.; Ak, M.M.: *Cheese rheology and texture*, 2003, ISBN 1-58716-021-8.
- [38] Larson, R.G.: *The structure and rheology of komplex fluids*, USA, 1999, ISBN 0-19-512197-X.
- [39] Gercek, B.; Yavuz, M.; Yilmaz, H.; Sari, B.; Unal, H.I.: Comparison of electrorheological properties of some polyaniline derivatives, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 299, 2007, 124–132.
- [40] Klass, D.L.; Martinek, T.W.: Electroviscous fluids. 1. Rheological properties, *Journal of Applied Physics*, 38, 1967, 67 – &.
- [41] Klass, D.L.; Martinek, T.W.: Electroviscous fluids. 1. Electrical properties, *Journal of Applied Physics*, 38, 1967, 75 – &.
- [42] Block, H.; Kelly, J.P.; Qin, A.; Watson, T.: *Materials and Mechanisms in Electrorheology*, *Langmuir*, 6, 1990, 6 – 14.
- [43] Yin, J.; Zhao, X.: Electrorheological properties of titanate nanotube suspensions, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 329, 2008, 153 – 160.
- [44] Stěnička, M.; Pavlínek, V.; Sába, P.; Blinova, N.V.; Stejskal, J.; Quadrat, O.: The electrorheological efficiency of polyaniline particles with various conductivities suspended in silicone oil, *Journal of Colloid Polymer Science*, 287, 2009, 403 – 412.
- [45] Walls, H.J.; Caines, S.B.; Sanchez, A.M.; Khan, S.A.: Yield stress and wall slip phenomena in colloidal silica gels, *Journal of Rheology*, 47, 2003, 847 – 868.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ER	elektroreologický
E	intenzita elektrického pole
EMR	elektromagnetoreologický
MR	magnetoreologický
H	intenzita magnetického pole
BaTiO ₃	oxid titaničitobarnatý
TiO ₂	oxid titaničitý
PANI	polyanilin
PPy	polypyrol
EB	emeraldinová báze
ES	emeraldinová sůl
τ	smykové napětí
η	viskozita
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace
τ_y	prahové napětí
η_{pl}	plastická viskozita
t_1, t_2	časové konstanty
η_∞	smyková viskozita při nekonečné smykové rychlosti
β	exponent v rozsahu $0 \leq \beta \leq 1$
ϕ	objemový zlomek částic
ϵ_p	relativní permitivita částic
ϵ_m	relativní permitivita kapaliny
E_c	kritické elektrické pole
G'	soufázový modul

G''	ztrátový modul
G^*	komplexní modul
γ_0	amplituda deformace
ω	úhlová frekvence
σ_0	amplituda napětí
$\tan \delta$	ztrátový úhel
ρ	hustota
c	koncentrace
\bar{v}	průměrná hodnota objemu částic
$k_B T$	tepelná energie
α	konstanta
g	číselná konstanta vyjadřující geometrii částic
SO	silikonový olej
C_A	molární koncentrace
σ	vodivost
f	frekvence
ε'	permitivita
ε''	ztrátový faktor

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schematické znázornění sloupců řetězců směrem podél elektrického.....</i>	13
<i>Obr. 2 Oddělování fází na základě elektrického pole v důsledku elektroforézy, což vede k negativnímu ER efektu [6].....</i>	13
<i>Obr. 3 Schématické znázornění částic v EMR efektu, kde H představuje intenzitu magnetického pole a E představuje intenzitu elektrického pole [6]</i>	14
<i>Obr. 4 Vodivé polymery [23]</i>	17
<i>Obr. 5 Závislost prahového napětí na intenzitě elektrickém pole pro suspenze různých typů PANI v silikonovém oleji [24]</i>	18
<i>Obr. 6 Schéma protonace PANI z emeraldinové báze (EB) I na případnou emeraldinovou sůl (ES) II [25]</i>	19
<i>Obr. 7 Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro suspenzi 15 obj.% PANI v silikonovém oleji při různých intenzitách vnějšího elektrického pole [28]</i>	21
<i>Obr. 8 Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace pro suspenzi 10 obj.% PPy-MCM-41 v silikonovém oleji při různých intenzitách vnějšího elektrického pole [29]</i>	22
<i>Obr. 9 Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace u suspenzí chitosanu (25 hm.%) ve třech různých olejích při intenzitě elektrického pole $2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$: \square kukuřičný olej, \circ olej ze sojových bobů, Δ silikonový olej [35].....</i>	24
<i>Obr. 10 Sinusové napětí vstupní a typické napětí-deformace pro elastické pevné materiály, viskózní kapaliny a viskoelastické materiály [37]</i>	26
<i>Obr. 11 Závislost soufázového modulu G' a ztrátového modulu G'' na frekvenci a úhlové frekvenci ω [38].....</i>	27
<i>Obr. 12 Závislost síly elektrického pole na viskozitě elektrického pole pro různé deriváty PANI [39]</i>	29
<i>Obr. 13 Závislost prahového napětí τ a permitivity ϵ' na frekvenci f [6]</i>	30
<i>Obr. 14 Závislost prahového napětí na objemovém zlomku pro různé intenzity elektrického pole [26]</i>	31
<i>Obr. 15 Závislost mezi smykovým napětím a rychlostí smykové deformace Natanátových tyčinek při různých teplotách a pro různé intenzity elektrického pole E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \circ 1, Δ 2, ∇ 3, \diamond 4 [43]</i>	32
<i>Obr. 16 Rotační reometr Bohlin Gemini</i>	37

Obr. 17 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 1 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	38
Obr. 18 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	39
Obr. 19 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 3 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	39
Obr. 20 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	40
Obr. 21 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 5 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	40
Obr. 22 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 6 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	41
Obr. 23 Závislost extrapolovaného prahového napětí τ_o na intenzitě elektrického pole E pro PANI bázi v různých olejích: \diamond SO 50, Δ SO 100, \circ SO 200	43
Obr. 24 Závislost extrapolovaného prahového napětí τ_o na intenzitě elektrického pole E pro protonovaný PANI v různých olejích: \diamond SO 50, Δ SO 100, \circ SO 200.....	43
Obr. 25 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 1 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	44
Obr. 26 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	44
Obr. 27 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 3 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	45
Obr. 28 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	46
Obr. 29 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 5 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	46
Obr. 30 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace γ u vzorku č. 6 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3.....	47
Obr. 31 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na amplitudě deformace γ u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3	48

- Obr. 32 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na amplitudě deformace γ u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3 48
- Obr. 33 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 1 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3 49
- Obr. 34 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3 50
- Obr. 35 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 3 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3 50
- Obr. 36 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3 51
- Obr. 37 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 5 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3 51
- Obr. 38 Závislost ztrátového modulu G'' (prázdné symboly) a soufázového modulu G' (plné symboly) na frekvenci f u vzorku č. 6 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \square 0, \diamond 1, Δ 2, \circ 3 52
- Obr. 39 Závislost soufázového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 1 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3 54
- Obr. 40 Závislost soufázového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 2 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3 55
- Obr. 41 Závislost soufázového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 3 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3 55
- Obr. 42 Závislost soufázového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 4 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3 56
- Obr. 43 Závislost soufázového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 5 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3 56
- Obr. 44 Závislost soufázového modulu G' na smykovém napětí τ u vzorku č. 6 v elektrickém poli o různé intenzitě E [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]: \diamond 1, Δ 2, \circ 3 57

<i>Obr. 45 Závislost permitivity ε' na frekvenci f.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 46 Závislost ztrátového faktoru ε'' na frekvenci f.....</i>	<i>60</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Hustota ρ a vodivost σ PANI báze a protonovaného PANI ve vodném roztoku kyseliny fosforečné o molární koncentraci C_A</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 2 Složení suspenzí</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 3 Hodnoty prahového napětí extrapolovaného na nulovou hodnotu smykové deformace pro různé intenzity elektrického pole.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 4 Hodnoty soufázového modulu G' pro frekvenci $f = 1$ Hz pro různé intenzity elektrického pole.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 5 Hodnoty statického prahového napětí pro různé intenzity elektrického pole stanovené z viskoelastických měření</i>	<i>58</i>