

Vliv přípravy částic oxalátů železa na jejich elektoreologickou aktivitu

Patrik Martinec

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Patrik Martinec**
Osobní číslo: **T21856**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Vliv přípravy částic oxalátů železa na jejich elektroeologickou aktivitu**

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše na zadané téma
2. Příprava a analýza tyčinkovitých mikročástic oxalátů železa
3. Příprava elektroeologických tekutin o různém složení
4. Analýza elektroeologického chování zkoumaných materiálů
5. Diskuze získaných výsledků

Forma zpracování bakalářské 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 bakalářské práce: **doc. Ing. Michal Sedlačík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 22. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za cíl nalézt novou materiálovou skladbu dielektrických částic vhodných pro použití jako dispergovaná fáze v elektoreologických (ER) kapalinách. Konkrétně se zabývá vlivem podmínek syntézy částic oxalátu železa na morfologii částic. Morfologie částic má významný vliv na jejich chování v ER kapalinách, což umožňuje jejich využití v mnoha jedinečných praktických aplikacích. V této práci bylo připraveno na patnáct různých typů částic oxalátu železa lišících se podmínkami syntézy, z nichž byly vybrány čtyři varianty pro hloubkový výzkum vzhledem k jejich slibné morfologii.

Klíčová slova: elektoreologie, dispergovaná fáze, vliv přípravy, oxaláty železa

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to find a new material composition of dielectric particles suitable for use as dispersed phase in electrorheological (ER) fluids. Specifically, it addresses the effect of the synthesis conditions of iron oxalate particles on the morphology of the particles. The morphology of the particles has a significant impact on their behavior in ER liquids, allowing their use in many unique practical applications. In this work, fifteen different types of iron oxalate particles differing in synthesis conditions were prepared, from which four variants were selected for in-depth investigation due to their promising morphology.

Keywords: electrorheology, dispersed phase, effect of preparation, iron oxalates

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval doc. Ing. Michalovi Sedláčikovi, Ph.D za důležité rady a připomínky při vedení bakalářské práce. Taky bych rád poděkoval rodině za veškerou podporu v celém průběhu studia.

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

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ELEKTROREOLOGICKÝ SYSTÉM	11
2 ELEKTROREOLOGICKÉ MATERIÁLY	12
2.1 ANORGANICKÉ MATERIÁLY.....	12
2.2 ORGANICKÉ MATERIÁLY	12
2.2.1 Polyanilín.....	12
2.2.2 Polypyrol	13
2.3 KOMPOZITNÍ ČÁSTICE JÁDRO - OBAL.....	14
3 DISPERZNÍ FÁZE	15
4 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI	16
5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT	19
5.1 TEPLOTA	19
5.2 INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE.....	19
5.3 OBJEMOVÝ ZLOMEK ČÁSTIC	20
6 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	21
II PRAKTICKÁ ČÁST	22
7 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	23
8 POUŽITÉ MATERIÁLY A METODY	24
8.1 MATERIÁLY.....	24
8.2 SYNTÉZA ČÁSTIC	24
8.3 CHARAKTERISTIKA ČÁSTIC.....	25
8.4 ELEKTROREOLOGICKÁ MĚŘENÍ.....	26
9 VÝSLEDKY A DISKUSE	27
9.1 CHARAKTERISTIKA ČÁSTIC.....	27
9.2 ELEKTROREOLOGICKÉ CHOVÁNÍ.....	29
ZÁVĚR	33
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	34
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	37
SEZNAM OBRÁZKŮ	38
SEZNAM TABULEK	39

ÚVOD

Elektroreologické (ER) kapaliny jsou klasifikovány jako inteligentní systémy, jejichž reologické vlastnosti, jako je viskozita, mez kluzu atd., lze upravovat pomocí vnějšího elektrického pole [1]. Tyto systémy mohou přecházet z kapalného do pevného stavu ve velmi krátkém čase v řádu milisekund [2]. Elektroreologické kapaliny jsou tak potenciálními kandidáty v různých technických oblastech, jako jsou tlumicí systémy [3], aktuátory [4], robotika [5], hmatové displeje [6] a momentové prvky pro použití v rehabilitačních zařízeních [7]. Elektroreologické kapaliny se obvykle skládají z elektricky polarizovatelných částic dobře rozptýlených v nevodivém kapalném prostředí [1]. Tyto částice jsou za normálních podmínek v kapalině náhodně rozptýleny, avšak při aplikaci vnějšího elektrického pole se vytvářejí organizované řetězcové struktury. Výsledkem je rychlé zvýšení viskoelastických a mechanických vlastností [8]. Obvykle se zdánlivá viskozita a viskoelastické moduly zvýší o několik řádů v důsledku přítomnosti elektrického pole, toto zvýšení se běžně nazývá ER efekt. Intenzita ER efektu závisí na mnoha parametrech, jako je síla aplikovaného elektrického pole, objemový podíl [9] a vlastnosti částic, jako je velikost, morfologie [10] a vodivost [11]. Dále ER efekt silně závisí na dielektrické permitivitě částic, relaxační době a dielektrické relaxační síle ER kapaliny a také na teplotě systému. Tyto parametry tedy významně ovlivňují přechod z kapalného do pevného stavu [12].

V nedávné době byl veden intenzivní výzkum s cílem vyvinout vysoce výkonné částice pro ER systémy za účelem rozšíření jejich potenciálního praktického použití. Mez kluzu představuje jeden z klíčových parametrů ER kapalin a je definována jako napětí, kterému ER kapaliny odolávají, než začnou téct. Z praktického hlediska je však nutné vyvinout ER materiál s vysokou mezí kluzu a také s nízkou viskozitou bez účinků vnějšího elektrického pole a příznivou sedimentační stabilitou [13]. Morfologie a velikost částic také hrají zásadní roli pro lepší ER výkonnost. Předchozí výzkumné skupiny prokázaly, že jednodimenzionální materiály, zejména tyčinkovité částice, vykazují vyšší ER účinnost ve srovnání se sférickými částicemi. Tato výhoda vyplývá z vysokého poměru stran (L/D) tyčinek [14]. Při působení vnějšího elektrického pole jsou částice orientovány svou delší osou ve směru tohoto pole. Třecí síly jsou kromě dipólově-dipólových interakcí vytvářených mezi částicemi podstatně silnější, což má za následek robustnější a pevnější řetězcovou strukturu [15]. V případě jednorozměrných částic může být efekt ER dostatečně zesílen i pro nízké objemové podíly. Tyčinkovité částice navíc prokázaly schopnost potlačit sedimentaci ve srovnání s částicemi

kulovitými díky omezenému rotačnímu pohybu v nosném prostředí [16]. Bohužel u tyčinkovitých částic je však obecně pozorována nežádoucí vysoká viskozita v klidovém stavu důsledkem vyšších viskózních odporových sil [16].

Dosavadní práce se zaměřovaly na přípravu jednorozměrných částic vhodných pro ER kapaliny hydrotermálními technikami za alkalických podmínek [17], nicméně tyto přístupy mohou být nebezpečné vzhledem k použití vysokých teplot a tlaku, nemluvě o tom, že doba syntézy je poměrně dlouhá. Jednou z dalších metod syntézy tvarově anizotropního materiálu s výjimečnými vlastnostmi je technika spolusrážení roztavených solí. Touto jednoduchou metodou lze získat jednofázové vícesložkové oxidy, většinou s využitím roztavené soli jako reakčního média [18]. Reakční doba tohoto postupu je kratší a umožňuje růst krystalů v určitém směru. Různým molárním poměrem prekurzoru a nastavením ko-precipitace lze připravit částice s různou morfologií, velikostí, vysokou čistotou a stechiometricky optimalizované [19], které generují žádaný ER efekty. V neposlední řadě je tato metoda levná, a umožňuje tak výrobu ve velkém měřítku [20]. Tato bakalářská práce se zaměřuje na syntézu částic dihydrátu šťavelanu železnatého ($\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) metodou koprecipitace a ověření jejich použitelnosti ve formě dispergované fáze v ER kapalinách.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROREOLOGICKÝ SYSTÉM

Elektroreologický systém je koloidní disperze, která obsahuje dvě fáze. Disperzní a dispergovanou fázi. Disperzní fázi, která bude podrobněji popsána v kapitole 3., tvoří nevodné kapalném médium, kdežto dispergovanou fázi tvoří pevné dielektrické částice. [21] Působení vnějšího stejnosměrného elektrického pole způsobí orientaci těchto částic ve směru siločar, čímž se mění fyzikální vlastnosti daných materiálů, jako je například tuhost (viskozita), kdy intenzita této změny je úměrná intenzitě aplikovaného vnějšího elektrického pole. [22] Tento jev má velké využití v praxi, ale aby elektroreologie mohla být využita v praxi, tak je důležité, aby systém měl následující vlastnosti. Po odstranění vnějšího elektrického pole by se měl systém rychle vrátit do stavu nízké viskozity; systém musí mít dlouhou životnost v inženýrských zařízeních s ohledem na jejich fyzikální a chemické vlastnosti; systém musí být slučitelný s ostatními materiály použitými v inženýrských aplikacích a v neposlední řadě by měl systém vykazovat odolnost proti tepelnému rozkladu. [23]

2 ELEKTROREOLOGICKÉ MATERIÁLY

Dielektrické částice, které jsou schopny polarizace ve vnějším elektrickém poli, a tím tvořit výše uvedenou vnitřní strukturu svojí orientací do řetízkoovitých struktur, mohou být různého původu. [21]

2.1 Anorganické materiály

V elektroteologických systémech se využívají anorganické částice, jako např. zeolity, které vykazují dobré elektroteologické chování, a díky malému množství absorbované vlhkosti mají svoji elektrickou vodivost v optimálním intervalu právě pro využití v elektroteologických tekutinách. Vlhkost se většinou objevuje na povrchu částic. Zvýšená absorpce je však již nežádoucí, jelikož tato může způsobit zkratování elektrického obvodu. Mezi další nevýhody se řadí jejich abrazivita v elektroteologických aparátech, která vede ke snížení životnosti zařízení, nebo relativně vysoká hustota částic, která vede k jejich značné sedimentaci. Anorganickým materiálům, konkrétně oxalátům železa, bude pozornost věnována později, a to v rámci praktické části, protože oxaláty železa se řadí do této skupiny. [21]

2.2 Organické materiály

V elektroteologických systémech se často testují i organické materiály. Při srovnání s anorganickými materiály mají tyto materiály nižší hustotu a abrazivitu, avšak jsou méně teplotně stabilní. [24]

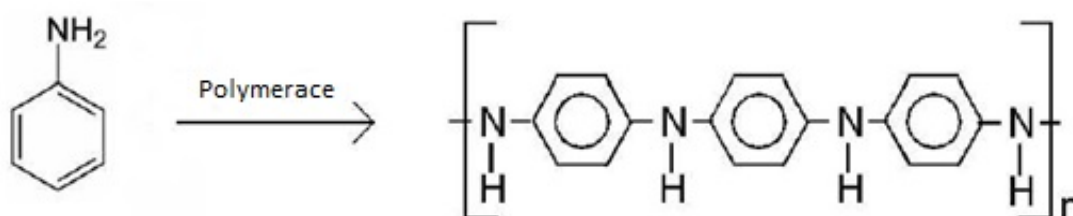
Typickým zástupcem anorganických materiálů používaných v elektroteologických kapalinách jsou vodivé polymery. Nejčastěji se využívají polyanilín nebo polypyrol, u nichž je optimální vodivost dosaženo díky systému konjugovaných dvojných vazeb. [25]

2.2.1 Polyanilín

Polyanilín je jeden z nejstarších organických polymerů, který člověk dokáže syntetizovat. Tento produkt, který má v základu zelenou barvu, je získán oxidací anilínu, kdy tuto oxidaci prvně popsal v roce 1840 J. Fritsche, který se krátce po získání anilínu snažil vytvořit nová syntetická barviva. [26]

Oxidací anilínu, a to nejčastěji peroxidvojsíranem amonným se připravuje polyanilín. Tato reakce není náročná na přípravu. Připravuje se z běžných chemikálií a probíhá v kyselém vodném prostředí a v otevřené nádobě, která je na vzduchu a při normální laboratorní teplotě. Tato reakce není náročná ani z časového hlediska, protože trvá několik minut. Po skončení reakce je na závěr finální polyanilín oddělován filtrací. Tento produkt je atraktivní, a to díky snadné přípravě, stabilitě, struktuře a vlastnostem. [27]

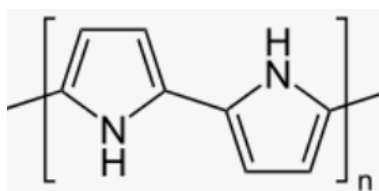
Polyanilín (Obr. 1) má lepší vlastnosti, a to tepelnou stabilitu a nižší hustotu než ostatní organické materiály používané v elektroeologii. Nízká hustota polyanilínu snižuje proces usazování. Při použití některých kyselin či zásad můžeme dále upravovat vodivost polyanilínu tzv. protonací či deprotonací. [27]



Obr. 1 - Polymerace anilínu na polyanilín [21]

2.2.2 Polypyrol

Chemická oxidace pyrrolu byla popsána v roce 1887 a poskytla oligomerní produkty (Obr. 2). V roce 1916 byly publikovány italskými chemiky informace, které naznačovaly, že pyrol polymerizuje v kyselém prostředí při oxidaci peroxidem vodíku za vzniku nerozpustné pyrolové černi. [28]



Obr. 2 – Polypyrol [29]

Jedná se o polymer, který se řadí do skupiny heterocyklických, konjugovaných, vodivých polymerů. Vlastnosti polypyrolu jsou závislé na způsobu výroby a stavu, ve kterém se

polymer nachází. Je-li polypyrol v neutrálním stavu, tak se z něho stává polovodič, kdežto v oxidovaném stavu má kovový charakter a vykazuje vlastnosti vodiče. Jak již bylo uvedeno, elektroeologický efekt umožňuje správná vodivost dispergovaných částic, kdy v elektroeologických systémech se polypyrol využívá ve svém polovodivém stavu.[30]

2.3 Kompozitní částice jádro - obal

Tyto heterostrukтуры, kdy je většinou anorganická částice opatřena organickou povrchovou vrstvou, byly poprvé připraveny v osmdesátých letech 20. století, a bylo jim věnováno hodně výzkumné pozornosti, což přispělo k mnoha různým kompozitním systémům se zajímavými vlastnostmi. Tyto kompozity spojují dva materiály, které kombinují jejich výhodné vlastnosti v jednu tzv. synergickým efektem. Povrchové vrstvy na částicích zásadně mění jejich celkové vlastnosti, jako je chemická nebo tepelná stabilita, katalytická aktivita, disperzivita nebo optické, dispergovatelnost v okolním prostředí, magnetické a elektronické vlastnosti. A právě elektrické vlastnosti jsou určující pro využití těchto částic v elektroeologických kapalinách, kdy kromě již zmíněné vodivosti jsou nezbytné i dielektrické vlastnosti určující mezifázovou polarizaci částic vnějším elektrickým polem, která vede ke spojování částic do řetězovitých struktur. [21,24,31]

3 DISPERZNÍ FÁZE

Jako disperzní fázi je v rámci elektoreologických kapalin nezbytné používat kapaliny nevodivého typu. Současné systémy jsou výhradně využívány bez vody, opět z důvodu optimální vodivosti systému, kdy při vysokých vodivostech a protékajícím proudem systémem dochází ke zkratování celého zařízení. Mezi další záporné vlastnosti spojené s přítomností vody řadíme např. korozi a omezené využití díky nízké teplotní stabilitě. Ač první generace elektoreologických kapalin obsahovala určité vyšší množství vody, právě z uvedených důvodů se v dnešních systémech častěji používají místo vody různé oleje, a to oleje minerální a rostlinné. [21]

Jinými slovy by tedy optimální elektoreologická kapalina měla mít co možná nejvyšší rozdíl v dielektrických vlastnostech, což právě způsobuje polarizaci částic na jejich povrchu, tj. rozhraní částic a disperzního prostředí, mající vliv na jejich spojování do řetězovitých struktur. [32]

Disperzní fáze musí vykazovat další nezbytné vlastnosti, jako jsou například vysoký bod varu, nízká viskozita, elektrickou pevnost, vhodná hustota, vysoká chemická stabilita. [33]

4 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI

K reologickým vlastnostem aplikovaným v rámci elektreologických kapalin a systémů řadíme smykové napětí, prahové napětí, smykovou viskozitu a rychlost smykové deformace. Reologické vlastnosti u elektreologických systémů se mohou být měřeny v přítomnosti elektrického pole nebo bez přítomnosti elektrického pole a následně se získané hodnoty porovnávají. Výsledky intenzity elektrického pole se pohybují zpravidla v intervalu 0,5 – 3 kV/mm. [34]

Newtonovským zákonem popisujeme zákonitosti toku, kdy tento zákon je platný jen pro ideální kapaliny. Těmto kapalinám se nemění reologické vlastnosti a zůstávají konstantní v čase i intenzitě smýkání (Obr. 3).

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

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

Díky Binghamskému plastickému modelu můžeme charakterizovat i neNewtonské chování, konkrétně systémy vykazující v důsledku své vytvořené vnitřní struktury tzv. mez toku, která představuje minimální napětí, které musí být dodáno do systému, aby tento začal téci. NeNewtonsky, Binghamsky, se chovají právě elektreologické kapaliny, když jsou vystavovány vnějšímu elektrickému poli. [33]

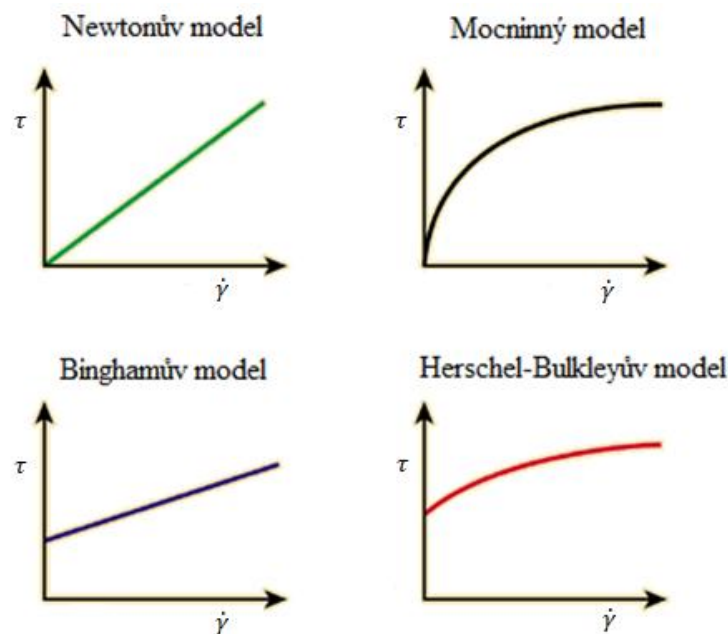
$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} + \tau_y \quad (2)$$

, kde dále τ_y [Pa] mez toku (prahové napětí).

Vhodnějším modelem popisujícím neNewtonské chování systému po překonání meze toku ve smyslu pseudoplastického či dilatantního chování je Herschel-Bulkly rovnice.

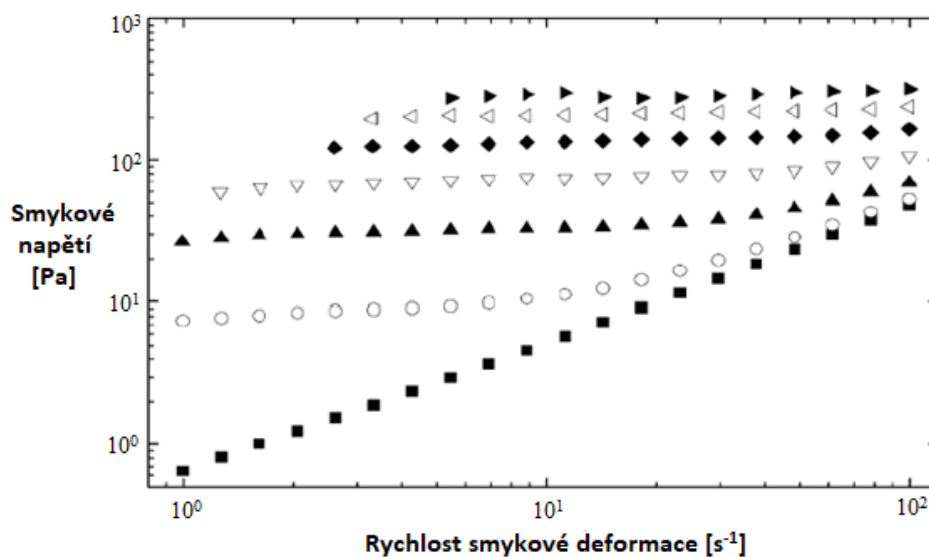
$$\tau = \tau_y + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

, kde η_{pl} plastická viskozita [Pa sⁿ],
 n parametr charakterizující neNewtonské chování. [35]



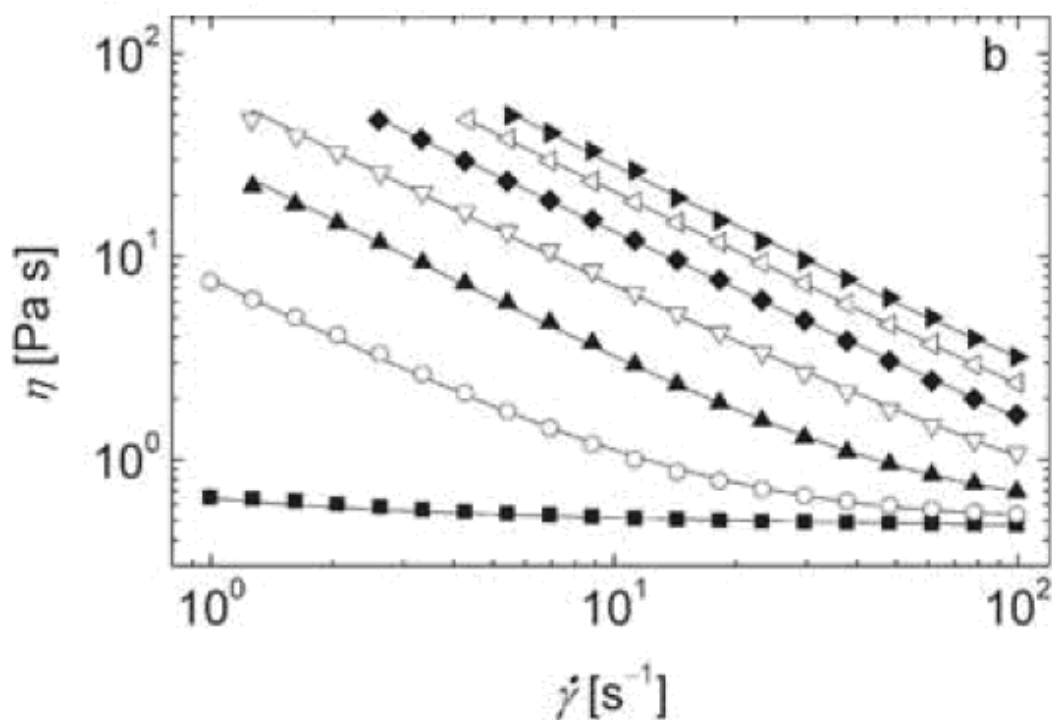
Obr. 3 - Typy tokového chování pro různé systémy [36]

Smykové napětí jako funkce rychlosti smykové deformace pro typickou elektoreologickou kapalinu je vyobrazeno na Obr. 4. Nepřítomnost elektrického pole způsobuje chování kapaliny jako Newtonské. Naopak při použití elektrického pole s nenulovou intenzitou se kapalina chová Binghamovsky, a to se projevuje rychlým nárůstem smykového napětí a přítomností meze toku. Dále se zvyšující intenzitou elektrického pole je možno pozorovat nárůst meze toku, kdy tento nárůst je důsledkem zintenzivnění přitažlivých sil mezi polarizovanými částicemi.



Obr. 4 - Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro elektoreologický systém PANI částic při různých intenzitách elektrického pole [kV/mm]: (■) 0; (○) 0,5; (▲) 1; (∇) 1,5; (□) 2; (◻) 2,5; (►) 3.[37]

Na obr. 5 je znázorněna závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace. V nízkých rychlostech smykové deformace se viskozita zvyšuje více s rostoucí intenzitou elektrického pole. S rostoucí rychlostí smykové deformace dochází ke snížení viskozity na viskozitu, která má hodnotu rovnu viskozity bez vlivu elektrického pole, dochází tedy k pseudoplastickému chování systému. Tento pokles viskozity je dán postupnou dominancí hydrodynamických sil vyvolávaných právě zvyšující se rychlostí smykové deformace nad silami elektrostatickými vyvolanými mezifázovou polarizací na částicích vlivem aplikování vnějšího elektrického pole.



Obr. 5 - Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace pro elektroeologickou suspenzi PANI částic, protonovaných kyselinou fosforečnou, v silikonovém oleji při různých intenzitách elektrického pole E [kV/mm]: (■) 0; (○) 0,5; (▲) 1; (▽) 1,5; (□) 2; (□) 2,5; (▶) 3.[37]

5 FAKTORY OVLIŇUJÍCÍ ELEKTROREOLOGICKÝ EFEKT

Elektroreologický efekt ovlivňují různé vnější faktory pozitivně nebo negativně. Mezi hlavní faktory lze řadit teplotu, intenzitu elektrického pole a objemový zlomek částic.

5.1 Teplota

Elektroreologický efekt ovlivňuje teplota podle dvou teorií. První teorie říká, že teplota ovlivňuje pohyb částic. Při vyšší teplotě je pohyb intenzivnější. Druhá teorie je zaměřena na změnu polarizovatelnosti elektroreologických systémů vlivem teploty.

Změny teploty v zásadě ovlivňují vlastnosti disperzní fáze a zároveň vlastnosti kapaliny. Disperzní fáze, jakožto zvláště důležitá komponenta elektroreologických kapalin, mění své dielektrické vlastnosti a vodivost částic vlivem teploty, což vede k vyšší polarizaci a lepšímu vývoji vnitřní struktury. [21]

5.2 Intenzita elektrického pole

Na intenzitě elektrického pole závisí generovaná hodnota prahového napětí (meze toku) elektroreologických systémů. Důležitá hodnota v elektroreologických systémech je kritická hodnota elektrického pole. Pokud je intenzita pole pod touto kritickou hodnotou, systémy nevykazují výrazný elektroreologický efekt. Vztah, který charakterizuje diskutovanou hodnotu je:

$$E_c = \frac{\rho - c}{|\alpha|} \sqrt{\frac{8\pi k_B T}{(c\rho v \varepsilon_m)}} \quad (4)$$

, kde	ρ [kg/m ³]	hustota částic,
	c [obj. %]	koncentrace částic,
	v [%]	průměrná hodnota objemu částic,
	$k_B T$ [J]	tepelná energie,
	ε_m [–]	dielektrická konstanta tekutého média,
	α [–]	konstanta. [21]

5.3 Objemový zlomek částic

Jako poslední faktor, který výrazně ovlivňuje elektoreologický efekt, vystupuje objemový zlomek částic. Elektoreologický systém nemění své smykové napětí ani viskozitu, a to za podmínky nepřekročení kritické hodnoty koncentrace objemového zlomku částic. Nejlepší objemový zlomek pro využitelný elektoreologický efekt činí 15–40 obj.%. Jestliže se objemový zlomek nachází nad tímto rozhraní, tak to vede k poklesu elektoreologického efektu v důsledku výrazné viskozity systému bez přítomnosti vnějšího elektrického pole, tudíž relativní změna bez a v poli není dostatečná. Příliš nízká koncentrace dispergovaných částic v jednotkovém objemu neindukuje dostatečně rigidní vnitřní strukturu v přítomnosti aplikovaného elektrického pole. [38]

6 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část bakalářské práce je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola věnuje pozornost elektoreologickým systémům, a to přesně jejím vlastnostem. Druhá kapitola je věnována elektoreologickým materiálům, které jsou podrobně popsány v podkapitolách. Třetí se věnuje disperzní fázi a jejím nezbytným vlastnostem. Ve čtvrté kapitole jsou podrobně vysvětleny reologické vlastnosti v kontextu interpretace elektoreologického chování a obsahem poslední kapitoly jsou faktory, které ovlivňují elektoreologický efekt.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části této bakalářské práce je modifikací podmínek v rámci přípravy částic dihydrátu šťavelanu železnatého (dále značeno jako „OŽ“) dosáhnout různých morfologií a studovat následně vliv této morfologie částic na jejich případnou elektoreologickou aktivitu. Měněnými parametry v průběhu koprecipitační syntézy částic OŽ budou rychlost přikapávání reaktantů, intenzita míchání reakční směsi a celková doba reakce. Kromě ověření elektoreologické aktivity připravených částic budou tyto nejdříve strukturně popsány řadou kvalitativních metod.

8 POUŽITÉ MATERIÁLY A METODY

8.1 Materiály

Pro přípravu částic OŽ byly použity následující chemikálie. Heptahydrát síranu železnatého ($FeSO_4 \cdot H_2O$, čistota $\geq 99\%$, dodavatel Sigma Aldrich, USA), který byl použit jako zdroj iontů Fe^{2+} , dále dihydrát kyseliny šťavelové ($C_2H_2O_4 \cdot H_2O$, čistota p.a., dodavatel Lach-Ner, ČR) a ethylenglykol (dodavatel Penta, ČR). Jako disperzní fáze byl použit silikonový olej (Lukosiol M200, dodavatel Chemické závody Kolín, ČR, viskozita $\eta = 194 \text{ mPa s}$, vodivost $\sigma = 10\text{--}11 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$).

8.2 Syntéza částic

Jako zdroj iontů Fe^{2+} byl použit heptahydrát síranu železnatého a jako srážedlo pro přípravu částic dihydrátu šťavelanu železnatého byl použit dihydrát kyseliny šťavelové. Byl zkoumán vliv podmínek, za kterých byly částice šťavelanu železnatého syntetizovány, přičemž byl zdůrazněn vliv morfologie. Připravené směsi byly vytvořeny z 20 mmol $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ nebo $C_2H_2O_4 \cdot H_2O$ rozpuštěných ve směsi ethylenglykolu a demineralizované vody v poměru 3:1 v objemu 28 ml. Bezprostředně poté byl rozpuštěný $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ přidán k roztoku $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ za použití různých rychlostí kapání a míchání. Nakonec byla směs ponechána v podmínkách mechanického míchání po definovanou dobu, jak je patrné z tabulky 1.

Tab. 1 - Variace v podmínkách syntézy částic šťavelanu železnatého.

Vzorek	Rychlost kapání (ml/h)	Rychlost míchání (ot/min)	Doba míchání (hod)
OŽ1	2,30	100	2
OŽ2	2,30	500	2
OŽ3	1,16	100	2
OŽ4	1,16	500	2

Vzhledem k výsledkům předchozí studie [36], na kterou tato bakalářská práce navazuje a ve které bylo zjištěno, že rychlost přikapávání ovlivňuje morfologii výsledných částic, byly použity různé hodnoty rychlosti přikapávání. Přesné rychlosti přikapávání bylo dosaženo pomocí programovatelné injekční pumpy NE- 1000 (KF Technology, Itálie). V tabulce 1

jsou jako další proměnné parametry použité v průběhu přípravy částic uvedeny rychlost míchání reakční směsi a celková doba reakce. Byly tedy celkem definovány tři proměnné parametry syntézy. Nakonec byla vytvořená žlutá sraženina důkladně odfiltrována a několikrát promyta destilovanou vodou. Promytá a odfiltrovaná žlutá sraženina byla sušena 12 h pod 10 m bar při 70 °C.

8.3 Charakteristika částic

Morfologie připravených částic byla zkoumána pomocí skenovacího elektronového mikroskopu Phenom Pro (SEM, Phenom-World, Nizozemsko) při napětí 10 kV. Délka a šířka připravených tyčinkovitých částic byla analyzována pomocí softwaru Image J 1.52a. Za zmínku stojí, že délka míchání nemá na tvar a velikost vzorků vliv. Po vyhodnocení snímků SEM byly dále použity ke zkoumání čtyři typy připravených částic OŽ výrazněji se lišících svojí morfologií. Popis parametrů syntézy a kódování částic OŽ použitých v této studii je uveden v tabulce 2. Reprodukovatelnost procesu syntézy částic byla ověřena třemi nezávislými opakováními.

Tab. 2 - Podmínky syntézy částic OŽ použitých dle v této práci a jejich rozměrové charakteristiky.

Rychlost kapání (ml/h)	Rychlost míchání (ot/min)	Doba míchání (hod)	Vzorek	L (μm)	D (μm)	L/D
2,30	100	2	OŽ1	0,90 \pm 0,26	0,17 \pm 0,04	5,29
2,30	500	2	OŽ2	2,20 \pm 0,89	0,33 \pm 0,08	6,67
1,16	100	2	OŽ3	1,24 \pm 0,30	0,16 \pm 0,04	7,75
1,16	500	2	OŽ4	2,24 \pm 0,82	0,43 \pm 0,10	5,21

Hustota připravených částic OŽ byla měřena pomocí plynového pyknometru (UltraFoam 1200e, Quantachrome Instruments, Německo) pracujícího s dusíkovým médiem. Hustoty částic byly vypočteny z deseti nezávislých měření a jsou uvedeny v tabulce 3.

Pro vyhodnocení krystalické struktury a fázového složení částic OŽ byla provedena rentgenová difrakce pomocí přístroje Rigaku MiniFlex 600 vybaveného rentgenovou trubicí $\text{Co}_{K\alpha}\text{K}\alpha$ ($\lambda = 1,7903 \text{ \AA}$) (40 kV, 15 mA). Zpracování dat a výpočty velikosti krystalů byly

zkoumány pomocí softwaru Rigaku PDXL2. Průměrná krystalická velikost krystalitů byla vyhodnocena pomocí Scherrerova vzorce, $d = K \lambda / \beta \cos \theta$, kde d je velikost krystalitů, K je konstanta závislá na tvaru zrna (0,94), λ je vlnová délka, θ je Braggův úhel odrazu a β je pološířka plného maxima. Vodivost syntetizovaných částic OŽ (výsledky rovněž v tabulce 3) byla měřena dvoubodovou metodou při pokojové teplotě pomocí elektrometru (Keithley 6517B, USA).

Tab. 3 - Velikost krystalů (XRD), hustota a vodivost zkoumaných částic OŽ

Vzorek	Velikost krystalu (nm)	Hustota (g cm^{-3})	Vodivost (S m^{-1})
OŽ1	37	$2,560 \pm 0,003$	$5,1 \cdot 10^{-7}$
OŽ2	47	$2,770 \pm 0,016$	$8,2 \cdot 10^{-12}$
OŽ3	40	$2,790 \pm 0,007$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
OŽ4	30	$2,400 \pm 0,047$	$4,9 \cdot 10^{-12}$

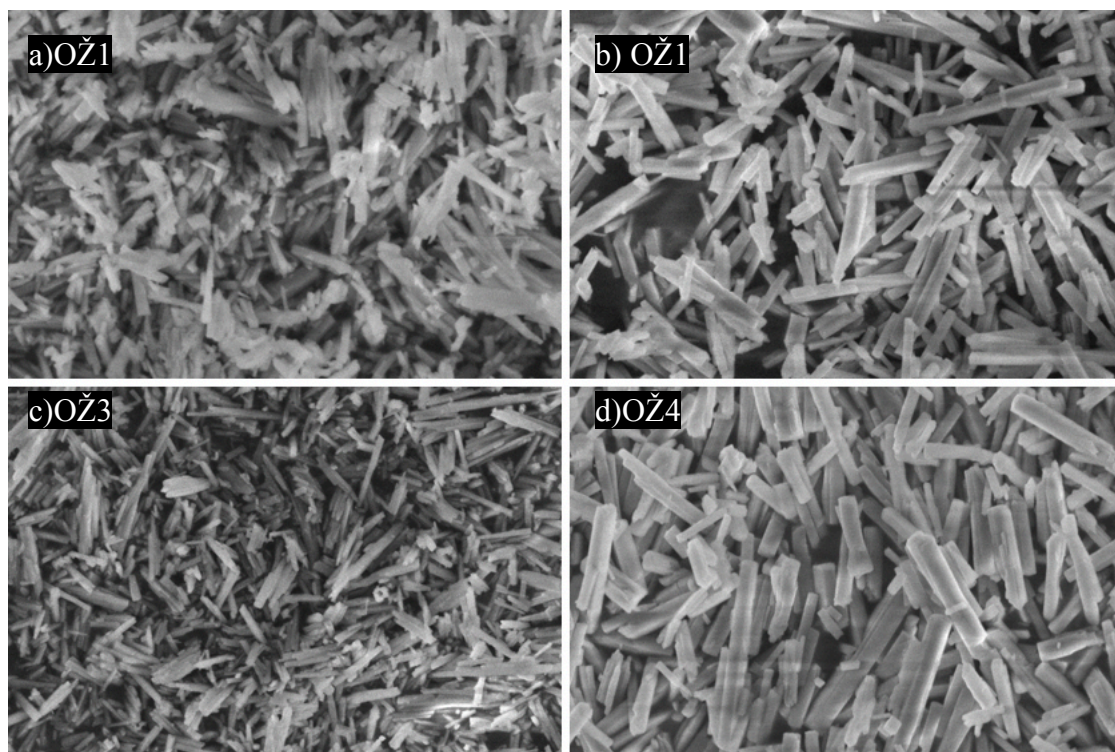
8.4 Elektoreologická měření

Měření ER aktivity připravených částic, konkrétně jejich disperzí v silikonovém oleji, byla prováděna v režimu řízené smykové rychlosti při smykových rychlostech $0,1\text{--}150 \text{ s}^{-1}$ pomocí rotačního reometru Bohlin Gemini (Malvern Instruments, UK) s geometrií deska-deska (průměr 20 mm s mezerou 1 mm). Reologické chování bylo zkoumáno jak v přítomnosti, tak při absenci vnějšího elektrického pole. Vnější elektrické pole o hodnotách v rozmezí $0,3$ až $1,5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ bylo generováno stejnosměrným zdrojem vysokého napětí TREK 668B (TREK, USA). Před každým měřením byla suspenze vystavena vnějšímu elektrickému poli po dobu 1 min, aby se částice během této doby dostatečně uspořádaly do řetízkovitých struktur. Po každém měření byla ER kapalina po dobu 1 min smýkána konstantní smykovou rychlostí 20 s^{-1} bez přítomnosti elektrického pole, aby se systém vrátil do původního stavu s částicemi náhodně rozptýlenými v nosné kapalině.

9 VÝSLEDKY A DISKUSE

9.1 Charakteristika částic

Morfologie částic OŽ byla zkoumána pomocí SEM, přičemž vybrané snímky částic uvedených v tabulce 2 jsou zobrazeny na obr. 6.



Obr. 6 - Obr.6. SEM snímky částic OŽ1 a), OŽ2 b), OŽ3 c) a OŽ4 d).

Obrázky 6 a,b ukazují morfologii částic OŽ syntetizovaných při rychlosti přikapávání $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ rovné 2,3 ml/h a různých rychlostech míchání. Jak je znázorněno na obr. 6 a, částice OŽ1, které byly během syntézy míchány při 100 ot/min, mají tyčinkovitou morfologii. Tyto částice mají podobnou délku (L) s průměrnou hodnotou $L = 0,90 \pm 0,26 \mu m$ a srovnatelný průměr (D) $D = 0,17 \pm 0,04 \mu m$. Pak lze odvodit štíhlostní poměr $L/D = 5,3$. Na druhé straně částice OŽ2 (obr. 6 b), které byly během procesu syntézy míchány při 500 ot/min, vykazovaly zvýšené hodnoty $L = 2,20 \pm 0,89 \mu m$ při zachování průměru $D = 0,33 \pm 0,08 \mu m$, což vedlo ke štíhlostnímu poměru $L/D = 6,7$. Je tedy zřejmé, že vyšší rychlost míchání během syntézy vede k vytvoření robustnějších tyčinkovitých částic s vyšším jednorozměrným charakterem. Vyšší rychlost míchání 500 ot/min vede

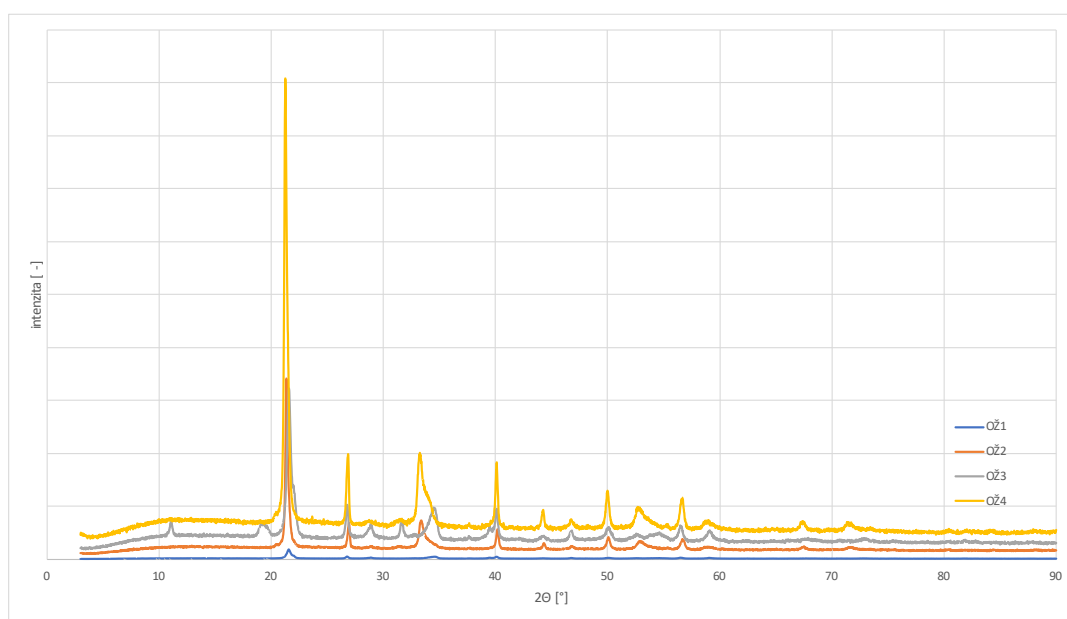
k rychlejšímu růstu krystalických částic, což je důsledkem toho, že přikapávaný $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ je rychleji dispergován do $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, což vede k častější nukleaci částic.

Vliv nižší rychlosti kapání je znázorněn na obr. 6 c,d pro částice syntetizované při stejných rychlostech míchání. Částice OŽ3 připravené při rychlosti míchání 100 ot/min (obr. 1c) vykazují poměrně rovnoměrnou tyčinkovitou morfologii s průměrnou hodnotou $L = 1,24 \pm 0,30 \mu m$ a $D = 0,16 \pm 0,04 \mu m$, což vede k hodnotě $L/D = 7,8$. Poslední vzorek odebraný pro zkoumání jeho ER vlastností na bázi částic OŽ4 je zobrazen na obr. 6 d. Podobně jako u OŽ2 vede zvýšení rychlosti míchání k vyššímu L ($2,24 \pm 0,82 \mu m$), zatímco D ($0,43 \pm 0,10 \mu m$) se tolik neliší, což dohromady vede k $L/D = 5,2$. Podobně tato vysoká rychlost míchání vede k tvorbě robustnějších částic OŽ a i přes použití nižší rychlosti kapání byl při nižším míchání reakční směsi zaznamenán vyšší tyčinkovitý charakter, který pravděpodobně umožňuje lepší nukleaci částic.

Výše uvedené výsledky jsou shrnuty v tabulce 2, která poskytuje přímé srovnání rozměrových charakteristik připravených částic OŽ pro různé podmínky syntézy. Je zřejmé, že poměr stran se zdá být nezávislý jak na rychlosti přikapávání, tak na rychlosti míchání. Délka částic se však výrazně lišila, protože delší částice se obecně získávají při rychlejším míchání reakční směsi bez ohledu na rychlost přikapávání. Podobný trend lze pozorovat i u průměru tyčinkovitých částic. Lze konstatovat, že morfologické charakteristiky částic lze vyladit pomocí různých podmínek syntézy. Konkrétně lze porovnáním dvojic se stejnou rychlostí míchání a přikapávání dojít k závěru, že rozměry částic jsou ovlivněny především rychlostí míchání. Zdá se, že rychlost přikapávání má mnohem menší vliv na rozměrové charakteristiky částic. Vzorky OŽ2 a OŽ4 mají téměř stejnou délku a průměr, které jsou ve srovnání s OŽ1 a OŽ2 téměř dvakrát větší. Kromě toho má OŽ3 nejvyšší štíhlostní poměr, což by mělo mít pozitivní vliv na chování ER.

Jak je znázorněno na obr.7, difrakční píky znamenají dobrou krystalinitu lze u připravených částic OŽ indexovat k částicím dihydrátu šřavelanu železnatého u všech vzorků. Podle Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) byla dihydrátům šřavelanu železnatého přiřazena čísla karet 01-075-7291 (mřížkové konstanty $a = 12,26$, $b = 5,57$ a $c = 15,48$) a 00-023-0293 (mřížkové konstanty $a = 9,92$, $b = 5,55$ a $c = 9,70$) pro orthorombickou a monoklinickou krystalovou soustavu. Nejdominantnější difrakční pík (111), potvrzující přítomnost fáze FeC_2O_4 , se nachází přibližně na 21° z 2θ . Z toho vyplývá, že použití různých podmínek syntézy vedlo ve všech případech ke vzniku částic dihydrátu oxalátu železa. V případě vzorku OŽ3 byly dodatečné difrakční píky nalezené při 11° a 31°

z 2θ připsány orthorombické fázi romboklasu (JCPDS 00-080-6120). Romboklas je kyselý minerál síranu železitého se vzorcem $HFe(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$ a jeho přítomnost lze vysvětlit jako důsledek reakce heptahydrátu síranu železnatého ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) v rámci syntézy š'avelanu železitého. Předpokládá se, že rychlost míchání uvedená v tabulce 2 (100 nebo 500 ot/min.) má vliv na krystalovou soustavu. Jak ukazuje obr. 7, monoklinická krystalová soustava je spojena se vzorky OŽ1 a OŽ3, zatímco u vzorků OŽ2 a OŽ4 je přítomna orthorombická soustava. Velikost krystalitů částic š'avelanu železnatého (II) byla určena podle Scherrerova vzorce s využitím rozšíření difrakce (111) a (004) přibližně na 21° a 26° z 2θ (obr. 7). Velikosti krystalitů jsou uvedeny v tabulce 3.



Obr. 7 - Práškové XRD difraktogramy částic OŽ připravených za různých podmínek syntézy.

9.2 Elektroeologické chování

Elektroeologické chování připravených ER kapalin na bázi částic OŽ syntetizovaných za různých podmínek syntézy při koncentraci 5 obj.% je uvedeno na obr. 8. Z obr. 8 a) je patrné, že všechny suspenze vykazují v neaktivovaném stavu bez vnějšího elektrického pole téměř Newtonovské chování, které je vyjádřeno lineárním nárůstem smykového napětí v souladu s Newtonovým zákonem (rovnice 1).

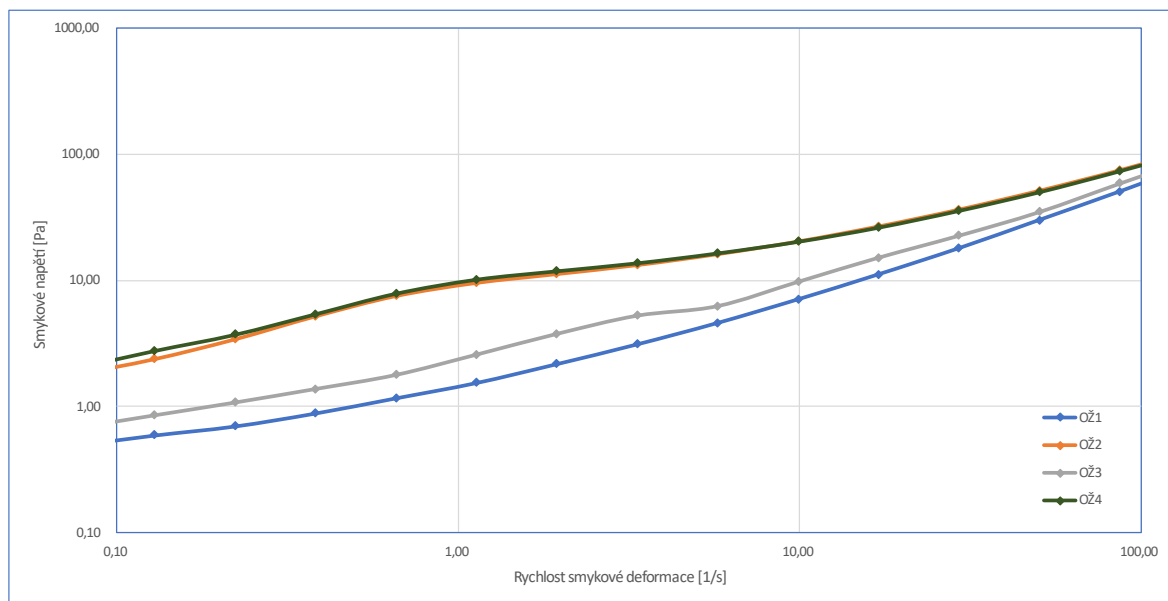
V nepřítomnosti elektrického pole (obr. 8 a) se smykové napětí, a tedy i viskozita, řídí délkou tyčinkovitých částic (L), což znamená, že viskozita suspenzí ER roste s rostoucí délkou

částic následovně: OŽ1 < OŽ3 < OŽ2 < OŽ4, protože pro delší částice je obtížnější orientovat se podél směru toku.

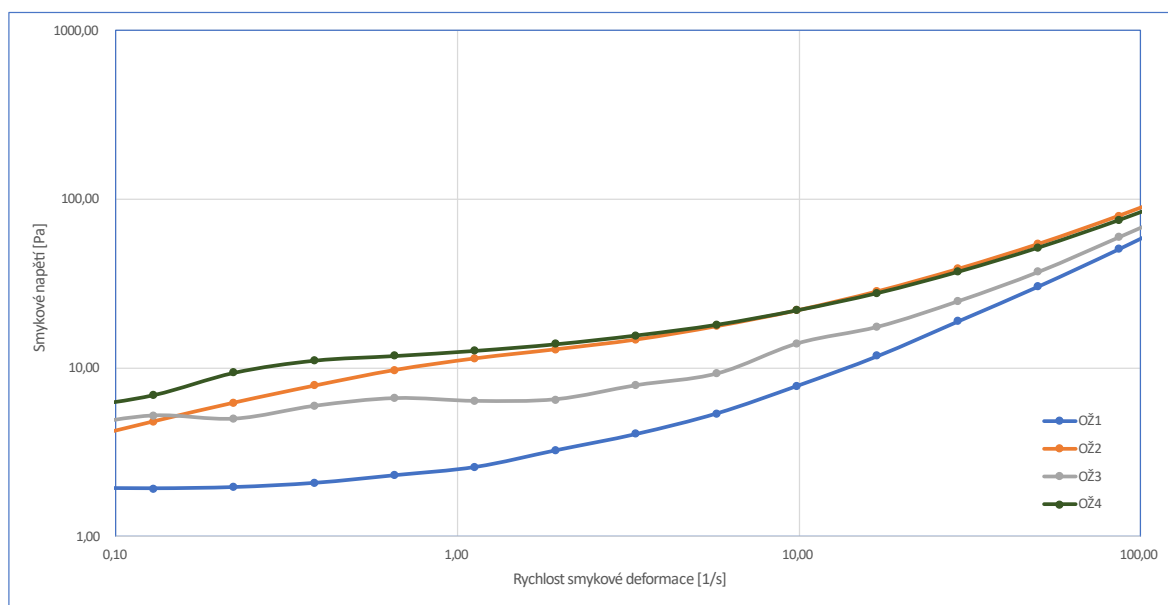
Vliv vnějšího elektrického pole je znázorněn na obr. 8 b,c, kde se smykové napětí zvyšuje při zvýšení intenzity elektrického pole. Suspenze se začnou chovat jako pseudoplastické systémy vykazující určitou úroveň meze kluzu. Pro makroskopický popis jevů probíhajících v systému a pro popis ER vlastností se obecně používá následující teorie. Jakmile je aplikováno elektrické pole, dochází k polarizaci dispergovaných částic, které vytvářejí tuhé a vysoce organizované řetězcové struktury, které jsou orientovány podél směru působení elektrického pole. Tyto pevné struktury se zhroutí pouze nad kritickým smykovým napětím (mezí kluzu), které je schopno rozbít řetězovité struktury a umožnit tak proudění materiálu v důsledku hydrodynamických sil. Mez kluzu je dále úměrná intenzitě elektrického pole a mizí, když je elektrické pole vypnuto.

Pro nízká elektrická pole se smykové napětí obecně zvyšuje (obr. 8 b), nejnižší smykové napětí je pozorováno u ER suspenze na bázi OŽ1, následované OŽ3. Oba systémy byly syntetizovány při stejné rychlosti míchání 100 ot/min. Naproti tomu ER kapaliny na bázi částic OŽ2 a OŽ4 byly syntetizovány při vyšší rychlosti míchání 500 ot/min a vykazují vyšší, ale velmi podobné hodnoty napětí při odpovídajících smykových podmínkách. Délka částic, a tedy rychlost míchání při syntéze částic OŽ, se tedy jeví jako hlavní aspekt při jejich ER aktivitě. Je zřejmé, že vzorky OŽ1 a OŽ3 ve srovnání se zbývajícími dvěma vykazují nižší ER efekt, což lze přičíst jejich kratší délce a aglomerátům (obr. 6). Zajímavé je, že při vyšších intenzitách elektrického pole (obr. 8 c) se tokové křivky vzorku OŽ1 vyrovnávají s ostatními, konkrétně s OŽ2 a OŽ4 (pravděpodobně v důsledku elektroforetických jevů probíhajících v těchto vzorcích při vyšších intenzitách elektrického pole, tedy hodnoty smykového napětí těchto vzorků při aplikaci elektrického pole o intenzitě $1,5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ se neliší. Pozorované hodnoty smykového napětí ER kapalin při nízkých smykových rychlostech na obr. 8 jsou přibližně o jeden řád vyšší, když je dostatečné elektrického pole. Zejména systém OŽ3 má za stejných podmínek toku zjevně nejvyšší hodnoty smykového napětí (obr. 8 c). To je s největší pravděpodobností důsledkem nejvyššího štíhlostního poměru částic OŽ3, který plně projevuje geometrický přínos při vyšších elektrických polích, neboť bylo prokázáno, že poměr stran hraje významnou roli při polarizaci částic a jejich propojení do tužší vnitřní řetězovité struktury [39].

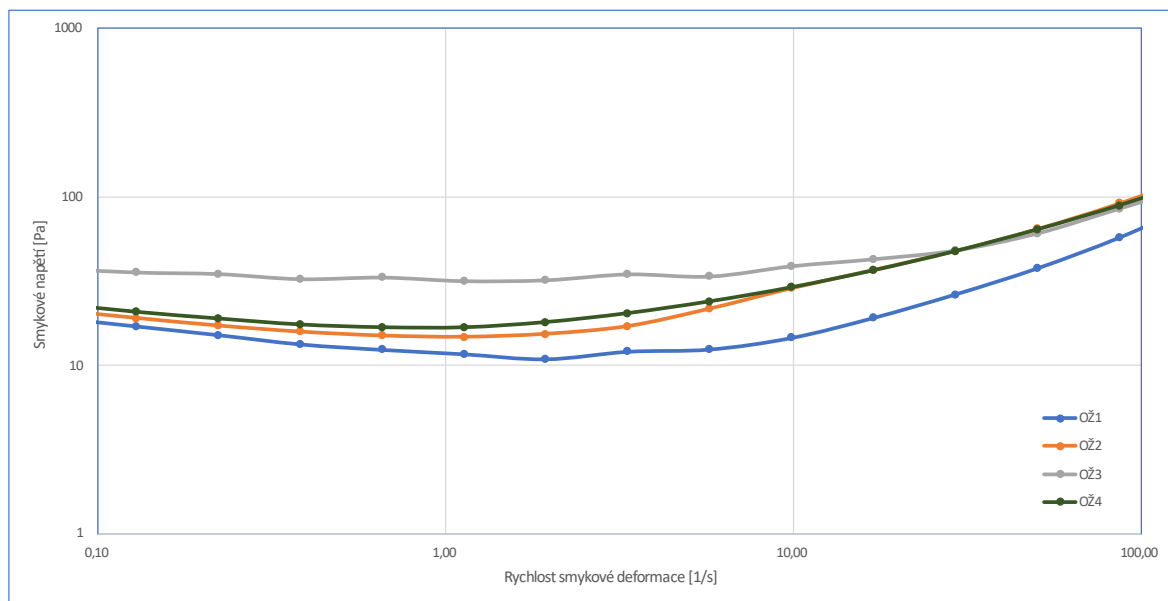
a)



b)



c)



Obr. 8 - Smykové napětí v závislosti na smykové rychlosti pro suspenze ER obsahující částice oxalátu železa(II) připravené za různých podmínek syntézy (5 obj. %) v nepřítomnosti (a) a v přítomnosti intenzity elektrického pole $0,3 \text{ kV mm}^{-1}$ (b) a $1,5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ (c).

ZÁVĚR

Tato studie popisuje úspěšnou syntézu částic dihydrátu oxalátu železa, které byly připraveny metodou koprecipitace za použití heptahydrátu síranu železnatého) a dihydrátu kyseliny šťavelové jako prekurzorů. Pozornost byla zaměřena zejména na přípravu částic s různými rozměry. Příprava probíhala za různých podmínek syntézy, zejména rychlosti přikapávání a míchání. Vybrané částice mající tyčinkovitý tvar o různých délkách a průměrech byly dále zkoumány pomocí rentgenové difrakční analýzy, která potvrdila přítomnost dominantní fáze. Bylo zjištěno, že rychlejší rychlost míchání vedla ke vzniku robustnějších částic a měla vliv na velikost jejich krystalitů. Následně byly připravené částice použity jako disperzní fáze v ER kapalinách v koncentraci 5 %obj. Systémy na bázi částic OŽ3 vykazovala nejvyšší mez kluzu při vnější intenzitě elektrického pole $1,5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, která byla téměř dvakrát vyšší ve srovnání s ostatními vzorky. Bylo zjištěno, že výrazný stíhlostní poměr částic hraje významnou roli, pokud jde o ER chování. Experimentálně bylo tedy prokázáno, že podmínky syntézy mají významný vliv na výsledný tvar a strukturu částic, což se odráží v jejich celkové ER výkonnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KUTALKOVÁ, E., PLACHÝ, T., SEDLAČÍK, M. *Journal of molecular liquid.* 309, (2020),7.
- [2] XI, Z.Y., MA, J.B., SUN, W.J., WANG B.X., HAO C.C. *SolidStateChem.*290,(2020),12.
- [3] WERELEY, N.M., LINDLER, J., ROSENFELD, N., CHOI, Y., T. *Smart Mater. Struct.* 13, (4), (2004), 743.
- [4] MAZURSKÝ, A., KOO, J.H., YANG, T.H., INTELL, J. *Mater Syst. Struct.* 30, (17). (2019), 2521.
- [5] BEHBAHANI, S.B., TAN X.B., *Smart Mater. Struct.* 26, (8), (2017).
- [6] BISWAS, S., VISELL, Y. *Adv. Mater Technol.* 4,(4), (2019), 30.
- [7] DAVIDSON, J.R., KREBS, H.I., *IEEE-ASME Trans. Mechatron.* 23, (5), (2018), 2156.
- [8] SUN, W.J., MA, J.B., XI, Z.Y., LIN, Y.S., WANG, B.X., HAO, C.C. *SoftMatter.*16, (40), (2020), 9292.
- [9] ZHENG, F. *Adv. Colloid Interface Sci.* 97, (1-3), (2002), 255.
- [10] YIN, J.B., XIA, X.A., XIANG, L.Q., ZHAO, X.P., *J. Mater Chem.* 20, (34), (2010), 7096.
- [11] ABDELHALIM, M.A.K., MADY, M.M., GHANNAM, M.M., *Lipids Health Dis.* 10, (2011).
- [12] PLACHÝ, T., SEDLAČÍK, M., PAVLÍNEK, V., STEJSKAL, J., *J. Mater Chem. C.* 3, (38), (2015), 9973.
- [13] WU, J.H., JIN, T., LIU, F.H., GUO, J.J., CUI, P., CHENG, Y.C., et al., *J. Mater Chem. C.* 2, (28), (2014), 5629.
- [14] SEDLAČÍK, M., MRLÍK, M., KOZÁKOVÁ, Z., PAVLÍNEK, V., KUŘITKA, I. *ColloidPolymSci.* 291, (5), (2013), 1105.
- [15] MRLÍK, M., PAVLÍNEK, V., SAHA, P., QUADRAT, O., *Appl. Rheol.* 21, (5), (2011), 7.
- [17] YIN, J.B., ZHAO, X.P., *Colloid Surf A-Physicochem. Eng. Asp.* 329, (3), (2008), 153.
- [18] PEI, J., CHEI, G., LI, X., LI, Y.X., ZHOU, N. *Mater Lett.* 63, (17), (2009),1459.
- [19] NIDHIN, M., INDUMATHY, R., SREERAM, K.J.,NAIR, B.U. *Bull.Mat.Sci.*31,(1),(2008),93.
- [20] MAHDAVI, M., BIN AHMAD, M., HARON, M.J., NAMVAR, F., NADI, B. , AB RAHMAN, M.Z., et al., *Molecules.* 18, (7), (2013), 7533.

- [21] HAO, T., *Electrorheological Fluids: The Non-aqueous Suspensions*, 1. vydání, Cambridge, Massachusetts, USA, ELSEVIER, 2005, 561 s., ISBN-13 978-0-444-52180-4.
- [22] ESPIN, M. J., PLOCHARSKI, J.: *Effect of pollution on the interfacial properties of electrorheological suspensions*, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 306, 2007, s.126-136.
- [23] AKHAVAN, J.: *Electro-rheological polymers*, *Proceedings of the institution of mechanical engineers part G-Journal of Aerospace Engineering*, 221, 2007, 577-587.
- [24] 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.
- [25] KANU, R.; SHAW, M.: *Enhanced electrorheological fluids using anisotropic particles*, *Journal of Rheology*, 42, 1998, 657-670.
- [26] PROKEŠ, J., NEŠPŮREK, S., STEJSKAL, J., *Vodivé polymery. Inteligentní materiály pro nové století*, *Vesmír*, 2001, 80, s. 35-38.
- [27] HOU, J., SHI, L., ZHU, Q.: *Electrorheological properties and structure of (BaTiO(C2O4)NH2CONH2)*, *Journal of Solid State Chemistry*, 179, 2008, 1874-1878.
- [28] 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.
- [29] Wikipedia.org: *Polypyrrole* [online]. [cit. 2022-20-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypyrrole>
- [30] 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.
- [31] ZHANG, K., LIM, J.Y., CHOI, H.J.: *Core-shell structured carbon nanotube/ poly (methylmethacrylate) composite and its electrorheological activity*, *Diamond and Related Materials*, 17, 2008, 1604-1608.
- [32] KAWAI, A., IDE, Y., INOUE, A., IKZAKI, F. *Electrorheology of miscle blended liquid- cristalline polymer: A dielectric property approach*, *Journal of Chemical Physics*, 109, 1998, 4587-4591.
- [33] PARTHASARATY, M., KLINGENBERG, D.J. *Electrorheology: Mechanisms and models*, *Materials Science & Engineering R-Reports*, 17, 1996, 57-103.
- [34] WINSLOW, W.M.: *Methods and means of translating electrical impulses into mechanical force*, *US Patent* 21 47 750, 1947.
- [35] QUADRAT, O., STEJSKAL, J.: *Polianiline in Electrorheology*, *Journal Ind. Eng. Chem.*, 2006, 12, 3, s. 352-361.

[36] SCHLUMBERGER [online]. 2011 [cit. 2022-20-05]. Rheological models. Dostupné z: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/r/rheological.aspx>

[37] CHOI, H.J., JHON, M.S.: *Electrorheology of polymers and nonocomposites*, *Soft Matter*, *The Royal Society of Chemistry*, 2009, 5, s. 1562-1567.

[38] BLOCK, H., Kelly, J.P., QIN, A., WATSON, T.: *Materials and Mechanisms in Electrorheology*, *Langmuir*, 6, 1990, 6-14.

[39] NOH, J., YOON, C. M., JANG, J. J. *Colloid Interface Sci.* 470, (2016), 237.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ER	Elektroreologický
η	Smyková viskozita
τ	Smykové napětí
$\dot{\gamma}$	Rychlost smykové deformace
τ_y	Prahové napětí
t	Čas
ρ	hustota částic,
c	koncentrace částic,
v	průměrná hodnota objemu částic,
$k_B T$	tepelná energie,
ϵ_m	dielektrická konstanta tekutého média,
α	konstanta.
η_{pl}	plastická viskozita
n	parametr charakterizující neNewtonské chování
E	Intenzita elektrického pole
OŽ	částice dihydrátu štavelanu železnatého
PANI	polyanilín

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 - Polymerace anilínu na polyanilín</i>	13
<i>Obr. 2 - Polypyrol</i>	13
<i>Obr. 3 - Typy tokového chování pro různé systémy</i>	17
<i>Obr. 4 - Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro elektoreologický systém PANI částic při různých intenzitách elektrického pole [kV/mm]</i>	17
<i>Obr. 5 - Závislost smykového viskozity na rychlosti smykové deformace pro elektoreologickou suspenzi PANI částic, protonovaných kyselinou fosforečnou, v silikonovém oleji při různých intenzitách elektrického pole E [kV/mm]</i>	18
<i>Obr. 6 - SEM snímky částic</i>	27
<i>Obr. 7 - Práškové XRD difraktogramy částic OŽ připravených za různých podmínek syntézy.</i>	29
<i>Obr. 8 - Smykové napětí v závislosti na smykové rychlosti pro suspenze ER obsahující částice oxalátu železa(II) připravené za různých podmínek syntézy (5 obj. %).</i>	32

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 - Variace v podmínkách syntézy částic šřavelanu železnatého.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 2 - Podmínky syntézy částic OŽ použitých dle v této práci a jejich rozměrové charakteristiky.</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 3 - Velikost krystalů (XRD), hustota a vodivost zkoumaných částic OŽ.....</i>	<i>26</i>