



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

**VÝBĚR VHODNÝCH ADITIV KE ZVÝŠENÍ SEDIMENTAČNÍ
STABILITY MAGNETOREOLOGICKÝCH KAPALIN**

SELECTION OF SUITABLE ADDITIVES TO IMPROVE THE SEDIMENTATION STABILITY OF
MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Vlachová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Smilek, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1187/2017
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Kristýna Vlachová**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Spotřební chemie
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Smilek, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Název bakalářské práce:

Výběr vhodných aditiv ke zvýšení sedimentační stability magnetoreologických kapalin

Zadání bakalářské práce:

- 1) Provést rešerši na téma sedimentační stability magnetoreologických (MR) kapalin s ohledem na výběr vhodných aditiv.
- 2) Na základě současného stavu řešené problematiky vybrat vhodná aditiva zvyšující stabilitu MR kapalin.
- 3) Optimalizovat přípravu MR kapalin s přidavkem vhodných aditiv.
- 4) Laboratorně ověřit vliv vybraných aditiv na stabilitu MR kapalin.
- 5) Provést diskuzi výsledků s ohledem na přípravu stabilních MR kapalin.

Termín odevzdání bakalářské práce: 21.5.2018

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Kristýna Vlachová
student(ka)

Ing. Jiří Smilek, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2018

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá přípravou sedimentačně stabilní magnetoreologické (MR) kapaliny s využitím vhodných aditiv. V první části jsou popsány obecné vlastnosti této suspenze, další možnosti její stabilizace a využití v praxi. K danému tématu byla také vypracovaná rešeršní studie na základě dostupné literatury. Na základě provedené literární rešerše byl v experimentální části navržen postup přípravy MR kapaliny, která vykazovala zvýšenou stabilitu. Sedimentační stabilita byla vyhodnocena pomocí přístroje využívajícího sledování změn hustot magnetického toku a na analytické odstředivce.

ABSTRACT

This thesis deals with preparation of a sedimentation stable magnetorheological (MR) fluid with the use of suitable additives. Based on literary research, the first part describes general properties of this suspension, other options for its stabilization and its use in practice. In terms of the above literature research, preparation of a MR fluid with increased stability is proposed in the experimental part. Sedimentation stability was evaluated both by a device using magnetic flux density and by an analytical centrifuge.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologická kapalina, povrchově aktivní látka, suspenze

KEYWORDS

Magnetorheological fluid, surfactant, suspension

VLACHOVÁ, K. *Výběr vhodných aditiv ke zvýšení sedimentační stability magnetoreologických kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Smilek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Smilkovi, Ph.D. za odborné rady, ochotu, trpělivost a čas, který mi věnoval. Velké poděkování patří také mým rodičům a především mému příteli Járovi, kteří mě podporovali v průběhu celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD.....	7
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	8
2.1	Definice disperzních soustav.....	8
2.1.1	Rozdělení disperzních systémů.....	8
2.2	Sedimentace	9
2.3	Možnosti stabilizace suspenzí.....	10
2.4	Složení MR kapalin.....	11
2.4.1	Porovnání s feromagnetickou kapalinou	11
2.5	Možnosti zlepšení sedimentace MR kapalin.....	12
2.5.1	Různé velikosti částic	12
2.5.2	Polymerní vrstva.....	12
2.5.3	Různé tvary částic.....	13
2.5.4	Nosná kapalina.....	13
2.5.5	Aditiva	13
2.6	Vybraná aditiva	14
2.6.1	Kyselina palmitová	15
2.6.2	Kyselina olejová	16
2.6.3	Dodecylsírán sodný SDS	16
2.6.4	Span 20	16
2.6.5	Span 80	16
2.6.6	Span 85	17
2.6.7	Triton X-114	17
2.6.8	Tween 20	17
2.6.9	Tween 80	18
2.7	Fyzikální popis MR kapalin.....	18
2.7.1	Reologie.....	18
2.7.2	Magnetoviskózní jev.....	19
2.8	Aplikace MR kapalin	20
2.8.1	Seismická ochrana staveb	20
2.8.2	Biomechatronika.....	20
2.8.3	Automobilový průmysl.....	20
2.8.4	Povrchová úprava	21

3	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	22
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
4.1	Použité chemikálie	28
4.2	Použité částice	28
4.3	Výběr vhodné nosné kapaliny	28
4.4	Použité přístroje	28
4.5	Příprava vzorků pro stanovení rozpustnosti aditiv v minerálním oleji	28
4.6	Příprava MR kapalin s minerálním olejem jako nosnou kapalinou	29
4.6.1	Koncentrační řada Tweenu 20	29
4.7	Příprava emulzí typu V/O pro zjištění jejich stability	30
4.8	Příprava MR kapalin s emulzí typu V/O jako nosnou kapalinou	31
4.8.1	Příprava emulzí	31
4.8.2	Chemisorpce částic	32
4.9	Příprava MR kapaliny pro měření sedimentační stability	32
4.10	Příprava MR kapalin pro měření na analytické odstředivce	33
5	VÝSLEDKY A DISKUZE	34
5.1	Sledování rozpustnosti aditiv v minerálním oleji	34
5.2	Výsledky stabilit MR kapalin s minerálním olejem jako nosnou kapalinou	35
5.2.1	Koncentrační řada Tweenu 20	36
5.3	Výsledky stabilit emulzí typu V/O	37
5.4	Výsledky stabilit MR kapalin s emulzí typu V/O jako nosnou kapalinou	39
5.5	Výsledky stability MR kapaliny	40
5.6	Výsledky stabilit MR kapalin při měření na analytické odstředivce	41
6	ZÁVĚR	43
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	49

1 ÚVOD

Již v devatenáctém století se studovala kapalina obsahující magnetické částice, která by měnila své vlastnosti v přítomnosti magnetického pole. První magnetoreologickou kapalinu (dále jen MR kapalinu), která vykazuje změnu viskozity v magnetickém poli, připravil Jacob Rainbow ve 40. letech 20. století. Původně tyto kapaliny využíval Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (NASA), kde bylo nutné řídit tok paliva kosmických raket magnetickým polem v beztlížném stavu. V současnosti se tyto kapaliny využívají hlavně u tlumičů a brzd automobilů, kde je nutná rychlá odpověď na vnější podnět. Využití těchto zařízení nalezneme jak v automobilovém průmyslu [1], tak například ve zdravotnictví [2].

Obecně jsou MR kapaliny suspenze, které vykazují reverzibilní přechod z kapalného stavu do pevného stavu v přítomnosti vnějšího magnetického pole a jsou řazeny mezi tzv. „inteligentní materiály“. Avšak velkou nevýhodou těchto kapalin je jejich sedimentační nestabilita. MR tekutiny totiž obsahují feromagnetické částice dispergované v kapalném médiu (nosné kapalině). Vzhledem k velkému rozdílu hustot mezi těmito složkami dochází v suspenzi k sedimentaci částic.

Pro zvýšení sedimentační stability MR kapalin již byla navržena a vyzkoušena různá opatření. Jedná se například o přítomnost různě velikých nebo tvarovaných částic, obalení částic polymerní vrstvou, změně nosné kapaliny a v neposlední řadě o přidání vhodných aditiv. Avšak na úkor značně snížené sedimentace docházelo zároveň ke změnám vlastností MR kapalin, která omezují jejich využití v praxi.

Tato práce je zaměřena právě na výběr vhodných aditiv, která by měla zvýšit sedimentační stabilitu magnetoreologických kapalin a zároveň zachovat její vlastnosti.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Definice disperzních soustav

Disperzní soustavu (disperzi) tvoří disperzní spojité prostředí, ve kterém jsou rozptýlené částice, tzv. disperzní podíl. Mezi těmito složkami nedochází ke vzniku či zániku chemických vazeb z čehož vyplývá, že se nejedná o chemický děj. Ve směsi však dochází k podstatným změnám z fyzikálního hlediska. Mění se například teplota tání a varu, index lomu a jiné. Směs lze od sebe separačními metodami oddělit na jednotlivé komponenty. Jak se bude disperzní systém chovat, určuje řada faktorů. Jedná se hlavně o velikost disperzních částic a o počet fází, které se v systému nachází. Důležitý je i tvar částic a jejich vzájemná interakce, dále interakce mezi částicemi a disperzním prostředím, skupenství disperzního podílu a prostředí [3, 4].

2.1.1 Rozdělení disperzních systémů

Podle velikosti částic (disperzního podílu) disperze dělíme na analytické ($<10^{-9}$ m), koloidní (10^{-9} – 10^{-6} m) a hrubé disperze ($>10^{-6}$ m), jak můžeme vidět na *Obrázku 1*. Tyto systémy však od sebe nejsou ostře oddělené, nachází se mezi nimi plynulé přechody [4].

stupeň disperzity		velikost částic
ANALYTICKÉ DISPERZE $d < 10^{-9}$ m	KOLOIDNÍ DISPERZE $10^{-9} < d < 10^{-6}$ m	HRUBÉ DISPERZE mikro $10^{-6} < d < 10^{-5}$ m makro $d > 10^{-5}$ m

Obrázek 1: Přehled disperzních systémů [4].

- **Analytické disperze**

Analytické disperze jsou vždy homogenní (stejnorodé) a disperzní podíl společně s disperzním prostředím tvoří jedinou fázi. Směs má definované složení a vlastnosti v celém svém objemu a jednotlivé složky nelze rozeznat pouhým okem ani v elektronovém mikroskopu. Důkaz, že obsahují více druhů hmoty, prokážeme pouze chemickou analýzou. Částice vykonávají velmi intenzivní tepelný pohyb a nesedimentují ani při vystavení odstředivému poli. Tyto směsi dělíme na pravé roztoky (sůl rozpuštěná ve vodě) a slitiny [3, 4].

- **Koloidní disperze**

Pokud jsou částice složek ve velikostním rozmezí 10^{-9} až 10^{-6} m, jedná se o koloidy. Tepelný pohyb je slabší než u analytické disperze, ale intenzivnější než u hrubé disperze. Jednotlivé složky koloidní disperze jsou pozorovatelné pouze pod mikroskopem. Příkladem koloidních směsí je krev, mléko, bílek ve vodě, mýdlo nebo zubní pasta [3, 4].

Koloidně disperzní systémy můžeme rozdělit do dalších dvou skupin a to na lyofobní (koloidní) disperze a lyofilní koloidy (koloidní roztoky). Lyofobní disperze jsou heterogenní systémy, kde se disperzní podíl a disperzní prostředí nachází ve dvou různých fázích. Tyto směsi jsou nestálé a samovolně zanikají. Od hrubých disperzí se liší jen velikostí částic. Naopak u lyofilních koloidů tvoří disperzní podíl s disperzním prostředím jedinou fázi, a proto se jedná o homogenní koloidní systémy. Jde o pravé roztoky makromolekul, u kterých převažuje Brownův tepelný pohyb, a jsou tedy stálé [4].

- **Hrubé disperze**

U hrubé disperze dokážeme rozpoznat jednotlivé složky ve směsi pouhým pozorováním. Rychle sedimentují, protože vykonávají jen velmi slabý nebo žádný tepelný pohyb. Jsou tudíž nestálé a samovolně zanikají. Porovnání s koloidní disperzí můžeme vidět v *Tabulce 1* [3, 4].

Tabulka 1: Rozdělení disperzních soustav [4].

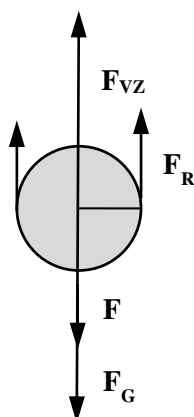
Disperzní prostředí	Disperzní podíl	Disperze	
		koloidní	hrubé
plynné	plynný	-	-
	kapalný	aerosoly (mlhy)	děšť, mlhy
	pevný	aerosoly (dýmy)	prachy, dýmy
kapalné	plynný	pěny	bubliny, pěny
	kapalný	emulze	emulze
	pevný	lyosoly	suspenze
pevné	plynný	tuhé pěny	tuhé pěny, minerály s uzavřenými plyny
	kapalný	tuhé emulze	tuhé emulze, minerály s uzavřenými kapičkami
	pevný	tuhé soly	tuhé směsi (eutektika)

V této práci se dále budu zabývat suspenzemi, což jsou heterogenní směsi jemně dispergovaných pevných částic v kapalném prostředí. Částice se v rozpouštědle nerozpouštějí a vyskytují se v celém jeho objemu. Se suspenzemi se setkáváme v mnoha průmyslových odvětvích. Jejich využití najdeme v různých aplikacích a zahrnují například keramiku, inkousty, kapalné brusné materiály, potraviny a léky [5].

2.2 Sedimentace

Pokud silové pole (gravitační nebo odstředivé) působí na hrubě a koloidně disperzní systémy, částice se pohybují usměrněným pohybem, který může vést až k jejich úplnému usazení.

Při ustáleném pohybu částice v kapalině se uplatňují tři síly (viz *Obrázek 2*): gravitační síla F_G , vztlková síla F_{vz} a odpor prostředí F_R , což je síla působící proti gravitační síle a přispívá tak k sedimentační stabilizaci. Pokud se částice usazuje neustáleným pohybem, uvažujeme také sílu akcelerační F [6].



Obrázek 2: Síly, které ovlivňují padající částici v tekutině [6].

Síla gravitace jako součin hmotnosti částice a gravitačního zrychlení:

$$F_G = m \cdot g \quad (1)$$

Síla vztlaku jako součin hmotnosti kapaliny tělesem vytlačené a gravitačního zrychlení:

$$F_{vz} = \frac{\pi \cdot d_c^3}{\rho_l \cdot g} \quad (2)$$

Jestliže předpokládáme, že tvar částic je kulatý a neuvažujeme srážky mezi částicemi, zavádíme podle Stokesova zákona **odporovou sílu prostředí**,

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (3)$$

kde d_c je průměr částice, ρ_c je hustota částice, ρ_l je hustota kapaliny, η je dynamická viskozita prostředí, v je rychlost částice a r je poloměr částice [4, 6].

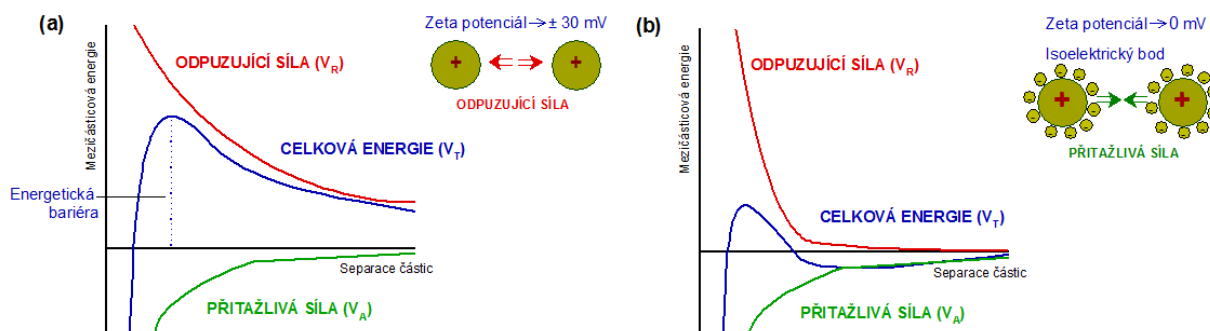
2.3 Možnosti stabilizace suspenzí

Klíčové měřítko, které je důležité pro všechny aplikace suspenzí, je jejich stabilita. Aby suspenze byla považována za funkční, musí disperzní fáze suspendovat po dobu existence výrobku. Stabilitu dispergované fáze ovlivňuje řada faktorů, které jsou nejčastěji termodynamického nebo kinetického původu. Termodynamická stabilita zahrnuje prostorovou a elektrostatickou stabilizaci, která je vyvolána vzájemným odpuzováním částic. Pokud zvýšíme viskozitu suspenzního prostředí a tím zpomalíme sedimentaci částic, mluvíme o kinetické stabilitě [5].

Částice se mohou mezi sebou srážet a následně se shlukovat díky Van der Waalsovým přitažlivým silám. To vede k vytvoření sekundárních částic, které mají mnohem větší velikost, a z tohoto důvodu rychleji sedimentují. Aby se zabránilo tomuto shlukování částic, jsou do suspenze přidávány prostorové či elektrostatické prostředky nebo se zavede náboj na povrch částice, například upravením pH. Ve stabilním systému by měla odpudivá síla převyšovat přitažlivou sílu mezi částicemi.

Princip rovnováhy sil elektricky nabitě suspenze se může popsat teorií DLVO (zpracována autory Děrjaginem, Landauem, Verweym a Overbeekem), kde je celková energie V_T součtem příspěvku přitažlivé V_A a odpudivé síly V_R (viz *Obrázek 3*). Tato teorie říká, že energetická bariéra vycházející z odpudivé síly nedovolí, aby se částice navzájem k sobě přiblížily a držely pohromadě. Podmínkou je, aby tyto částice neměly dostatečně silnou tepelnou energii pro překonání této bariéry.

Zeta potenciál vyjadřuje velikost potenciálové bariéry. Jedná se o potenciál na rovině skluzu mezi částicí a sdrúženou dvojvrstvou s přítomným rozpouštědlem. Obecná hranice mezi stabilní a nestabilní suspenzí je +30 mV nebo -30 mV. Jestliže mají částice v suspenzi vysoký negativní nebo pozitivní potenciál, jsou mimo meze, budou se navzájem odpuzovat a nebudou mít tendenci se shlukovat [5].



Obrázek 3: Schéma změny volné energie s oddělením částic pro suspenzi s (a) vysokým zeta potenciálem a (b) nízkým zeta potenciálem [5].

2.4 Složení MR kapalin

Obor, který se zabývá MR kapalinami se nazývá ferohydrodynamika. Dnes popisujeme magnetoreologickou kapalinu jako suspenzi magnetických částic o velikosti mikrometrů dispergovaných v nosné kapalině. Vhodným materiálem pro výrobu částic může být například železo, slitiny železa (železo-kobalt nebo železo-nikl), oxidy železa, nitrid železa, karbid železa, nikl a kobalt. Nejběžněji se však používají částice karbonylu železa [7].

Nosná kapalina je nemagnetická a tvoří obvykle 60 - 80 obj. % MR kapaliny a tvoří její kontinuální fázi. Může jí být například silikonový olej, minerální olej, parafínový olej, silikonový kopolymer, polyoxyalkylen, glykol, hydraulické oleje, fluorované silikony a voda. Praktické použití vody jako nosné kapaliny je však nevhodné z důvodu jejího nízkého bodu varu a korozním vlastnostem [7].

Jako novým nosným médii by také mohly být speciální iontové kapaliny. Tato kapalina je vysoce odolná proti podtlaku a je nehořlavá, a proto je vhodná pro použití v kosmických technologiích. Navíc dokáže tvořit jak hydrofilní, tak hydrofobní skupenství a je ekologicky nezávadná [8].

2.4.1 Porovnání s feromagnetickou kapalinou

Jak feromagnetické, tak MR kapaliny zařazujeme mezi takzvané chytré materiály. To znamená, že dokážou reverzibilně reagovat na vnější podněty, v našem případě na magnetické pole.

Feromagnetické kapaliny můžeme také označovat jako magnetické nanokapaliny. Jedná se o koloidní kapaliny, které získávají magnetické vlastnosti díky rozptýleným nanočásticím feromagnetického materiálu. Velikost částic se pohybuje od 3 do 15 nm a jsou natolik malé, že obsahují pouze jediný dipól. V magnetickém poli se částice zřetězí bez významné změny viskozity [9]. V důsledku malých rozměrů částic dochází k jejich samovolnému rozptýlení v nosné kapalině Brownovým pohybem. Díky tomuto fyzikálnímu jevu nedochází u ferokapalin k samovolné sedimentaci, a proto je můžeme považovat za stabilní. Tyto kapaliny naleznou uplatnění v aplikacích vyžadujících magneticky ovladatelnou kapalinu, jako je například zařízení určené pro tlumení vibrací, těsnění hřídelí, chladicí a izolační médium. Využívá se i v lékařství, např. k likvidaci nádorů nebo k dodání léků na určité místo v těle [9].

Z Tabulky 2 je patrné, že MR kapaliny mají o tři řády větší částice než feromagnetické kapaliny. Jejich velikost se pohybuje mezi 0,1-10 μm . Při této velikosti jsou již částice multidoménny a tím kapalina získává schopnost měnit viskozitu v přítomnosti magnetického pole [9].

Tabulka 2: Rozdíly mezi feromagnetickou kapalinou a MR kapalinou

Vlastnost	Feromagnetická kapalina	Magnetoreologická kapalina
Velikost částic	2-10 nm	0,1-10 μm
Hustota částic	1-2 g/cm^3	3-5 g/cm^3
Podíl částic v kapalině	5 obj. %	10-30 obj. %
Domény částice	1	Multidoménny
Viskozita	2-500 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	100-1000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$

2.5 Možnosti zlepšení sedimentace MR kapalin

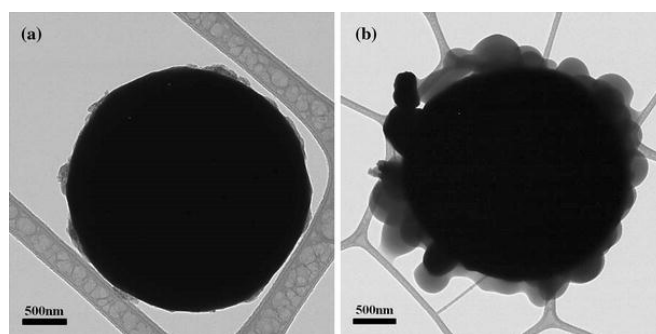
MR kapalina by měla mít nejen dobré magnetoreologické vlastnosti, ale také by měla být stabilní. Sedimentační nestabilita MR kapalin značně omezuje jejich využití v průmyslu, technice a biomedicině z důvodu snížení účinnosti magnetoreologického efektu. Z důvodu rozdílné hustoty částic a nosné kapaliny se magnetické částice sedimentují již pouhým působením gravitačního pole. Nicméně sedimentaci částic v nosné kapalině lze snížit zavedením následujících opatření [7, 10].

2.5.1 Různé velikosti částic

Lepší sedimentační stabilitu a magnetické vlastnosti má MR kapalina, která obsahuje alespoň dvě různě velké železné mikročástice. Na toto téma se zaměřilo několik výzkumů. Trendler a kol. [11] testoval různé poměry malých a velkých částic (1,8 μm a 6,7 μm) v MR kapalině. Z hlediska stability se zdá, že nejlepší poměr mezi velkými a malými částicemi je 2:1. Ngatu a kol. [12] studoval MR kapaliny složené z různých poměrů mikročástic (2-10 μm) a nanočástic (40 nm) dispergovaných v silikovém oleji. Když nahradil mikročástice nanočásticemi zvýšila se sedimentační stabilita, ale mez kluzu se výrazně snížila. Jönkkäri a kol. [13] opakovale předchozí měření s mírně odlišnými velikostmi částic (2 μm a 50 nm) a iontovou kapalinou jako nosnou kapalinou. Se změnou velikosti částic a nosné kapaliny vykazovala MR kapalina výrazně menší snížení meze kluzu a lepší sedimentační stabilitu.

2.5.2 Polymerní vrstva

Bylo dokázáno, že částice potažené polymerem významně přispívají k sedimentační stabilitě MR kapalin. Polymerní povlaky (viz Obrázek 4), které jsou pevně vázány k povrchu mikročástic a jsou založené na nekontrolovatelné polymeraci, snižují hustotu částice, a tak snižují jejich sedimentační rychlost. Nicméně u takto připravených MR kapalin jsou potlačeny magnetické vlastnosti [14].



Obrázek 4: Snímek z transmisního elektronového mikroskopu. (a) čisté CI částice, (b) CI částice s polymerní vrstvou PGMA (poly(glycidyl methacrylátu)) [14].

Technika ATRP (*atom transfer radical polymerization*) vytváří kontrolovatelnou polymerní vrstvu, a proto lze získat konkrétní tloušťku polymerního povlaku. Částice mají navíc dostatečnou ochranu proti sedimentaci, termo-oxidaci a korozi. Polymerní povlak s délkou polymerního řetězce až $12\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ snižuje magnetické vlastnosti pouze zanedbatelně. Ovšem chování takto upravených částic pod zatížením, které odpovídá skutečnému provozu MR kapalin, tj. teplotě kolem $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vysokému mechanickému zatížení, nebylo dodnes zkoumáno [15, 16].

2.5.3 Různé tvary částic

Bylo dokázáno, že vločkovité, ploché nebo vláknité částice zlepšují sedimentační stabilitu. Shah a kol. [17] zkoumali rychlost sedimentace u plochých částic o průměru $2\text{ }\mu\text{m}$ a $19\text{ }\mu\text{m}$ a zjistili, že MR suspenze vykazuje nižší sedimentační rychlost a vyšší mez kluzu. Upadhyay a kol. [18] testovali částice vločkovitého tvaru, které zlepšují sedimentační stabilitu, ale zároveň snižují mez kluzu v magnetickém poli oproti sférickým částicím.

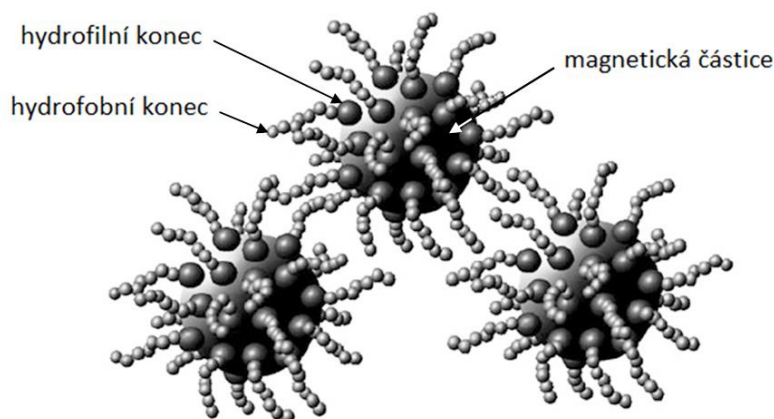
2.5.4 Nosná kapalina

Čím je hustší nosná kapalina, tím je sedimentace přítomných částic pomalejší. U takovéto MR kapaliny se nemění magnetické vlastnosti, ale výrazně se zvyšuje viskozita, což není pro technickou praxi žádoucí. Dále musí mít nosná kapalina vysoký index viskozity. To znamená, že kapalina minimálně mění viskozitu s teplotou [7, 10].

2.5.5 Aditiva

V současné době je sedimentace v komerčních MR kapalinách nejčastěji stabilizována přidáním surfaktantů, neboli stabilizérů. Jedná se o povrchově aktivní látky, které snižují povrchovou nebo mezifázovou energii.

Surfaktanty jsou složeny z oligomerů, což jsou molekuly složeny z desítek monomerů [7]. Z pohledu molekulární struktury se surfaktant skládá ze dvou částí. Jeden konec povrchově aktivní molekuly tvoří hydrofilní skupina, která bude adsorbovat na povrchu prášku karbonylu železa a druhý konec s hydrofobní skupinou (viz *Obrázek 5*), která se rozprostře na nosnou kapalinu. Právě tyto rozdílné skupiny jsou hlavním důvodem, proč se surfaktanty používají. Samotná magnetická částice má hydrofilní povrch a po jejím přidání do nosného média by se s ním snadno spojila. Pokud přidáme surfaktant, vytvoří na povrchu mikročástice aktivní film a stává se tak nerozpustnou ve vodě [7, 19].



Obrázek 5: Schématický pohled na magnetické částice se surfaktantem [20].

Povrchově aktivní látka zároveň tvoří interakci trojrozměrného skeletu uvnitř nosné kapaliny, která snižuje usazování částic. Také zvyšuje efektivní objem částic a zvyšuje odpudivé síly mezi částicemi, což snižuje proces aglomerace a koagulace, ke kterým může u MR kapalin dojít. Ačkoliv lze tímto způsobem zabránit sedimentaci a shlukování částic často dochází i ke zhoršení vlastností MR kapalin v aktivovaném stavu. Podle struktury povrchově aktivní látky, dělíme z hlediska iontového charakteru hydrofilní skupiny na ionogenní (aniontový, kationový a amfoterní) a neionogenní [7].

Zde jsou uvedeny příklady povrchově aktivních látek, které jsou používány pro zlepšení sedimentační stability MR kapalin: lipofilní jíly, částice organojílu [9], dodecylbenzensulfonát sodný, polyethylenglykol, kyselina olejová, kyselina palmitová, alkylaminfosfátový ester, emulgátor 2-[2-[4-(2,4,4-trimethylpentan-2-yl)phenoxy]ethoxy]ethanol, triolein, silanové vazebné činidlo [7]. Výzkum srovnávající tyto přísady však dosud nebyl dokončen, a proto se jimi budu v této práci dále zabývat.

2.6 Vybraná aditiva

Pro své experimenty jsem použila tato aditiva: kyselinu olejovou a kyselinu palmitovou, SDS (dodecylsírán sodný), Span 20, Span 80, Span 85, Triton X-114, Tween 20, Tween 80.

Jako vzorová nosná kapalina pro mé měření a pokusy byl použit minerální olej (Sigma Aldrich). Vhodná aditiva byla vybrána nejdříve na základě jejich rozpustnosti a mísitelnosti právě v tomto oleji. Pokud se minerální olej s daným aditivem smísil, byla u tohoto roztoku změřena viskozita. Hodnoty naměřených viskozit by se neměly velmi lišit od hodnot viskozit samotného oleje.

Jelikož v experimentální části nebudu vždy používat samotný minerální olej jako nosnou kapalinu, ale i emulzi vody v oleji, zaměřila jsem se u vybraných povrchově aktivních látek na hodnoty HLB (hydrophiliclipophilic balance). Hydrofilně-lipofilní rovnováha je způsob, jak kvantitativně popsat schopnost surfaktantů stabilizovat daný typ emulze. Emulze rozdělujeme na dva základní typy:

- voda v oleji (V/O) – voda je dispergována v oleji
- olej ve vodě (O/V) – olej je dispergován ve vodné fázi

Lipofilní surfaktanty mají nízké hodnoty HLB (viz *Tabulka 3*) a stabilizují emulze V/O. Naopak hydrofilní surfaktanty, rozpustné ve vodě, mají vysoké hodnoty HLB a dobře stabilizují emulze O/V. Hodnotu HLB lze spočítat různými empirickými vzorci. Zde je příklad vztahu založeného na příspěvcích jednotlivých skupin v molekule [21].

$$HLB = 7 + \sum \text{příspěvky jednotlivých skupin} \quad (4)$$

Tabulka 3: Hodnoty příspěvků jednotlivých skupin v molekule pro výpočet HLB [21].

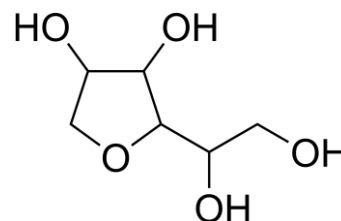
Skupina	HLB	Skupina	HLB	Skupina	HLB
-SO ₄ Na	38,7	-OH	1,9	=CH-	-0,475
-COOK	21,1	-O-	1,3	-CF ₂ -	-0,87
-COONa	19,1	-CH-	-0,475	-CF ₃	-0,87
≡N	9,4	-CH ₂ -	-0,475	-(CH ₂ CH ₂ O)-	0,33
-COOH	2,1	-CH ₃	-0,475	-(CH ₂ CH ₂ CH ₂ O)-	-0,15

Jedny z vhodných aditiv pro stabilizaci emulze typu V/O vybraných na základě předchozích kritérií jsou tenzidy s označením Span. Obecně to jsou neionogenní tenzidy. Právě jejich iontová neutralita jim dává řadu výhod oproti iontovým povrchově aktivním látkám. Například jsou více stabilní v mírných kyselinách, zásadách i elektrolytech a nereagují s iontovými složkami ani aktivními látkami. Dále jsou vysoce účinnými rozpouštědly, dispergačními činidly a pomocnými látkami pro zvlhčování. Různými kombinacemi Spanu a Tweenu jsou výrobci schopni vyrábět tenzidy s širokým rozsahem HLB (viz *Tabulka 4*) [22].

Tabulka 4: Rozsah hodnot HLB Spanu a Tweenu [22].

Název	Hodnota HLB	Název	Hodnota HLB
Span 20	8,6	Tween 20	16,7
Span 40	6,7	Tween 21	13,3
Span 60	4,7	Tween 40	15,6
Span 80	4,3	Tween 60	14,9
Span 83	3,7	Tween 61	9,6
Span 85	1,8	Tween 65	10,5
Span 120	4,7	Tween 80	15,0

Spany jsou známé estery sorbitanu, jehož konstituční vzorec můžeme vidět na *Obrázku 6*. Jsou to biologicky odbouratelné povrchově aktivní látky, které se používají jako emulgační činidla pro přípravu emulzí, krémů a mastí pro farmaceutické a kosmetické použití. Estery sorbitanu také můžeme najít jako emulgátory a stabilizátory v potravinách [22].

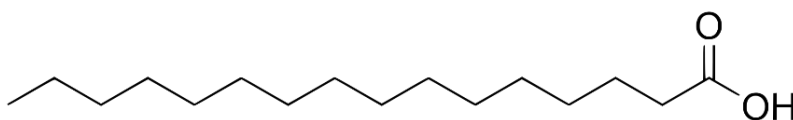


Obrázek 6: Konstituční vzorec sorbitanu [22].

Tween je polyethoxylovaný ester sorbitanu. Jednoduše řečeno, Tween je ethoxylovaný Span. Obecně jsou hydrofilní a jsou rozpustné nebo dispergovatelné ve vodě a zředěných roztocích elektrolytů. Rozpustnost Tweenu ve vodných roztocích se zvyšuje se stupněm ethoxylace [22].

2.6.1 Kyselina palmitová

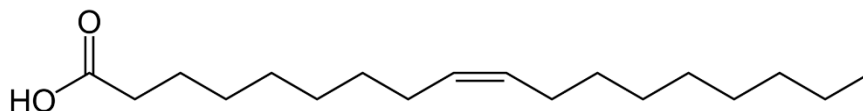
Kyselinu palmitovou můžeme zařadit mezi nasycené karboxylové kyseliny (viz *Obrázek 7*). Jedná se o bílou pevnou látku. Ve formě esterů (glyceridů) se vyskytuje v olejích a tucích rostlinného i živočišného původu. Tuto látku můžeme nalézt nejen v palmovém oleji ale také v másle, mléku, sýrech a mase. V praxi se využívá k určování tvrdosti vody nebo jako ultrazvukové kontrastní médium či k výrobě mýdel. Její směs s kyselinou stearovou (stearín) se používá při výrobě kosmetických krémů, výrobě svíček a leštících past [22].



Obrázek 7: Konstituční vzorec kyseliny palmitové [22].

2.6.2 Kyselina olejová

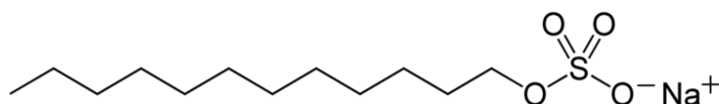
Kyselina olejová je mononenasyčená karboxylová kyselina (viz *Obrázek 8*) přítomná v různých živočišných a rostlinných tucích. Tato bezbarvá až bledě žlutá kapalina je nerozpustná ve vodě. Komerčně se používá při výrobě pleťových vod a farmaceutických rozpouštědel, povrchově aktivních látek a mýdel [22].



Obrázek 8: Konstituční vzorec kyseliny olejové [22].

2.6.3 Dodecylsírán sodný SDS

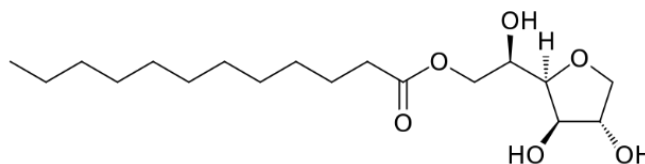
Dodecylsírán sodný je aniontová povrchově aktivní látka, která snižuje povrchové napětí vodných roztoků. SDS má díky své struktuře (viz *Obrázek 9*) amfifilní charakter, a proto je předurčen k detergentním vlastnostem. Tato látka je tedy využívána v čistících a hygienických prostředcích, je součástí odmašťovačů a čistících prostředků na podlahu. V nižších koncentracích jej můžeme najít v zubních pastách, pěnách na holení a šamponech [22].



Obrázek 9: Konstituční vzorec SDS [22].

2.6.4 Span 20

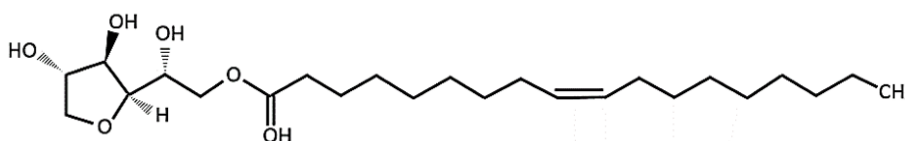
Sorbitan monolaureát neboli Span 20 (viz *Obrázek 10*) je ester sorbitanu a kyseliny laurové. Jedná se o viskózní kapalinu žluté barvy, která se využívá jako mazivo a emulgátor. Jako přísada v potravinách je označován pod číslem E493 [22].



Obrázek 10: Konstituční vzorec Spanu 20 (sorbitan monolaureát) [22].

2.6.5 Span 80

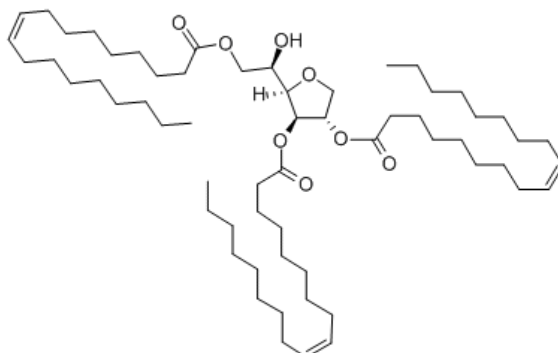
Span 80 znázorněný na *Obrázku 11* je viskózní kapalina žluté barvy, která má nízkou hodnotu HLB, a proto, jak již bylo zmíněno, dobře stabilizuje emulzi typu voda v oleji. Tato emulze nám dále bude sloužit jako nosná kapalina [22].



Obrázek 11: Konstituční vzorec Spanu 80 (sorbitan monooleát) [22].

2.6.6 Span 85

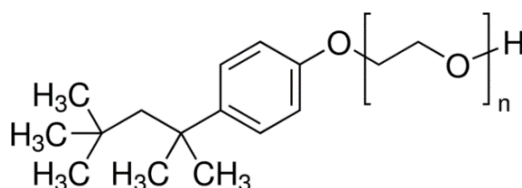
Tento sorbitanový ester obsahuje ve své struktuře tři řetězce kyseliny olejové (viz *Obrázek 12*). Jedná se o viskózní kapalinu oranžové barvy bez zápachu. Využití Spanu 80 najdeme hlavně v medicíně, kosmetice, v nátěrových olejích a protikorozních činidlech [22].



Obrázek 12: Konstituční vzorec Spanu 85 (sorbitan triolát) [22].

2.6.7 Triton X-114

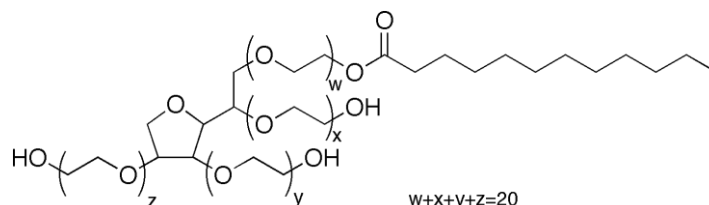
Triton X-114 je bezbarvá až světle žlutá viskózní kapalina. Jeho hodnota HLB je 12,3 a tedy stabilizuje emulze typu O/V. Jedná se o neionogenní povrchově aktivní látku (viz *Obrázek 13*), která se využívá v čisticích prostředcích, v nátěrových barvách, v papírenském průmyslu a agrochemikáliích [22].



Obrázek 13: Konstituční vzorec Tritonu X-114, kde $n = 7-8$ [22].

2.6.8 Tween 20

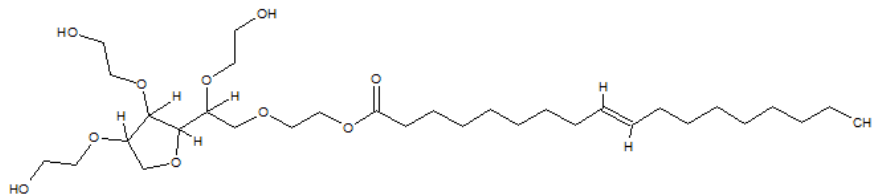
Tento neionogenní detergent (viz *Obrázek 14*) se uplatňuje hlavně v biologických aplikacích, kde se například může využít při extrakci bílkovin vázaných na buněčnou membránu. Používá se jako emulgátor, zpomalovač krystalizace, rozpouštědlo, stabilizátor nebo jako smáčedlo. Nalezneme ho i v kosmetických přípravcích, lécivech i při přípravě potravin [22].



Obrázek 14: Konstit. vzorec Tweenu 20 (Polyoxyethylen sorbitan monolaureát), kde $w+x+y+z=20$ [22]

2.6.9 Tween 80

Tween 80 (viz *Obrázek 15*) má podobnou koncentraci a barvu jako Span 80. Liší se však v hodnotě HLB. Tato hodnota je vyšší a proto je Tween 80 rozpustný ve vodě [22]. Proto dále nebude použit jako stabilizátor emulze typu V/O, ale bude déle aplikován pro chemisorpci železných částic.



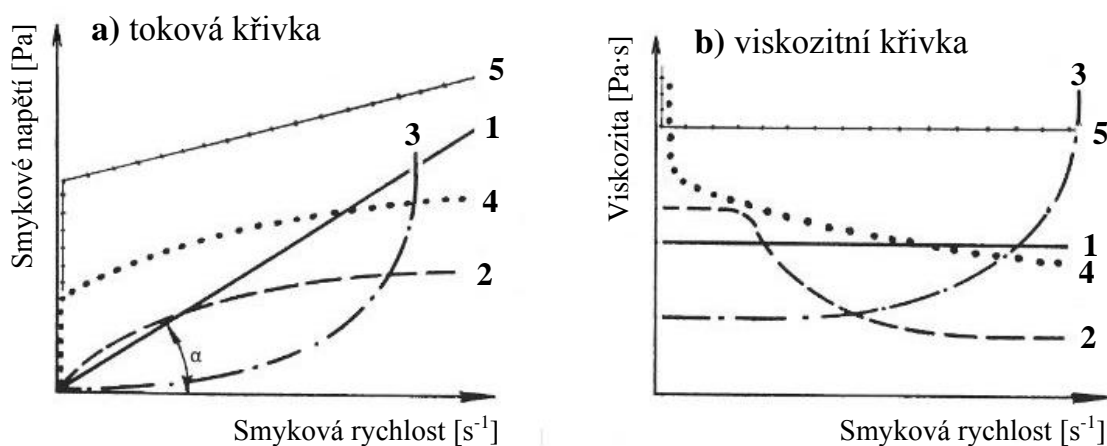
Obrázek 15: Konstituční vzorec Tweenu 80 (polyoxyethylen sorbitan monooleát) [22].

2.7 Fyzikální popis MR kapalin

2.7.1 Reologie

Reologie popisuje, jak se daná látka (těleso) deformuje vlivem vnějších sil. Jedná se jak o látky pevné, tak i kapalně a plynné. Kapaliny podle jejich závislosti rychlosti deformace na napětí rozdělujeme na newtonovské a nenewtonovské (dilatantní, pseudoplastické a binghamské). U newtonovských kapalin je zmíněná závislost lineární. Na základě reologických vlastností (viz *Obrázek 16*) klasifikujeme kapaliny na:

- Newtonovské** – viskozita není závislá na smykové rychlosti ani na čase a je konstantní po celou dobu deformace (např. voda).
- Dilatantní** (smykově houstnoucí) – viskozita roste s rostoucí smykovou rychlostí (např. škrobová suspenze).
- Pseudoplastické** (smykově řídnoucí) – s rostoucí smykovou rychlostí se dynamická viskozita snižuje (např. roztoky či taveniny polymerů).
- Binghamské** – plastické kapaliny; k toku kapaliny dochází až po dosažení určitého prahového smykového napětí (např. zubní pasta, odpadní kaly, MR kapalina). Po překročení tohoto napětí se kapaliny dále chovají jako newtonovské [23, 24].



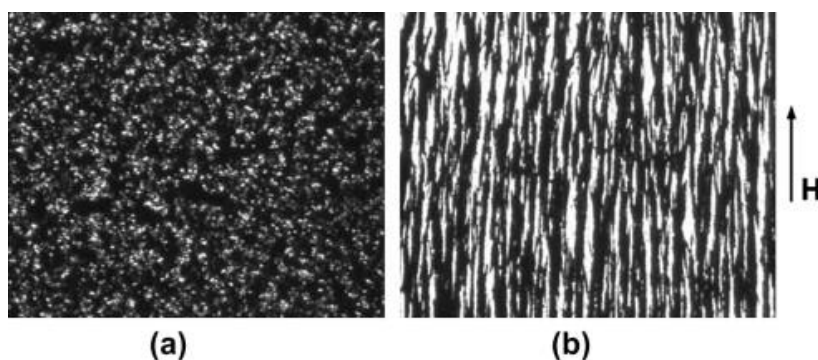
Obrázek 16: Tokové a viskozitní charakteristiky kapalin. 1 – newtonská kapalina; 2 – pseudoplastická kapalina; 3 – dilatantní kapalina; 4 – pseudoplastická kapalina s mezí toku (=plastická); 5 – binghamská kapalina [24].

MR kapalina se sama o sobě chová jako newtonovská kapalina. Avšak v přítomnosti magnetického pole je v mnoha případech popisována modelem Binghamova plastického tečení. Existuje však mnoho faktorů, které ovlivňují výsledné reologické vlastnosti MR kapalin. Jedná se například o koncentraci, hustotu a tvar částic, vlastnosti nosné kapaliny, aplikované pole a teplota [23].

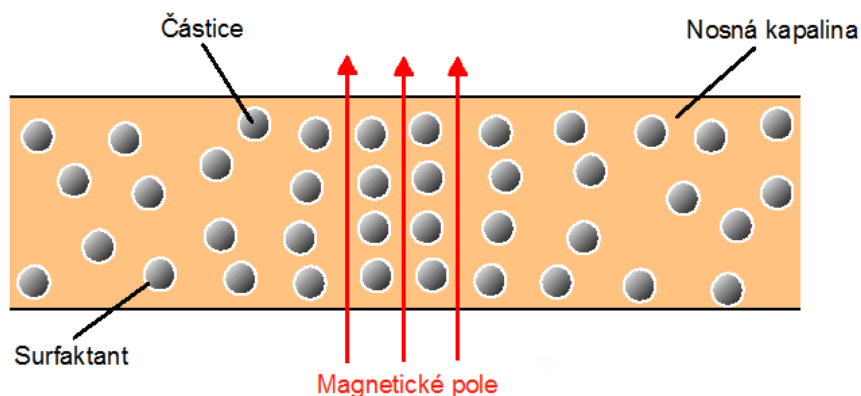
2.7.2 Magnetoviskózní jev

MR kapalina vykazuje nízkou viskozitu a neneutronovské vlastnosti v nulovém magnetickém poli. Nicméně MR kapaliny jsou charakteristické tím, že jsou schopny změnit viskozitu s měnícím se magnetickým polem. Tento jev je označován jako magnetoviskózní. [7, 9].

V nepřítomnosti magnetického pole se pevné částice pohybují volně v kapalině (viz *Obrázek 17 a*). Přenesením magnetického pole na kapalinu se částice seskupí podle směru siločar magnetického pole (viz *Obrázek 18*). Při dostatečně silné intenzitě homogenního magnetického pole a interakce magnetických mikročástic jsou částice schopné vytvářet řetězové struktury, které způsobí silné zvýšení viskozity (viz *Obrázek 17 b*). Její nejvyšší hodnota bude vždy naměřena ve směru kolmém k těmto řetězcům. [15]. Stupeň přeměny se mění s měnící se silou magnetického pole [7].



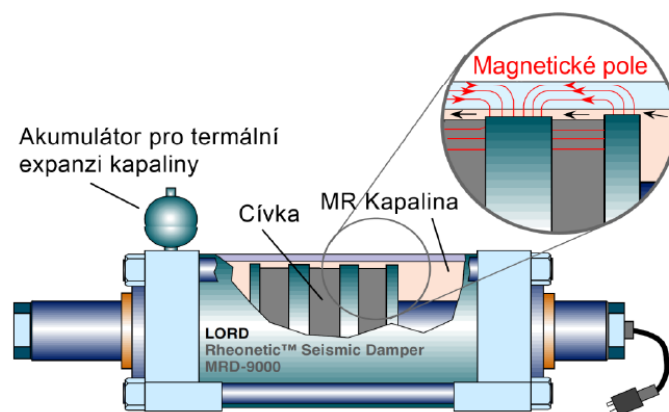
Obrázek 17: Uspořádání částic karbonylového železa: (a) v nepřítomnosti magnetického pole; (b) v přítomnosti magnetického pole [26].



Obrázek 18: Schéma MR kapaliny v přítomnosti magnetického pole.

2.8 Aplikace MR kapalin

Oproti jiným systémům je použití MR tlumičů velmi výhodné hlavně díky jejich nízké reakční době. Tlumiče tak mohou včas reagovat na vnější podněty jako je například zemětřesení [27]. Jak můžeme vidět na *Obrázku 19* okolo pístu je několik cívek, které jsou v prostředí MR kapaliny. Pokud do cívek přivedeme elektrický proud, začne kolem nich vznikat magnetické pole a u kapaliny dojde ke zvýšení viskozity [28]. Vynikají také nízkou spotřebou energie a konstrukční jednoduchostí [27].



Obrázek 19: Schéma 20tunového MR tlumiče [29].

2.8.1 Seismická ochrana staveb

Tato aplikace poskytuje ochranu civilních staveb před zemětřesením nebo silným větrem. Jedná se o systém, který umožňuje dynamicky měnit odezvu konstrukce [27]. Obvykle se tyto ochranné řídicí systémy dělí do tří tříd: pasivní systém, aktivní systém a semi-aktivní systém. V závislosti na velikosti stavby se konstrukce seismické ochrany skládají z jednoho nebo až stovek tlumičů [30].

MR tlumiče jsou založené na principu změny hustoty MR kapaliny prostřednictvím rychlých změn magnetického pole. Během zemětřesení dochází až k desítkám změn hustoty za sekundu, což vede k zahřátí a tepelné roztažnosti kapaliny. Proto je součástí tlumičů akumulční nádrž [28].

2.8.2 Biomechatronika

Biomechatronika je interdisciplinární věda zaměřující se na sjednocení elektromechanických součástí s lidským tělem. Tento obor zahrnuje znalosti biologie, elektroniky, mechaniky, neurovědy a robotiky. Vytvořené zařízení interaguje s lidskými kostmi, svaly nebo nervovým systémem a je určeno jak pro terapeutické účely, tak pro vylepšení stávajících schopností. Všechny takové systémy musí obsahovat tyto komponenty: biosenzory, kontrolery, mechanické snímače a pohon. V praxi se setkáváme s ortézou využívající MR brzdu nebo kolenní protézou. Tato umělá kolena zvládají v reálném čase reagovat a přizpůsobovat se vnějším podmínkám a tím dokážou napodobit co nejpřirozeněji chůzi [2, 31].

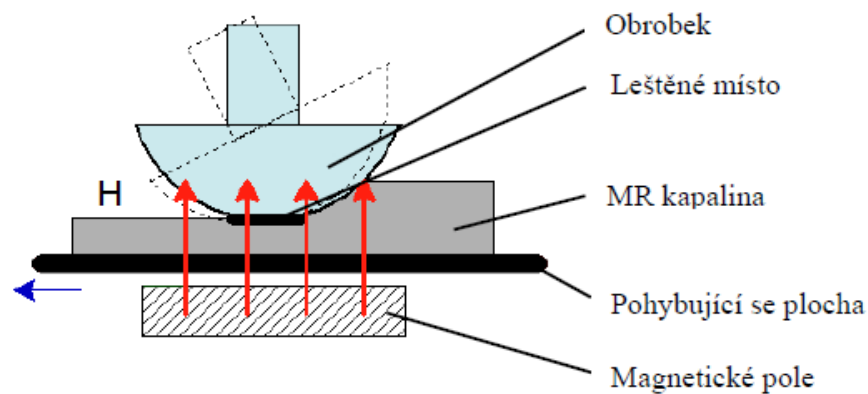
2.8.3 Automobilový průmysl

Nejrozšířenější technickou aplikací MR kapalin v automobilovém průmyslu je nahrazení klasických pružinových tlumičů u zavěšení kol magnetoreologickými tlumiči. Na stejném principu pracuje také tlumení sedadel, které zvyšuje celkový komfort. V současnosti se uplatňují i vibrace pohlcující držáky, které se používají k ukotvení motorů u některých aut [1, 19].

2.8.4 Povrchová úprava

Další využití MR kapalin nacházíme u magnetoreologického leštícího zařízení. Jedná se o magneticky asistovanou leštící metodu, která slouží ke konečné úpravě povrchů. Výsledkem této techniky je hladký povrch bez mikrodrsnot. Tato speciální povrchová úprava může být použita na nemagnetické materiály, jako jsou například sklo, keramika nebo plasty [32].

Princip leštícího zařízení popisuje *Obrázek 20*. Speciálně připravená MR kapalina, která obsahuje navíc důležitou složku - abrazivum, se nanese mezi pohyblivou plochu a obrobek. Mikročástice této suspenze tvoří magnetické karbonylové železo, nosnou kapalinou je voda a jako abrazivum se používá oxid ceričitý. Pokud se deska pohybuje pak v místě styku upravovaného materiálu s MR kapalinou dochází k jeho obrušování [32].



Obrázek 20: Magnetoreologické leštící zařízení [32].

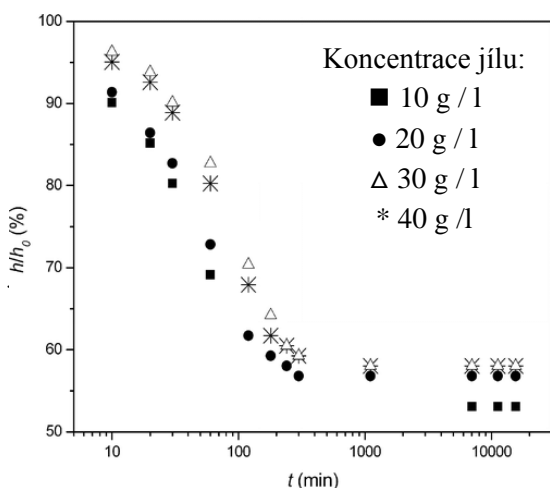
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Modesto T. López-López a kol. se ve své publikaci [10] zabývali přípravou a charakterizací MR kapaliny stabilizovanou organojílem jako aditivem. V tomto pokusu byla MR kapalina tvořena železnými částicemi (10 obj. %) v petroleji jako nosné kapalině.

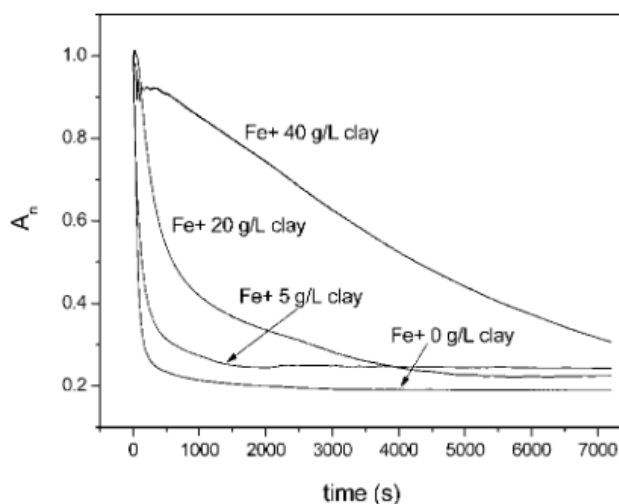
Disperze byla připravena nalitím vhodného množství kerosinu a jílů (v tomto pořadí) do polyetylenové nádoby. Tato směs se míchala po dobu 5 minut za pomoci mechanického míchadla. Mícháním se vytvořila homogenní disperze jílových částic. Nakonec bylo přidáno vhodné množství práškového železa a celá směs se znovu míchala 5 minut.

Bylo sledováno sedimentační chování koncentrovaných suspenzí (suspenze obsahující 10 obj. % železa a různé množství jílu) a zředěných suspenzí (ředění 1:500 ve srovnání s koncentrovanými suspenzemi za použití petroleje). U koncentrovaných MR kapalin se sledoval časový vývoj sedimentace v odměrném válci. U zředěných suspenzí bylo sedimentační chování sledováno pomocí spektrofotometru (Milton Roy spectrophotometer model Spectronic 601, při vlnové délce $\lambda = 590$ nm).

U koncentrovaných suspenzí rychlost sedimentace nejprve prudce roste s časem a pak dosáhne takzvaného pseudoplateau bez ohledu na koncentraci jílu. To ukazuje, že částice se usadí již po 1000 minutách (viz Obrázek 21). Vzhledem k tomu, že se železné částice jak samotné, tak v přítomnosti jílu usazují, je třeba konstatovat, že jíl tvořící gel v nosné kapalině není dostatečně silný, aby zcela zabránil usazování částic. Pokud jde o účinek koncentrace jílu na sedimentační chování, je z Obrázku 22 zřejmé, že rychlost usazování se snižuje se zvyšující se koncentrací jílu.



Obrázek 21: Relativní výška (h/h_0) rozhraní sediment-supernatant v závislosti na čase [10].



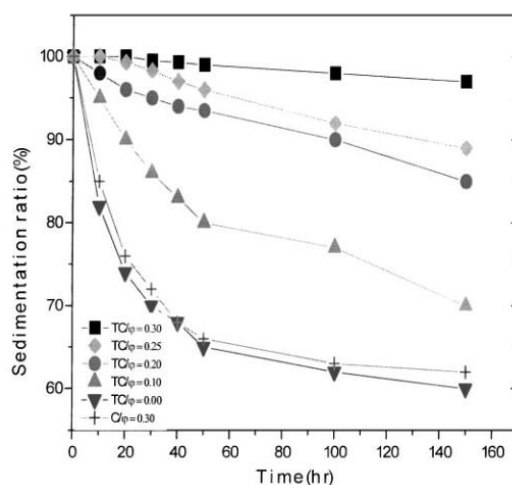
Obrázek 22: Absorbance $A_n (=A/A_0)$ v závislosti na čase [10].

J. H. Park a kol. zkoumali stabilitu a reologické vlastnosti magnetoreologických kapalin v emulzi typu voda v oleji jako nosné kapalině [33]. MR kapalina zároveň obsahuje hydrofilně ošetřené karbonylové železné částice.

Jako kontinuální fáze byla použita již zmíněná emulze V/O (minerální olej). Nejprve byl smíchán na magnetické míchačce minerální olej se Spanem 80 (Aldrich Chemical) jako

aditivem a následně byla k této směsi pomalu přikapávána voda. Vše se nechalo míchat 24 hodin při 800 otáčkách za minutu. Železné částice byly chemisorbovány v Tweenu 80 při 60 °C po dobu jedné hodiny. Poté byly několikrát zfiltrvány a promyty, aby se odstranil přebytek Tweenu 80. Takto upravené částice byly dále rozemlety kulovým mlýnem (Spex 8000) a rozděleny podle hmotnostních frakcí.

Stabilita MR kapaliny byla opět vyhodnocena vizuálním pozorováním. Suspenze byla v uzavřených zkumavkách pozorována po dobu 150 hodin. Modifikované karbonylové železo dispergované v emulzi V/O vykazovalo větší stabilitu v porovnání s neupravenými železnými částicemi (viz *Obrázek 23*). Také platí, že čím je poměr vody v kontinuální fázi vyšší ($\varphi=0,3$), tím lepší je stabilizační účinek. Avšak pokud suspenze obsahovala vyšší množství vody ($\varphi=0,3$), zvyšovala se také její viskozita v nulovém magnetickém poli.



Obrázek 23: Sedimentační poměr v závislosti na čase. TC – chemisorbované částice; C – neupravené částice; φ – objem vody v emulzi [33].

kde je sedimentační poměr definován jako:
$$\delta = 1 - \frac{V_{emulze}}{V_{celé\ suspenze}} \quad (5)$$

Turczyn a kol. se ve své práci [34] snažili vytvořit modelové MR kapaliny, u kterých byly použity následující nosné kapaliny: silikonový olej značky OKS s číslem 1050, syntetický olej OKS 352 a minerální olej OKS 600. MR kapalinu dále tvořili částice z karbonylového železa (carbonyl iron = CI) HQ (0,5-2,2 μm) a pro snížení sedimentace byly jako stabilizátory použity Aerosil 200 a 972, Arsil 1100 a arabská guma.

V každé nosné kapalině bylo dispergováno různé množství částic. Suspenze pak byly následně mechanicky míchány 6 hodin. Do MR kapaliny se silikonovým a minerálním olejem byl přidán Aerosil 200 a 972 a Arsil 1100 a do suspenze se syntetickým olejem byla přidána arabská guma. Přehled připravených MR kapalin je uveden v *Tabulce 5*.

Tabulka 5: Složení zkoumaných MR kapalin [34].

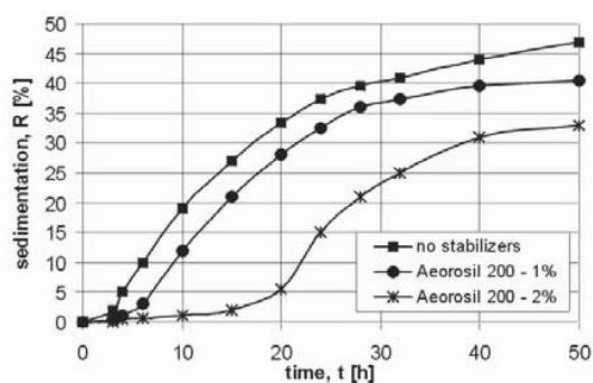
Nosná kapalina	CI částice [hm. %]	Aditiva	
		Typ	Množství [hm. % z CI]
OKS 1050 50 mPa·s	20	Aerosil 200	1
	40		1
OKS 1050 150 mPa·s	20	Aerosil 200	1
	40		1
OKS 1050 235 mPa·s	20	Aerosil 200	1
	40		1
OKS 1050 500 mPa·s	20	Aerosil 200	1
			2
	40	Aerosil 200	1
			2
OKS 352 510 mPa·s	20	Arabská guma	1
	40		1
OKS 600 7,3 mPa·s	20	Aerosil 200	1
	40		1
OKS 600 7,3 mPa·s	20	Aerosil 200	1
		Aerosil 972	1
		Arsil 1100	1

Během sedimentace byly zaznamenávány výšky nosné kapaliny a výšky celé MR kapaliny po dobu několika dnů. Na základě pozorování byl vypočten sedimentační poměr R .

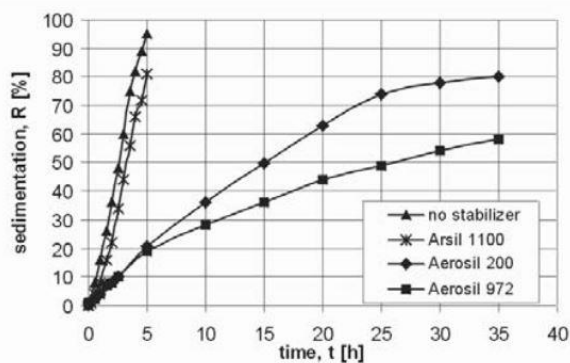
$$R = \frac{a}{b} \cdot 100\% \quad (6)$$

kde R [%] je sedimentační rychlost, a – výška nosné kapaliny, b – výška celé MR kapaliny.

Bylo dokázáno, že s vyšším obsahem stabilizátoru (viz *Obrázek 24*) bude výsledná MR kapalina stabilnější. Dále bylo potvrzeno, že čím více částic kapalina obsahuje, tím je stabilnější (pokud MR kapalina neobsahuje žádná aditiva, je tento trend opačný). Jak je vidět na *Obrázku 25* v přítomnosti Arsil 1100 nedošlo ke zlepšení sedimentace a MR kapalina se chovala stejně jako bez stabilizátoru. Naopak nejlepší výsledky můžeme pozorovat u minerálního oleje OKS 600 obsahujícího 20 hm. % CI a Aerosil 972.



Obrázek 24: R v závislosti na čase. Vzorek OKS 1050, 500 mPa·s, CI 40 hm. % [34].

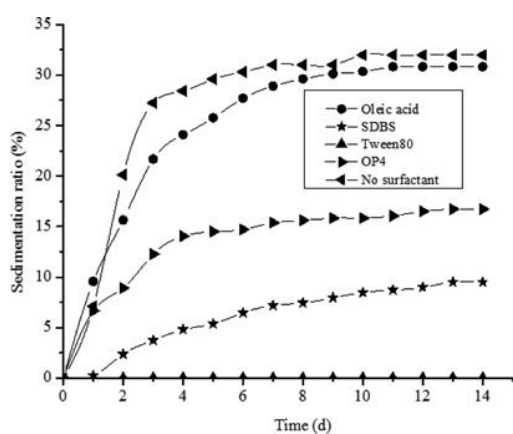


Obrázek 25: R v závislosti na čase. Vzorek OKS 600, 7,3 mPa·s, CI 20 hm. % [34].

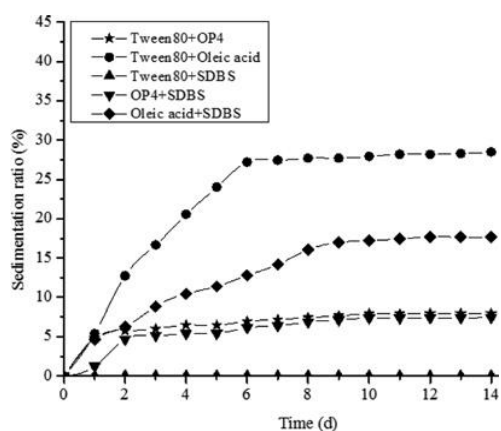
Chen Fei a kolektiv se věnovali novému způsobu přípravy sedimentačně stabilní magnetoreologické kapaliny [35]. Částice z karbonylového železa byly dispergovány v nosné kapalině ze silikonového oleje a jako povrchově aktivní látky byly použity: kyselina olejová, dodecylbenzensulfonát sodný SDBS, emulgátor OP4 a Tween 80, která byla mezi sebou různě kombinována.

MR kapalina byla připravena následujícím způsobem. Nejprve byly připraveny různé roztoky aditiv v absolutním alkoholu, do kterých bylo přidáno vhodné množství částic (průměr částic 2,5 μm). Poté se vzorek míchal v rotační míchačce při 300 ot/min a 25 °C po dobu 4 hodin. Následně se vzorek na 1 hodinu (70 °C) umístil do vakuového exsikátoru, kde došlo k odpaření absolutního alkoholu. Vzorek byl dále rozemlet na prášek, ke kterému byl přidán silikonový olej. Vše se opět míchalo na rotačním míchadle při stejných podmínkách po dobu 2 hodin. Výsledné suspenze obsahovaly 2,0 g povrchově aktivní látky (1,52 hm. %), 100 g částic (75,76 hm. %) a 30 g silikonového oleje (22,72 hm. %). Pro srovnání byla připravena MR kapalina bez povrchově aktivních látek.

Sedimentační testy byly provedeny ve zkumavkách po dobu 14 dnů. Stejně jako v předchozí studii byl definován sedimentační poměr R . Z Obrázku 26 vyplývá, že aditiva mají pozitivní vliv na sedimentační stabilitu MR kapalin. Jako nejúčinnější vyšla kyselina olejová dále pak emulgátor OP4, SDBS a nakonec Tween 80. Byly zkoumány i různé kombinace aditiv (viz Obrázek 27) v MR kapalině, kde vyšla dvojice kyseliny olejové a SDBS jako nejvhodnější a to v poměru 1:1 (4g:4g; 5,4 hm. %).



Obrázek 26: Vliv aditiv na sedimentační stabilitu MR kapalin [35].



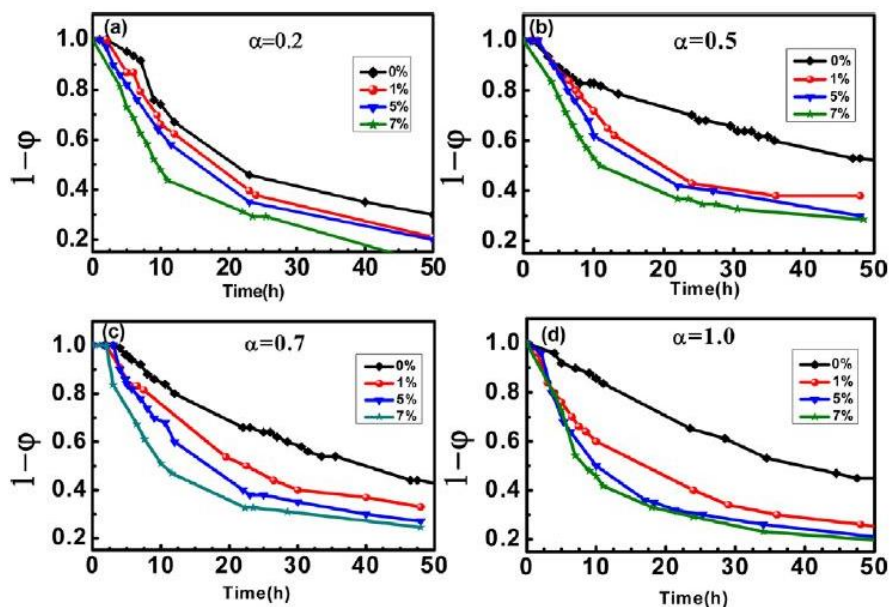
Obrázek 27: Vliv kombinace aditiv na sedimentační stabilitu MR kapalin [35].

Yuehua Huang a kol. ve svém článku popisují vliv kyseliny olejové a kyseliny laurové na stabilitu MR kapaliny [36]. Studovaná kapalina je tvořena železnými částicemi (průměr 6-8 μm) dispergovány v silikonovém oleji.

Aparatura pro výrobu MR kapaliny se skládala z elektrického míchadla, elektrického ohříváče a trojhrdlé baňky. Nejprve se v baňce smísila kyselina olejová, železné částice a bezvodý ethanol jako rozpouštědlo. Směs byla intenzivně míchána při teplotě 40 °C. Po několika hodinách se ethanol odpařil a byly získány železné částice s hydrofobními povrchy. Takto upravené částice (vždy 50 hm. %) byly smíchány se silikonovým olejem a kyselinou laurovou. Vzorky suspenzí

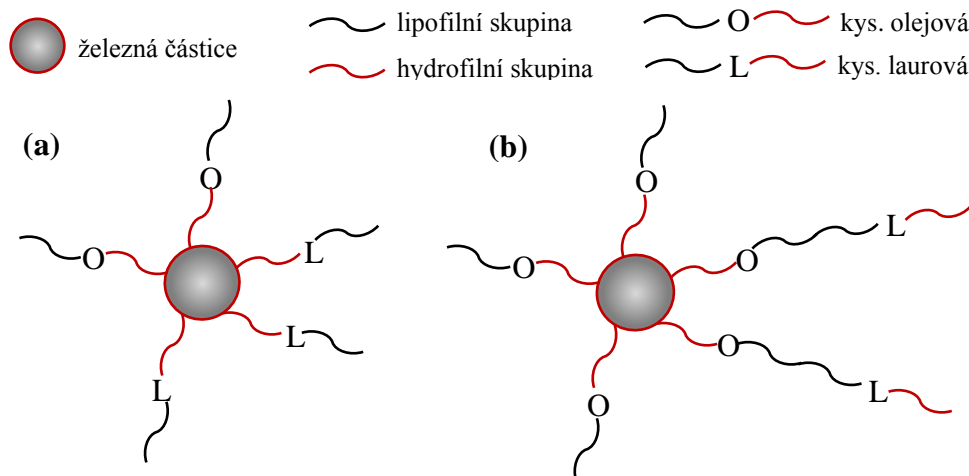
byly umístěny do zkumavek o průměru 15 mm, v nichž byla vizuálně vyhodnocena sedimentační stabilita. Sedimentační poměr φ byl určen stejně jako v článku J. H. Park [33].

Z Obrázku 28 je zřejmé, že pokud se zvyšuje přítomnosti kyseliny laurové, snižuje se hodnota $1 - \varphi$. I přesto, že je kyselina laurová povrchově aktivní látka, nedokáže dostatečně stabilizovat MR kapalinu.



Obrázek 28: Závislost $1 - \varphi$ na čase, kde α je hmotnostní poměr kyseliny olejové a karbonylového železa a procenty je vyjádřen hmotnostní podíl kyseliny laurové [36].

K tomuto defektu mohlo dojít díky molekulovým strukturám použitých kyselin a technologii přípravy. Jak je znázorněno na Obrázku 29, molekuly použitých kyselin mají podobnou strukturu a obsahují jak hydrofilní, tak lipofilní skupinu. Pokud bylo kyseliny olejové během přípravy dostatek, celý povrch molekuly železa byl pokryt jejími hydrofilními skupinami. Kyselina laurová se tedy dále mohla vázat pouze ke kyselině olejové, a proto měl konečný povrch částic hydrofilní charakter, který se neslučuje se silikonovým olejem. Proto byl doporučen hmotnostní poměr kyseliny olejové a železných částic menší než 0,2.



Obrázek 29: Schéma částic karbonylového železa s hmotnostním poměrem kys. olejové (a) menším než 0,2 a (b) větším než 0,2 [36].

V publikaci od Ch. Fanga a kol. [37] byly zkoumány vlastnosti MR kapaliny s přidavkem guarové gummy jako surfaktantem. Tato látka byla vybrána hlavně z důvodu její šetrnosti k životnímu prostředí. Dále byly použity částice z karbonylového železa o velikosti 3-5 μm a silonový olej jako nosná kapalina.

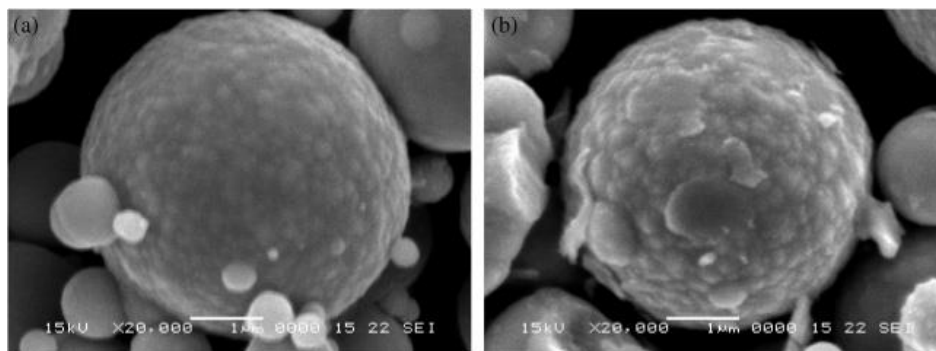
V předem stanovených poměrech byla prášková guarová guma mleta společně se silikonovým olejem a částicemi v kádince po dobu 2 hodin. Byl připraven vzorek A, který se skládal z 20 hm. % silikonového oleje a z 80 hm. % částic z karbonylového železa. Vzorek B obsahoval 1,6 hm. % guarové gummy, 20 hm. % silikonového oleje a 78,4 hm. % práškového karbonylového železa. Připravené MR kapaliny byly nality do odměrných válců a stejným způsobem jako ve článku Turczyn a kolektiv [34] byla sledována sedimentační stabilita a byl určen sedimentační poměr.

Výsledky, které můžeme vidět v *Tabulce 6*, dokazují, že přítomnost guarové gummy má pozitivní vliv na sedimentační stabilitu bez snížení MR účinku. U vzorku B byl konečný sedimentační poměr snížen z 22 % na 10 %, zatímco mez kluzu byla jak u vzorku A, tak u vzorku B velmi podobná. Přidaná guarová guma zvyšuje viskozitu, ale ve srovnání s MRF-336AG (komerční MR kapalina od společnosti Lord Corporation) je viskozita vzorku B stále nižší. Jediným rozdílem mezi vzorkem B a MRF-336AG je mnohem vyšší počáteční rychlost usazování.

Tabulka 6: Porovnání vzorků A, B a komerčního produktu od společnosti Lord Corporation [37].

Porovnávaná funkce	Vzorek A	Vzorek B	MRF-336 AG
Obj. % částic	36,6	36,4	36
Nosná kapalina	Silikonový olej	Silikonový olej	Silikonový olej
Hustota [g/cm^3]	3,41	3,43	3,47
MR efekt [kPa] při 600 mT	34,4	37,7	40
Viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]; 50 s^{-1} a 25 $^\circ\text{C}$	1,61	2,70	7
Viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]; 1000 s^{-1} a 25 $^\circ\text{C}$	0,25	0,43	0,65
Počáteční sedim. rychlost [%/den]	8	3,6	nezjistitelné
Sedim. rychlost po 6 měsících [%]	22	10	12-20

Na základě *Obrázku 30* bylo dokázáno, že se guarová guma váže na povrch částic. K tomuto procesu mohlo dojít během mletí všech surovin. Guarová guma byla rozemleta na menší kusy a tím se dokázala navázat a obalit tak povrch částic. Povlaková struktura pomáhá částicím vytvářet trojrozměrnou strukturu se silikonovým olejem a zabraňuje tak rychlejšímu usazování částic.



Obrázek 30: SEM snímek povrchu (a) prášku karbonylového železa a (b) prášku karbonylového železa v přítomnosti guarové gummy [37].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Použité chemikálie

- **Minerální olej** Sigma Aldrich, CAS 8042-47-5
- **Dodecylsírán sodný** Sigma Aldrich, CAS 151-21-3
- **Kyselina palmitová** Sigma Aldrich, CAS 57-10-3
- **Kyselina olejová** Sigma Aldrich, CAS 112-80-1
- **Span 20** Sigma Aldrich, CAS 1338-39-2
- **Span 80** Sigma Aldrich, CAS 1338-43-8
- **Span 85** Sigma Aldrich, CAS 26266-58-0
- **Triton X-114** Sigma Aldrich, CAS 9036-19-5
- **Tween 20** Sigma Aldrich, CAS 9005-64-5
- **Tween 80** Sigma Aldrich, CAS 9005-65-6

4.2 Použité částice

Pro všechny experimenty byly použity částice z téměř čistého železa (Sigma Aldrich, $\rho \approx 7860 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Byly vybrány částice o následujících průměrech: 2 μm , 5-9 μm a 44 μm . Částice o velikosti 44 μm byly využity hlavně u prvních pokusů, kde byla vyžadována rychlejší sedimentace.

4.3 Výběr vhodné nosné kapaliny

Jako vhodná nosná kapalina pro naše experimenty byl vybrán minerální olej ($\rho = 840 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Viskozita tohoto průhledného a bezbarvého oleje je podobná olejům, které najdeme jako nosnou kapalinu u MR kapalin v reálném využití a je snadno dostupný.

4.4 Použité přístroje

- Analytické váhy S-603, Denver Instrument
- Disperzní analyzátor LUMiSizer, LUM GmbH, Německo
- Magnetická míchačka Cimarec i Poly 15, Thermo Scientific
- Magnetická míchačka s teploměrem, Heidolph Instruments, Německo
- Odstředivka laboratorní Rotina 46 R, Hettich, Německo
- Reometr AR-G2, TA Instruments, Velká Británie
- Rotátor vertikální PTR-25, Grant-bio, Velká Británie
- Další běžné laboratorní vybavení

4.5 Příprava vzorků pro stanovení rozpustnosti aditiv v minerálním oleji

Pro ověření použitelnosti vybraných aditiv v olejovém disperzním prostředí byly namíchány základní nosné kapaliny, které obsahovaly 3 obj. % přidaného aditiva. Pro vytvoření homogenního roztoku byl vždy minerální olej společně s příslušným aditivem míchán pět minut na magnetické míchačce. Jen vzorek č. 3 (viz *Tabulka 7*) se lišil přípravou. Jelikož je SDS za normálních podmínek v pevném stavu byl nejprve rozpuštěn v 1 ml destilované vody a následně byl k tomuto roztoku přidán minerální olej.

Tabulka 7: Složení roztoků pro určení rozpustnosti aditiv v minerálním oleji.

Číslo	Minerální olej [ml]	Aditiva (3 obj. %)	
		Typ	Množství
1	9,70	Tween 20	0,30 ml
2	9,70	Triton X-114	0,30 ml
3	9,70	SDS – rozpuštěný ve vodě	0,334 g + 1 ml destilované vody
4	9,70	SDS – přímo do oleje	0,300 g
5	4,85	Span 20	0,15 ml
6	4,85	Span 80	0,15 ml
7	4,85	Span 85	0,15 ml
8	4,85	Kyselina olejová	0,15 ml
9	4,85	Kyselina palmitová	0,129 g

4.6 Příprava MR kapalin s minerálním olejem jako nosnou kapalinou

Na základě výsledků z předchozího experimentu byly připraveny MR kapaliny, které obsahovaly 10 ml vybrané nosné kapaliny s příslušným aditivem a železné částice o průměru 44 μm (viz Tabulka 8). Navážené částice byly přidány do nosné kapaliny a následně byla celá suspenze intenzivně několik minut míchána skleněnou tyčinkou. Pro porovnání byl připraven i vzorek č. 0, který neobsahoval žádnou povrchově aktivní látku. Následně byla u připravených suspenzí po dobu několika hodin sledována jejich stabilita.

Tabulka 8: Složení MR kapalin s minerálním olejem jako nosnou kapalinou.

Číslo	Minerální olej [ml]	Aditiva (2,9 obj. %)		Částice 44 μm (3,7 obj. %)
		Typ	Množství	
0	10,0	-	-	3 g
1+	9,7	Tween 20	0,3 ml	3 g
2+	9,7	Triton X-114	0,3 ml	3 g

4.6.1 Koncentrační řada Tweenu 20

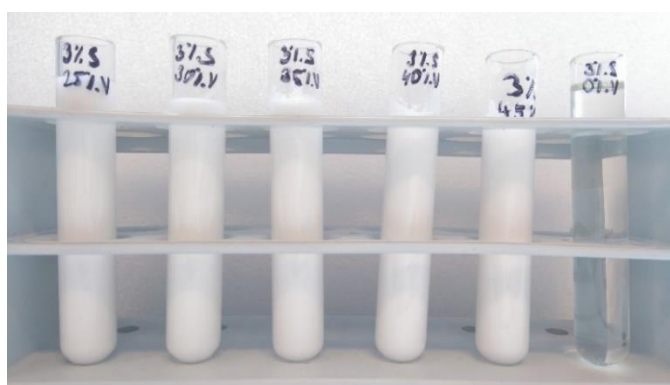
Abychom zjistili, jaké množství aditiva je pro MR kapalinu nejpřínosnější, byly připraveny vzorky s různými koncentracemi Tweenu 20. Tween byl vybrán na základě předchozích výsledků jako nejvhodnější aditivum. Do čtyř zkumavek byla napipetována nosná kapalina skládající se z minerálního oleje a různých koncentrací Tweenu 20. Přesné složení jednotlivých roztoků znázorňuje Tabulka 9. Nejprve byl smíchán minerální olej s aditivem a následně byly přidány částice o velikosti 44 μm , které v každé MR kapalině tvořily 3 obj. %. Poté bylo vše zamícháno tyčinkou a v desetiminutových intervalech po dobu hodiny a půl byla sledována sedimentační stabilita.

Tabulka 9: Složení MR kapalin s různými koncentracemi Tweenu 20.

Označení	Minerální olej [ml]	Aditiva (Tween 20)		Částice 44 μm [g]
		Množství [ml]	Objemový podíl [obj. %]	
1%	4,80	0,05	1	1,173
3%	4,70	0,15	3	1,172
5%	4,60	0,25	5	1,173
10%	4,35	0,5	10	1,169

4.7 Příprava emulzí typu V/O pro zjištění jejich stability

Byly připraveny různě koncentrované emulze typu voda v oleji, které byly dále využity jako nosné kapaliny pro MR suspenzi. Nejprve bylo naváženo do kádinky předem vypočítané množství minerálního oleje a Spanu 80, který zde byl použit jako emulgátor. Tato směs byla míchána několik minut na magnetické míchače při 800 otáčkách za minutu. Po úplném rozpuštění aditiva se do vytvořeného roztoku pomalu přikapávalo určené množství destilované vody a takto připravená emulze byla dále míchána při stejných otáčkách po dobu 24 hodin. Pro srovnání byly připraveny i vzorky, které neobsahovaly žádnou vodu. Všechny takto připravené vzorky byly následně napipetovány po 10 ml do zkumavek (viz *Obrázek 31*) a v následujících několika týdnech u nich byla pozorována stabilita.



Obrázek 31: Ukázka připravených vzorků emulzí pro sledování jejich stability.

V *Tabulce 10* a *Tabulce 11* můžeme vidět přesné složení 24 připravených emulzí. Šest vzorků vždy obsahovalo stejnou koncentraci Spanu 80 a postupně se zvyšující množství vody.

Tabulka 10: Složení emulzí s obsahem 3 a 4 hm. % Spanu 80.

Vzorek	Emulze	Množství		Vzorek	Emulze	Množství	
		[g]	[hm. %]			[g]	[hm. %]
3% S 25% V	Span 80	0,500	3	4% S 25% V	Span 80	0,646	4
	Voda	4,000	25		Voda	4,000	25
	Min. olej	11,522	72		Min. olej	11,369	71
3% S 30% V	Span 80	0,300	3	4% S 30% V	Span 80	0,640	4
	Voda	2,700	30		Voda	4,800	30
	Min. olej	6,025	67		Min. olej	10,569	66
3% S 35% V	Span 80	0,500	3	4% S 35% V	Span 80	0,662	4
	Voda	5,600	35		Voda	5,780	35
	Min. olej	9,926	62		Min. olej	10,070	61
3% S 40% V	Span 80	0,306	3	4% S 40% V	Span 80	0,710	4
	Voda	3,800	40		Voda	6,800	40
	Min. olej	5,418	57		Min. olej	9,523	56
3% S 45% V	Span 80	0,516	3	4% S 45% V	Span 80	0,676	4
	Voda	7,650	45		Voda	7,650	45
	Min. olej	8,848	52		Min. olej	8,679	51
3% S 0% V	Span 80	0,290	3	4% S 0% V	Span 80	0,380	4
	Min. olej	8,739	97		Min. olej	8,647	96

Tabulka 11: Složení emulzí s obsahem 5 a 10 hm. % Spanu 80.

Vzorek	Emulze	Množství		Vzorek	Emulze	Množství	
		[g]	[hm. %]			[g]	[hm. %]
5% S 25% V	Span 80	0,799	5	10% S 25% V	Span 80	1,660	10
	Voda	4,000	25		Voda	4,130	25
	Min. olej	11,208	70		Min. olej	10,731	65
5% S 30% V	Span 80	0,830	5	10% S 30% V	Span 80	1,647	10
	Voda	4,950	30		Voda	4,950	30
	Min. olej	10,730	65		Min. olej	9,903	60
5% S 35% V	Span 80	0,825	5	10% S 35% V	Span 80	1,690	10
	Voda	5,780	35		Voda	5,780	35
	Min. olej	9,928	60		Min. olej	9,072	55
5% S 40% V	Span 80	0,822	5	10% S 40% V	Span 80	1,663	10
	Voda	6,600	40		Voda	6,600	40
	Min. olej	9,081	45		Min. olej	8,262	50
5% S 45% V	Span 80	0,835	5	10% S 45% V	Span 80	1,702	10
	Voda	7,430	45		Voda	7,650	45
	Min. olej	8,250	40		Min. olej	7,648	45
5% S 0% V	Span 80	0,778	5	10% S 0% V	Span 80	1,556	10
	Min. olej	14,729	95		Min. olej	13,956	90

4.8 Příprava MR kapalin s emulzí typu V/O jako nosnou kapalinou

4.8.1 Příprava emulzí

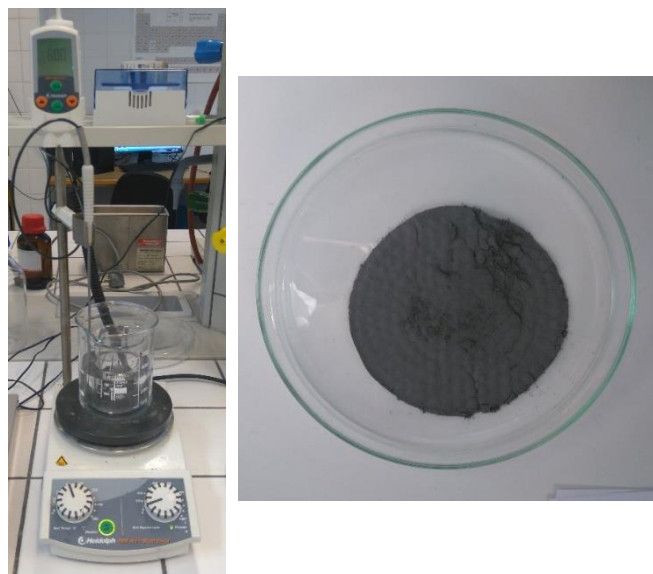
Emulze byly připraveny stejným způsobem jako v předchozím postupu pro zjištění jejich stability. Opět zde byl použit minerální olej, Span 80 a destilovaná voda. Přesné složení jednotlivých vzorků můžeme vidět v *Tabulce 12*. Pro porovnání sedimentační stability MR kapalin byla připravena i nosná kapalina tvořena pouze z minerálního oleje a Spanu 80 (vzorek 7 + 8).

Tabulka 12: Složení nosných kapalin pro přípravu MR kapalin.

Vzorek	Emulze	Množství		Vzorek	Emulze	Množství	
		[g]	[hm. %]			[g]	[hm. %]
1	Span 80	0,180	5	2	Span 80	0,350	10
	Voda	1,400	40		Voda	1,400	40
	Min. olej	1,942	55		Min. olej	1,754	50
3 + 4	Span 80	0,556	5	5 + 6	Span 80	0,607	5
	Voda	4,400	40		Voda	4,800	40
	Min. olej	6,059	55		Min. olej	6,606	55
7 + 8	Span 80	0,522	3				
	Voda	0	0				
	Min. olej	16,99	97				

4.8.2 Chemisorpce částic

Potřebné množství železných částic o velikosti 5-9 μm byly v poměru 1:1 s Tweenem 80 zahřívány ve vodní lázni při 60 °C po dobu 60 minut (viz *Obrázek 32*). Následně byla celá suspenze nadávkována do plastových zkumavek, ve kterých byla směs odstředěna v odstředivce při 25 °C a 4 000 otáčkách za minutu po dobu 15 minut. Přebytečný odstředěný Tween 80 byl pomocí kapátka odebrán a zbytek usazených částic byl několikrát promyt destilovanou vodou a následně odfiltrován přes Büchnerovu nálevku. Následně byly částice i s filtračním papírem vloženy do sušárny na 24 hodin při 50 °C.



Obrázek 32: Vlevo chemisorpce částic Tweenem 80 ve vodní lázni, vpravo hotové částice.

4.9 Příprava MR kapaliny pro měření sedimentační stability

U všech předchozích pokusů byla sedimentační stabilita připravených MR kapaliny vyhodnocována pouze pozorováním. Pro sedimentační měření, které je založeno na sledování změn hustot magnetického toku byla připravena MR kapalina o vybraném složení. Tato metoda využívá magnetického obvodu se vzduchovou mezerou, ve kterém se nachází zkoumaný vzorek [38]. Měření probíhalo na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně (dále jen FSI). Nejvhodnější MR kapalina pro stanovení sedimentační stability byla zvolena na základě předchozích experimentů. Jako nosná kapalina byla vybrána emulze, která vykazovala dostatečnou stabilitu a zároveň co nejnižší viskozitu. Z důvodu velké spotřeby částic obsahovala výsledná suspenze částice o dvou různých průměrech a to 5-9 μm a 44 μm a jednalo se tedy o bidisperzní kapalinu. Emulze i částice byly připraveny stejným způsobem jako v předchozích případech. Přesné složení můžeme vidět v *Tabulce 13*.

Tabulka 13: Složení MR kapaliny pro měření stability na FSI.

Emulze	Span 80	3,180 g	5 hm. %
	Voda	25,460 g	40 hm. %
	Minerální olej	35,000 g	55 hm. %
Částice	5-9 μm	43,260 g	78,3 hm. %
	44 μm	180,000 g	

4.10 Příprava MR kapalin pro měření na analytické odstředivce

Další stabilizační měření vybraných vzorků bylo měřeno na přístroji LUMiSizer. Jako nosné kapaliny byly opět použity emulze typu V/O, které byly připraveny za stejných podmínek jako v předchozích případech. V *Tabulce 14* lze vidět přesné složení těchto emulzí a *Tabulka 15* ukazuje celkové složení měřeným MR kapalin.

Tabulka 14: Složení emulzí pro měření na LUMiSizeru.

Vzorek	Emulze	Množství		Vzorek	Emulze	Množství	
		[g]	[hm. %]			[g]	[hm. %]
5	Span 80	0,203	4	5_1	Span 80	0,220	4
	Voda	2,000	40		Voda	2,000	40
	Min. olej	2,800	56		Min. olej	2,801	56
6	Span 80	0,507	10	6_1	Span 80	0,514	10
	Voda	2,250	45		Voda	2,250	45
	Min. olej	2,250	45		Min. olej	2,250	45
7	Span 80	0,504	10	7_1	Span 80	0,493	10
	Voda	2,000	40		Voda	2,000	40
	Min. olej	2,511	50		Min. olej	2,509	50
8	Span 80	0,250	5	8_1	Span 80	0,259	5
	Voda	2,000	40		Voda	2,000	40
	Min. olej	2,752	55		Min. olej	2,751	55

Vzorky 5-8 obsahují chemisorbované částice Tweenem 80 o velikosti 5-9 μm , kdežto vzorky 5_1-8_1 obsahují neupravené železné částice o stejném průměru.

Tabulka 15: Složení MR kapalin pro měření na LUMiSizeru.

Vzorek	Emulze (30 hm. %)	Částice (70 hm. %)	Vzorek	Emulze (30 hm. %)	Částice (70 hm. %)
5	1,024 g	2,333 g	5_1	1,495 g	3,496 g
6	1,039 g	2,336 g	6_1	1,506 g	3,502 g
7	1,522 g	3,494 g	7_1	1,497 g	3,502 g
8	1,515 g	3,492 g	8_1	1,505 g	3,499 g

Řádně promíchané vzorky byly stříkačkou nadávkovány do polyakrylátových kyvet s optickou dráhou 2 mm. Každý vzorek byl nadávkován do dvou kyvet, kde byl dále označen vždy písmeny A a B. Kyvety byly následně vloženy do LUMiSizeru ve kterém byla všechna měření prováděna při stejných podmínkách a to pro 25 °C po dobu 17 hodin. Pro první měření byly připraveny ještě vzorky číslo 1-4, které byly totožné se vzorky číslo 5-8. Tyto suspenze byly měřeny od 200 do 4 000 otáček za minutu a na základě zjištěných výsledků byl test opakován pro ostatní vzorky při 200 otáčkách za minutu.

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

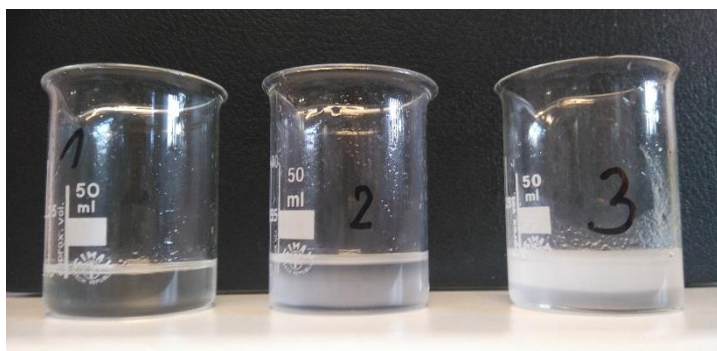
5.1 Sledování rozpustnosti aditiv v minerálním oleji

U vybraných aditiv byla sledována jejich rozpustnost v minerálním oleji, čímž se ověřovala jejich použitelnost v olejovém disperzním prostředí. V předem určeném poměru byl minerální olej s přidaným aditivem (3 obj. %) míchán v kádince na magnetické míchačce 10 minut při 250 otáčkách za minutu. Pokud během míchání nedošlo k vytvoření homogenního roztoku, tvořili se oddělené fáze, bylo přidané aditivum vyhodnoceno jako nevhodné pro další použití. V *Tabulce 16* můžeme vidět výsledky rozpustnosti testovaných aditiv.

Tabulka 16: Výsledky rozpustnosti aditiv v minerálním oleji.

Číslo	Nosná kapalina	Aditiva (3 obj. %)	Skupenství	Výsledek
1	Minerální olej	Tween 20	Kapalné	Rozpustný
2		Triton X-114	Kapalné	Nerozpustný
3		SDS – rozpuštěný ve vodě	Pevné → Kapalné	Nerozpustný
4		SDS – přímo do oleje	Pevné	Nerozpustný
5		Span 20	Kapalné	Rozpustný
6		Span 80	Kapalné	Rozpustný
7		Span 85	Kapalné	Rozpustný
8		Kyselina olejová	Kapalné	Rozpustná
9		Kyselina palmitová	Kapalné	Nerozpustná

Tween 20 byl vyhodnocen jako rozpustný v minerálním oleji i přes jeho vysokou hodnotu HLB. V přítomnosti Tritonu X-114 u vzorku č. 2 bylo téměř okamžitě po odebrání z magnetické míchačky pozorováno rozdělení roztoku na dvě fáze. SDS bylo ve své práškové formě nejprve rozpuštěno ve vodě a následně přidáno do minerálního oleje. Po několika minutách stání se však roztok rozdělil na dvě neslučitelné fáze (viz *Obrázek 33*). U dalšího vzorku bylo SDS přímo přidáno do minerálního oleje. Okamžitě po umístění na magnetickou míchačku suspenze výrazně zvýšila svou viskozitu a ani po 10 minutách SDS nevykazovalo žádnou rozpustnost (viz *Obrázek 34*). Dále byla v minerálním oleji rozpuštěna aditiva Span 20, 80 a 85 a kyselina olejová. Poslední testovaná kyselina palmitová byla opět nerozpustná a tvořila heterogenní roztok.

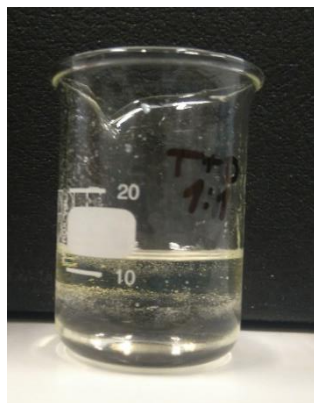


Obrázek 33: Aditiva v minerálním oleji. 1 – Tween 20, 2 – Triton X-114, 3 – SDS rozpuštěný ve vodě.



Obrázek 34: Nerozpustný SDS v minerálním oleji.

Jelikož by se Tween 20 podle hodnoty HLB neměl rozpouštět v minerálním oleji ale ve vodě, byl připraven testovací vzorek (viz *Obrázek 35*), který byl namíchan v poměru 1:1 (Tween 20:minerální olej). Při takto vysoké koncentraci Tweenu 20 již nedošlo k jeho rozpuštění a navíc bylo pozorováno vysoké zvýšení viskozity směsi. Lze tedy vyvodit, že nízké koncentrace Tweenu 20 jsou ještě schopny rozpustit se v minerálním oleji bez výrazných fyzikálních změn roztoku.



Obrázek 35: Nerozpustný Tween 20 v minerálním oleji v poměru 1:1.

Jako vhodné surfaktanty, z důvodu jejich rozpustnosti v minerálním oleji, byly vyhodnoceny tyto: Tween 20, všechny použité Spany, a kyselina olejová. Pro naše další experimenty byly použity Tween 20 a Span 80.

5.2 Výsledky stabilit MR kapalin s minerálním olejem jako nosnou kapalinou

U připravených MR kapalin obsahujících částice o velikosti 44 μm byla použita nosná kapalina z předchozího pozorování. Sedimentační stabilita byla sledována po dobu 48 hodin. Z *Tabulky 17* můžeme vidět, že vzorek č. 1+ byl připraven z minerálního oleje a Tweenu 20 a vzorek č. 2+ z minerálního oleje a Tritonu X-114. Aby bylo dokázáno, že přítomnost aditiva v podobě surfaktantu má pozitivní vliv na stabilitu částic, byl připraven i vzorek č. 0, který neobsahoval žádnou povrchově aktivní látku a sloužil tedy jako reference nestabilizovaných částic v minerálním oleji.

Přítomnost Tweenu 20 byla zvolena na základě jeho úplné rozpustnosti v minerálním oleji a bylo tedy předpokládáno, že tato MR suspenze bude nejstabilnější. Pro porovnání stability byl připraven i vzorek obsahující Triton X-114, který byl vybrán na základě jeho počáteční rozpustnosti v minerálním oleji. Bylo pozorováno, zda se kapalina v průběhu sedimentace opět rozdělí na dvě fáze či zůstane jako homogenní roztok a pomůže tak zlepšit stabilitu suspenze.

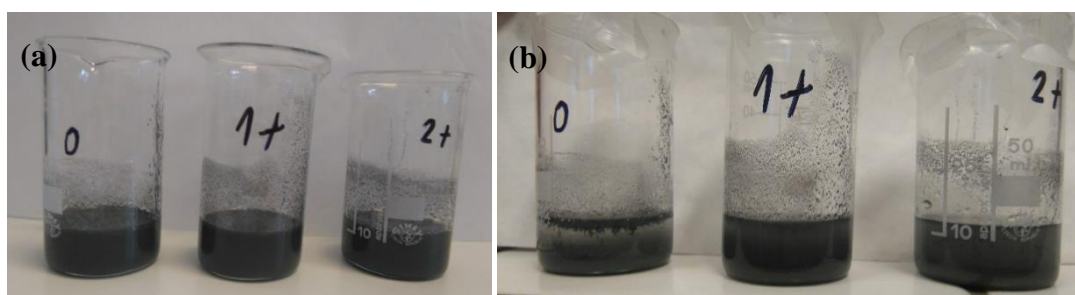
Tabulka 17: Sledování sedimentační stability MR kapalin s přidávkem aditiv.

Číslo	Nosná kapalina	Aditiva	Rychlost sedimentace
0	Minerální olej	-	Nejrychlejší
1+		Tween 20	Nejpomalejší
2+		Triton X-114	Pomalejší než 0, ale rychlejší než 1+

Do řádně rozmíchaného oleje s aditivem bylo postupně přidáváno přesně navážené množství železných částic o průměru 44 μm (viz kapitola 4.2). Takto velké částice byly vybrány z důvodu

jejich nejrychlejší sedimentace, které mělo zaručit rychlé získání stabilizačních výsledků. Všechny suspenze byly promíchány skleněnou tyčinkou a následně u nich byla pozorována sedimentační stabilita.

Na *Obrázku 36 a* jsou zobrazeny připravené MR kapaliny okamžitě po zamíchání. Vpravo na *Obrázku 36 b* je již po 2,5 hodinách u všech vzorků vidět sedimentační nestabilita. U suspenze bez přítomnosti aditiv (vzorek č. 0) byla pozorována výrazně rychlejší sedimentace částic v porovnání s ostatními vzorky. Naopak u vzorku obsahující Tween 20 byl potvrzen předpoklad o jeho největší stabilitě. U vzorku č. 2+ byla v porovnání se vzorkem č. 0 potlačena sedimentace, avšak ne tak dostatečně jako u vzorku, který obsahoval Tween 20. I přes výrazné zlepšení sedimentační stability u obou vzorků došlo po 48 hodinách k jejich úplnému usazení.



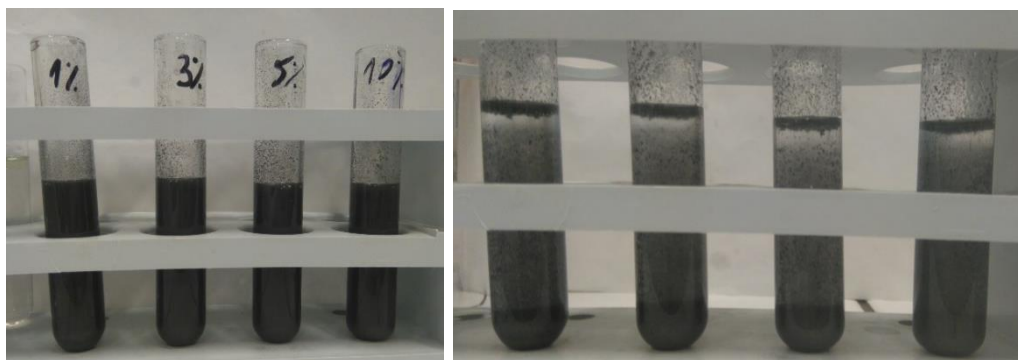
Obrázek 36: Sedimentační stabilita MR kapalin (a) po zamíchání a (b) po 2,5 hodinách stání.

Bylo tedy dokázáno, že MR kapalina obsahující surfaktant v porovnání s MR kapalinou bez surfaktantu vykazovala vyšší sedimentační stabilitu. Dále také záleželo, jak byla samotná nosná kapalina stabilní a zda bylo aditivum rozpustné v minerálním oleji. Na základě získaných výsledků byla dále sestavena koncentrační řada vybraného aditiva, pro zjištění vhodné koncentrace surfaktantu (viz kapitola 4.6.1).

5.2.1 Koncentrační řada Tweenu 20

Vzorky MR kapalin obsahující různé koncentrace Tweenu 20 (1, 3, 5 a 10 obj. %) byly pozorovány v desetiminutových intervalech po dobu hodiny a půl. Jako nosná kapalina byl použit minerální olej, ve kterém byly dispergovány částice o velikosti 44 μm .

Již po 10 minutách pozorování byla zřejmá sedimentační nestabilita u všech připravených MR kapalin. Po 40 minutách začala být sedimentace viditelná v celém objemu u prvních tří vzorků a po dalších 10 minutách byla viditelná nestabilita i u suspenze s 10 obj. % Tweenu 20. Na *Obrázku 37* je vidět, že na konci pozorování již byla na dně usazena většina částic.



Obrázek 37: MR kapaliny s různými koncentracemi Tweenu 20. Vlevo MR kapaliny ihned po zamíchání, vpravo po 1,5 hodině stání.

Na základě zaznamenaných výsledků v *Tabulce 18* lze tedy říci, že pokud je koncentrace aditiva velmi nízká, zlepšení sedimentační stability není příliš viditelné. Pokud je ovšem koncentrace Tweenu 20 již okolo 10 obj. % v MR kapalině je pozorovatelná vyšší stabilita.

Tabulka 18: Závislost koncentrace Tweenu 20 v MR kapalině na sedimentaci.

Označení	Tween 20 [obj. %]	Výsledky pozorování sedimentační rychlosti
1%	1	Mezi vzorky žádné viditelné rozdíly
3%	3	
5%	5	
10%	10	Nejpomalejší

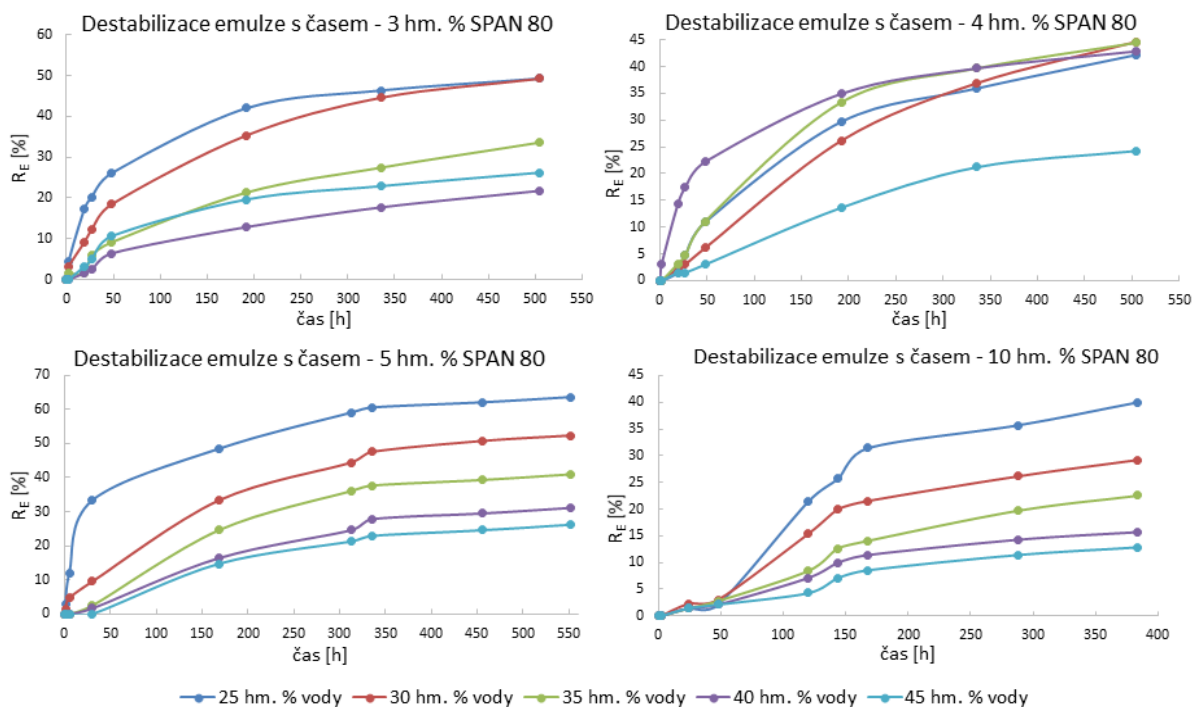
5.3 Výsledky stabilit emulzí typu V/O

Všechny připravené emulze byly po 10 ml napipetovány do zkumavek a byla pozorována jejich stabilita v závislosti na čase. Stabilita jednotlivých vzorků byla vyjádřena pomocí sedimentačního poměru R_E , kde byly jednotlivé oddělené fáze měřeny a zaznamenávány s rostoucím časem.

$$R_E = \frac{h}{c} \cdot 100\% \quad (7)$$

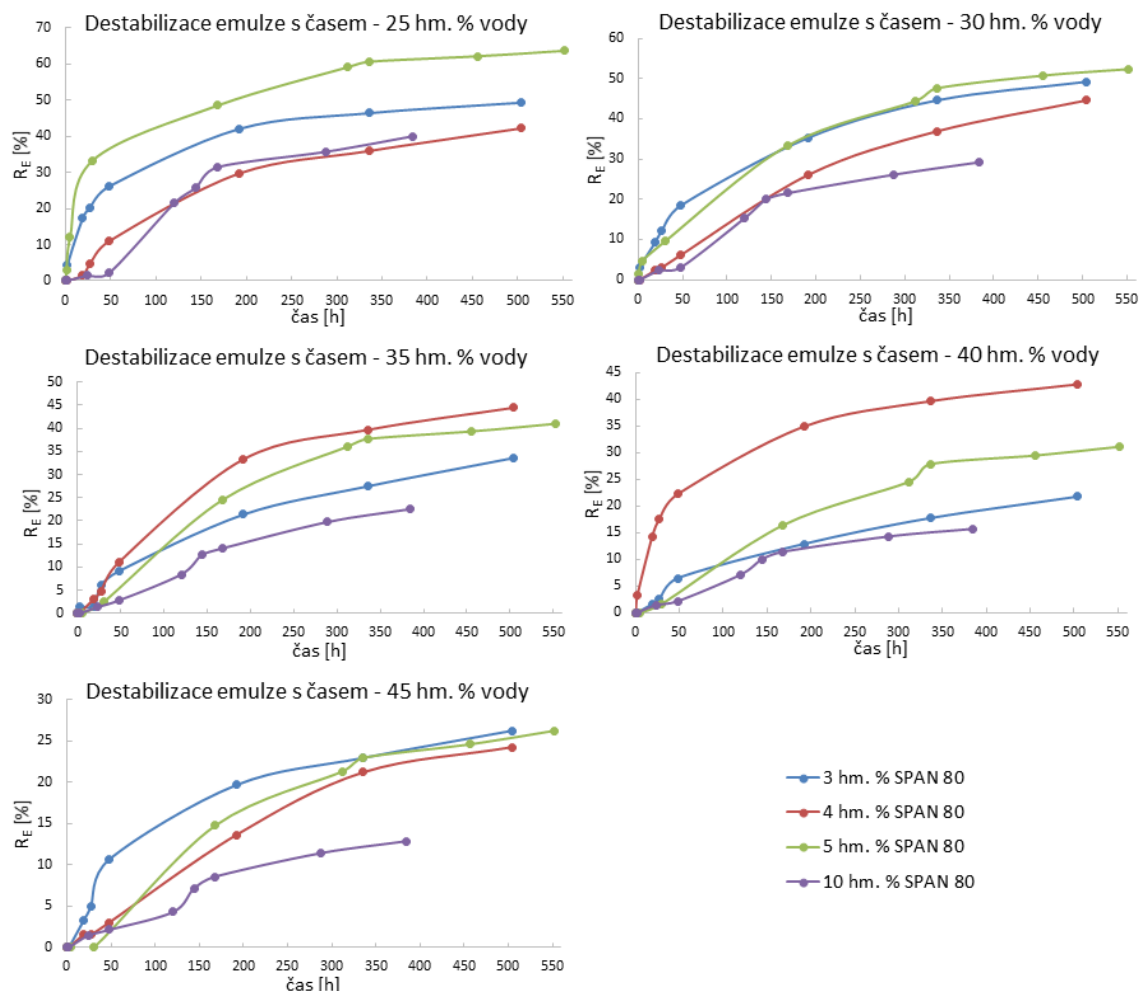
kde h je výška horní čiré části a c je výška celé emulze.

Z grafu na *Obrázku 38* můžeme pozorovat, že pro emulze s obsahem 3 hm. % Spanu 80 platí pravidlo: čím větší je zastoupení vody, tím je emulze stabilnější. Výjimkou jsou poslední dva vzorky s obsahem 40 a 45 hm. % vody, kde je jejich pořadí opačné. U emulzí obsahující 4 hm. % Spanu 80 byla stabilita všech vzorků poměrně podobná. Jen vzorek obsahující 45 hm. % vody vykazoval výrazně vyšší stabilitu. Z grafů dále můžeme vidět, že u vzorků s 5 a 10 hm. % Spanu 80 platí, že se zvyšujícím se obsahem vody v emulzích roste i jejich stabilita.



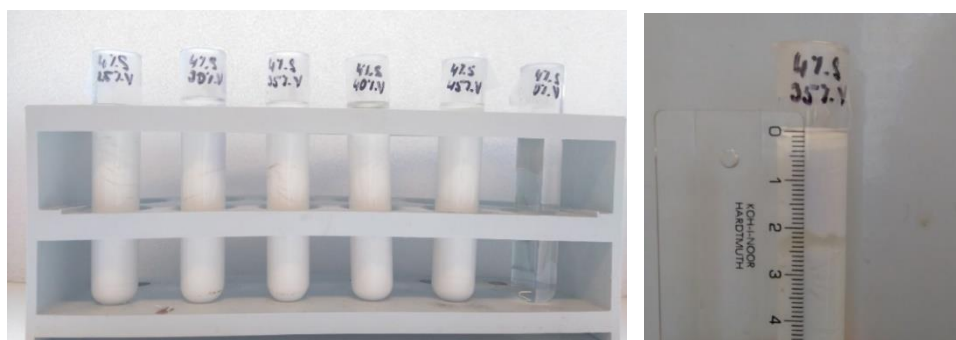
Obrázek 38: Graf závislosti R_E na čase pro emulze se 3, 4, 5 a 10 hm. % Spanu 80.

Na *Obrázku 39* jsou porovnávány emulze na základě stejného obsahu vody a různými koncentracemi aditiv. Zde vycházela různá pořadí, a proto nelze tvrdit, že se zvyšujícím se obsahem Spanu 80 jako emulgátoru je emulze stabilnější. Nicméně ve všech grafech vykazují nejvyšší stabilitu vzorky obsahující 10 hm. % Spanu 80.



Obrázek 39: Graf závislosti R_E na čase pro emulze s 25, 30, 35, 40 a 45 hm. % vody.

Dále je nutné zmínit, že u některých vzorků nedocházelo k postupnému oddělování čiré a zakalené fáze (viz *Obrázek 40*). Nicméně po několika dnech došlo v emulzi k ustálení a všechna čirá část prostoupila na hladinu. Jelikož byla měřena vždy jen horní čirá část roztoku bez ohledu na aktuální stav emulze, mohlo zde dojít ke zkreslení výsledků.



Obrázek 40: Vlevo vzorky po 24 hodinách, vpravo detail vzorku po 48 hodinách.

5.4 Výsledky stabilit MR kapalin s emulzí typu V/O jako nosnou kapalinou

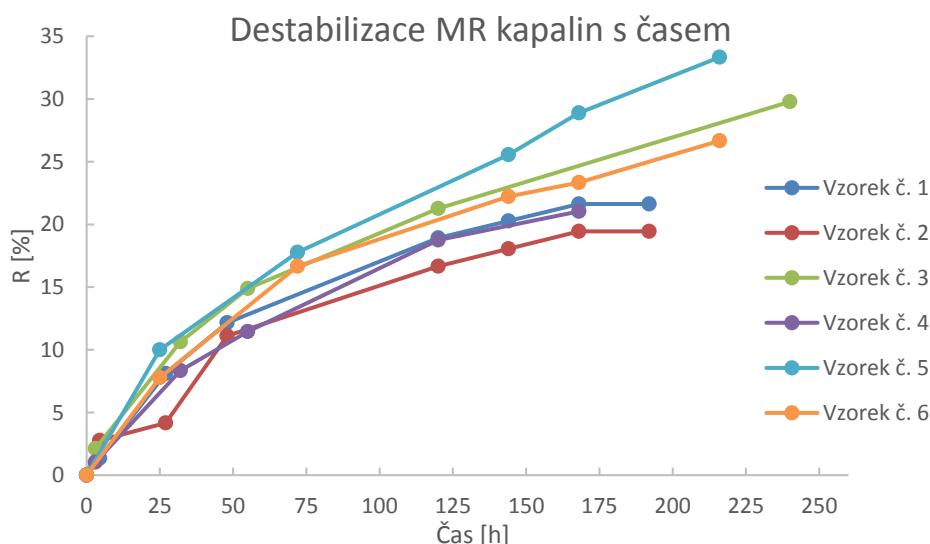
Všechny připravené emulze a částice se v přesných poměrech (viz *Tabulka 19*) byly míchány 24 hodin na vertikálním rotátoru při 25 otáčkách za minutu.

Tabulka 19: Složení MR kapalin, kde vzorek č. 5 a 7* obsahují neupravené částice.*

Vzorek	Množství částic		Emulze		
	[g]	[hm. %]	[g]	[hm. %]	Složení
1	12,529	82,7	2,630	17,3	5 hm. % Span 80, 40 hm. % vody
2	12,496	83,3	2,505	16,7	10 hm. % Span 80, 40 hm. % vody
3	6,018	60	4,038	40	5 hm. % Span 80, 40 hm. % vody
4	8,170	70	3,561	30	5 hm. % Span 80, 40 hm. % vody
5*	6,030	60	4,057	40	5 hm. % Span 80, 40 hm. % vody
6	6,183	60	4,028	40	5 hm. % Span 80, 40 hm. % vody
7*	2,138	30	5,010	70	3 hm. % Span 80
8	2,138	30	5,008	70	3 hm. % Span 80

Vzorky byly vizuálně pozorovány po dobu několika týdnů a byla měřena a zaznamenávána jejich měnící se hladina nosné kapaliny. U všech vzorků byl opět vypočítán sedimentační poměr R mezi výškou nosné kapaliny a výškou celé MR kapaliny.

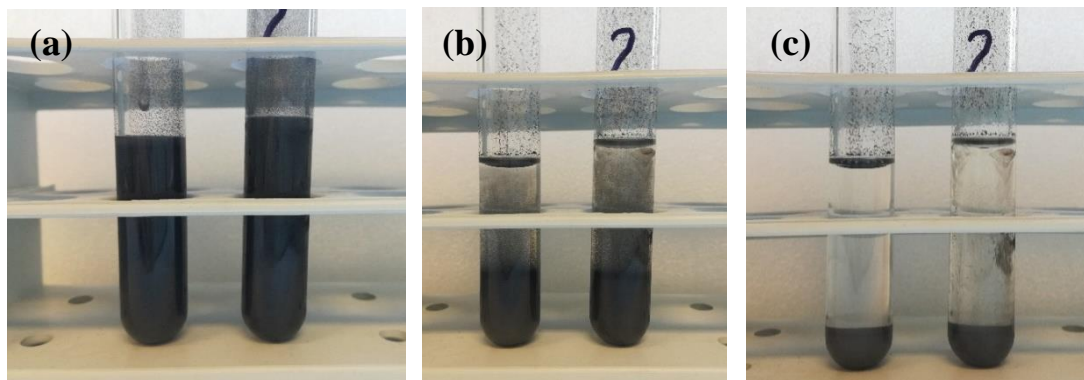
Na základě vypočtených sedimentačních poměrů byl vytvořen graf v závislosti na čase (viz *Obrázek 41*). Z tohoto grafu je zřejmé, že čím obsahují vzorky větší zastoupení částic a zároveň Spanu 80 jako emulgátoru, tím více jsou MR kapaliny stabilnější.



Obrázek 41: Výsledky stabilit MR kapalin s emulzí jako nosnou kapalinou.

Vzorky č. 3 a 6 byly připraveny v různých časech se stejným složením. Z grafu vidíme, že jsou jejich křivky téměř totožné, a proto lze tento pokus považovat za spolehlivý. Aby bylo dokázáno, že mají modifikované částice pozitivní vliv na sedimentační stabilitu, byla připravena MR kapalina č. 5 o stejném složení jako vzorky 3 a 6, která obsahovala neupravené částice. Z *Obrázku 41* vidíme, že byl tento vzorek nejméně stabilní a proto můžeme tvrdit, že Tweenem obalené částice přispívají k sedimentační stabilitě.

U vzorků 7 a 8 nebyla použita emulze typu V/O jako nosná kapalina, ale pouze minerální olej se Spanem 80 (viz *Obrázek 42*). Tyto vzorky byly připraveny pro porovnání, zda je přítomnost vody u předchozích vzorků efektivní. Navíc vzorek č. 7 obsahoval neupravené částice. Po odstavení vzorků z vertikálního rotátoru prakticky okamžitě došlo k jejich sedimentaci.

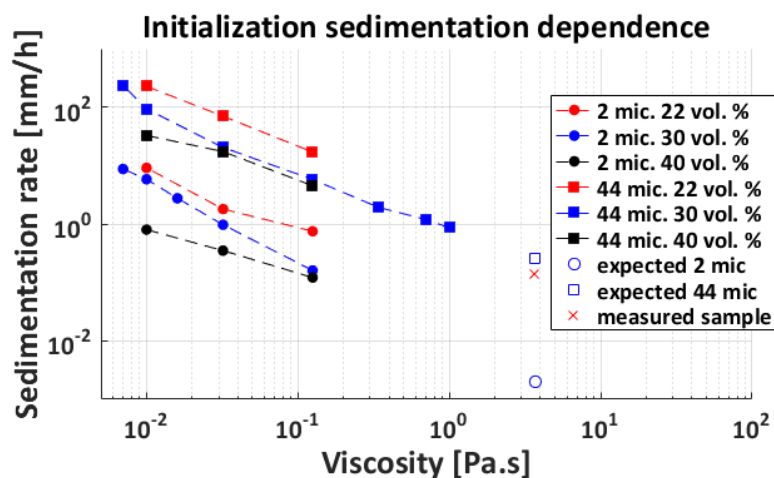


Obrázek 42: MR kapaliny č. 7 a 8. (a) ihned po míchání, (b) po 8 minutách a (c) po 35 minutách.

Bylo tedy dokázáno, že MR kapaliny obsahující emulzi jako nosnou kapalinu jsou stabilnější. Na rychlost sedimentace částic má tedy vliv nejen zhruba o řád vyšší viskozita připravených emulzí v porovnání se samotným minerálním olejem, ale také jak již bylo zmíněno modifikované částice.

5.5 Výsledky stability MR kapaliny

Jelikož měla připravená MR kapalina řádově vyšší viskozitu a obsahovala různě velké částice v porovnání s komerční kapalinou LORD 132DG, nebyla její sedimentační stabilita s čím porovnat. Na *Obrázku 43* vidíme odhad, jak by se choval vzorek bez aditiv obsahující 44 μm částice v nosné kapalině o viskozitě 3,7 Pa·s (viskozita připravené emulze). Výsledkem je, že přidavek aditiv (Span 80 a Tween 80) a menších částic (5-9 μm) způsobil zhruba poloviční rychlost sedimentace.



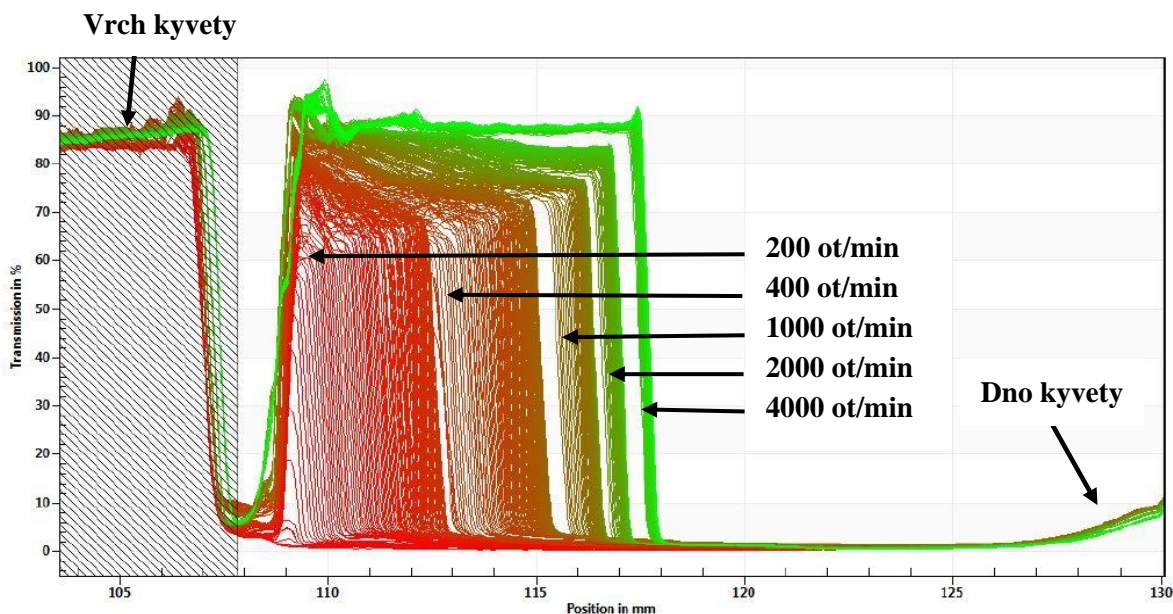
Obrázek 43: Vyhodnocení sedimentace.

Kdyby byla připravena MR kapalina s vhodnými aditivy v nosné kapalině s podobnou viskozitou a stejnými částicemi jako má LORD 132DG, kapalina by sedimentovala zase zhruba poloviční rychlostí jako tentýž vzorek bez aditiv. Můžeme tedy tvrdit, že připravená MR kapalina zpomalila sedimentaci zhruba na polovinu v porovnání se vzorkem bez aditiv. Nicméně komerční kapaliny sedimentují téměř 60x pomaleji.

5.6 Výsledky stabilit MR kapalin při měření na analytické odstředivce

Byly provedeny tři testy stability na disperzním analyzátoru LUMiSizer. Připravené suspenze byly testovány při jaké frekvenci otáček a po jaké době začnou sedimentovat. Všechny testy trvaly 17 hodin a byly provedeny při 25 °C. U prvního měření byla nastavena frekvence na 200-4 000 otáček za minutu (vzorky 1-4).

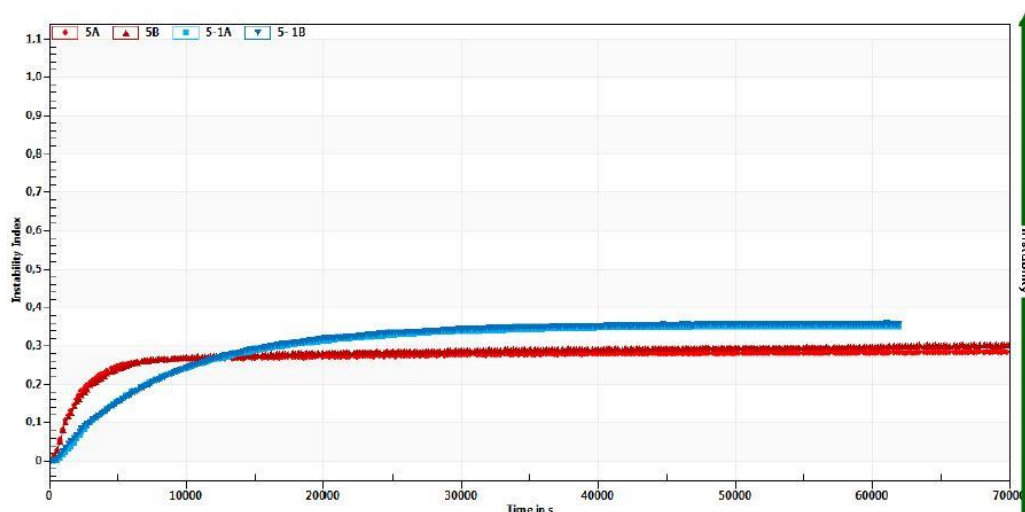
Na *Obrázku 44* lze vidět transmittanční profil vzorku číslo 1, u kterého byla stabilita sledována při různých frekvencích otáček. Z výsledků je zřejmé, že při každém zvýšení otáček vykazoval vzorek výraznou sedimentační nestabilitu. Při 4 000 otáčkách za minutu byly všechny sledované vzorky okamžitě usazené.



Obrázek 44: Transmittanční profil pro vzorek číslo 1A pro 200-4000 otáček za minutu.

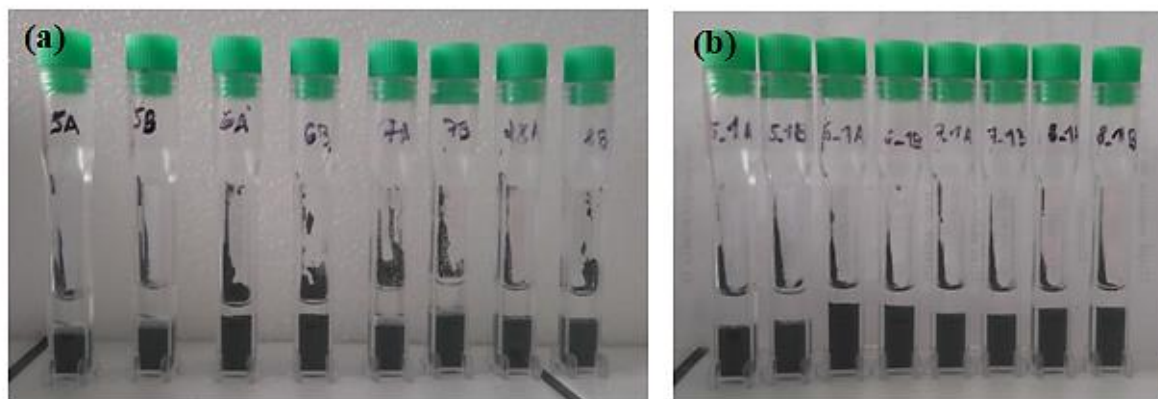
Z prvního měření bylo tedy zjištěno, že od 1 000 otáček za minutu se MR kapaliny prakticky ihned usadí. Proto byla připravena další série vzorků 5-8 o stejném složení jako vzorky číslo 1-4, které byly sledovány za stejných podmínek pouze při 200 otáčkách za minutu. Abych dokázala, že chemisorbované částice mají pozitivní vliv na sedimentační stabilitu, byly analogicky připraveny vzorky s číslem 5_1-8_1 které obsahovaly neupravené železné částice. Při porovnání samotných sérií suspenzí vyšel jako nejstabilnější vždy vzorek č. 6 a nejméně stabilní vzorek č. 5. Lze tedy říci, že čím větší množství vody a Spanu 80 bylo v MR kapalině obsaženo, tím byla stabilnější.

Na *Obrázku 45* vidíme příklad vzájemného porovnání vzorků číslo 5 o stejném složení a s různými částicemi. Zhruba 3,5 hodiny byl vzorek obsahující neupravené částice stabilnější. Po tomto čase byl však stabilnější vzorek s upravenými částicemi.



Obrázek 45: Závislost indexu stability na čase pro vzorek č. 5.

Vzorek č. 6 obsahující upravené částice byl po celou dobu měření stabilnější. MR kapalina č. 7 obsahující neupravené částice byla zhruba 8 hodin stabilnější než kapalina s upravenými částicemi. Neočekávaný výsledek vyšel u vzorku s číslem 8, kde byla suspenze obsahující neupravené částice po celou dobu stabilnější.



Obrázek 46: Všechny vzorky na konci měření; MR kapaliny s (a) upravenými částicemi a (b) neupravenými částicemi.

Jelikož se MR kapaliny špatně dávkovaly a nebyly vidět vzduchové bubliny, květy neobsahovaly vždy stejné množství vzorku (viz *Obrázek 46*). Zde mohlo dojít k nepřesnostem při měření a zároveň ke zkreslení výsledků.

Nicméně dle dosažených výsledků lze konstatovat, že MR kapaliny obsahující chemisorbované částice Tweenem 80 vykazují větší stabilitu při dlouhodobém pozorování v porovnání se vzorky obsahující neupravené částice. Výjimkou je již zmíněný vzorek č. 8.

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala výběrem vhodných aditiv ke zvýšení sedimentační stability magnetoreologických kapalin. Teoretická část obsahuje základní poznatky o disperzních soustavách. Dále je zde popsáno složení MR kapalin a možnosti zlepšení její sedimentační nestability. V práci jsou také shrnuty současné poznatky řešené problematiky.

Nejprve byla sedimentace připravených MR kapalin vyhodnocována vizuálně. Na základě prvotních výsledků byly dále připraveny vzorky pro laboratorní ověření jejich stability. U všech připravených vzorků byl použit minerální olej ($\rho = 840 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) jako nosná kapalina a přítomné částice byly z téměř čistého železa o hustotě $\rho = 7\,860 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Pro ověření použitelnosti vybraných aditiv v olejovém disperzním prostředí, byly namíchaný roztoky obsahující minerální olej s 3 obj. % aditiva. Vhodný surfaktant byl vybrán na základě jeho úplné rozpustnosti v daném oleji bez výrazných fyzikálních změn roztoku. Požadovaným kritériím vyhovovala tato aditiva: Spany 20/80/85 a kyselina olejová. Jako vhodné aditivum při jeho nízkých koncentracích byl vyhodnocen i Tween 20.

Z připravených a vybraných kapalin z předchozího pokusu byly dále vytvořeny MR kapaliny. Byl vybrán vzorek obsahující Tween 20 a Triton X-114 jako surfaktant, do kterého bylo přidáno přesné množství částic o průměru $44 \mu\text{m}$ (3,7 obj. %). Byl připraven i vzorek č. 0 (kontrolní vzorek), který neobsahoval žádnou povrchově aktivní látku a sloužil tedy jako reference nestabilizovaných částic v minerálním oleji. Triton X-114 byl vybrán na základě jeho počáteční rozpustnosti v minerálním oleji.

Bylo dokázáno, že přítomnost aditiva pozitivně ovlivňuje sedimentační stabilitu MR kapaliny a že záleží, jak je samotná nosná kapalina stabilní. Nejméně stabilní vyšel tedy vzorek neobsahující žádné aditivum, dále pak vzorek s Tritonem X-114 (částečně rozpustný v minerálním oleji) a jako nejstabilnější byl vzorek obsahující Tween 20. Dále bylo zjišťováno, jaká koncentrace aditiva je pro MR kapalinu nejvhodnější. Z předchozích výsledků byl pro tento experiment vybrán Tween 20. Bylo zjištěno, že při vyšší koncentraci aditiva se zvyšuje sedimentační stabilita.

Pro další experimenty byla jako nosná kapalina vybrána emulze typu V/O, kde byl jako emulgátor použit Span 80. Nejprve bylo připraveno 24 vzorků s různými koncentracemi Spanu a destilované vody. U emulzí byla poté pozorována stabilita po dobu několika týdnů. Sledovala se a zaznamenávala se výška horní čiré fáze, ze které byl následně vypočítán sedimentační poměr R_E . Tento poměr byl zanesen do grafu v závislosti na čase. Nejprve byly navzájem porovnávány vzorky obsahující stejné množství aditiva. U většiny emulzí platilo, že se zvyšujícím se obsahem vody rostla i jejich stabilita. Toto pravidlo neplatilo pro vzorky obsahující 4 hm. % Spanu 80. Dále je nutné zmínit, že čím více vody emulze obsahovala a byla stabilnější, tím se zvyšovala i její viskozita, která není pro praktické využití MR kapalin žádoucí. Při porovnání vzorků obsahujících stejné množství vody neplatila žádná posloupnost. Jen vzorky obsahující 10 hm. % Spanu vykazovaly vždy největší stabilitu.

Bylo připraveno šest MR kapalin obsahujících emulzi typu V/O jako nosnou kapalinu. Pro zvýšení stability suspenze byly částice o průměru 5-9 μm chemisorbovány Tweenem 80.

Složení emulzí a podíl částic se v každém vzorku lišily (výjimkou byly dva stejné vzorky číslo 3 a 6). Opět byl vypočítán sedimentační poměr R na základě pozorování oddělování fází. Z vyjádření závislosti R na čase bylo patrné, že vzorky obsahující větší zastoupení částic a zároveň Spanu 80 jako emulgátoru jsou více stabilní.

Vzorek č. 5 obsahující neupravené částice vykazoval výraznější nestabilitu v porovnání s ostatními vzorky. Lze tedy říci, že modifikované částice mají pozitivní vliv na sedimentační stabilitu. Pro porovnání byly připraveny i MR kapaliny č. 7 (neupravené částice) a 8, které obsahovaly pouze minerální olej jako nosnou kapalinu. U těchto vzorků téměř okamžitě došlo k sedimentaci. Na sedimentační stabilitu má tedy vliv nejen zhruba o řád vyšší viskozita připravených emulzí v porovnání se samotným minerálním olejem, ale také, jak již bylo zmíněno, modifikované částice.

Pro laboratorní ověření sedimentační stability MR kapalin byl připraven vzorek o vybraném složení na základě předchozích výsledků. Sedimentační měření bylo založeno na sledování změn hustot magnetického toku u sledovaného vzorku. Jako nosná kapalina byla vybrána emulze a z důvodu velké spotřeby částic byly použity částice o velikostech 5-9 μm a 44 μm (bidisperzní kapalina). Jelikož měla připravená MR kapalina jinou viskozitu a složení než komerční MR kapalina LORD 132DG nebyla její sedimentační stabilita s čím porovnat. Byl proto vypočítán odhad, jak by se daná suspenze chovala s podobnou viskozitou a stejnými částicemi jako má LORD 132DG. Výsledkem je, že by připravená kapalina sedimentovala zhruba 2x pomaleji v porovnání se vzorkem bez aditiv.

Další stabilizační měření vybraných MR kapalin probíhalo na analytické odstředivce. Jako nosné kapaliny byly opět použity emulze V/O a částice o průměru 5-9 μm . Při tomto měření byly porovnávány vzorky obsahující stejnou nosnou kapalinu s modifikovanými či nemodifikovanými částicemi. Všechny testy trvaly 17 hodin a byly provedeny při 25 °C. Jako vhodná frekvence otáček pro měření byla stanovena na 200 ot/min. Z naměřených výsledků můžeme říci, že MR kapaliny obsahující chemisorbované částice Tweenem 80 vykazují větší stabilitu v porovnání se vzorky obsahující nemodifikované částice. Výjimku tvořil pouze vzorek č. 8.

V rámci této práce byla připravena MR kapalina obsahující vhodná aditiva, která vykazuje zvýšenou sedimentační stabilitu. Ta však nebyla tak vysoká a zkoumaná MR kapalina měla vyšší viskozitu v porovnání s komerčními MR kapalinami od společnosti Lord Corporation. Proto by bylo vhodné v práci pokračovat, aby byly výše zmíněné nedostatky odstraněny.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ELAHINIA, M., C. CIOCANEL, M. NGUYEN a S. WANG. MR- and ER-Based Semiactive Engine Mounts: A Review. *Smart Materials Research* [online]. 2012, **2013**, 1-21. DOI: 10.1155/2013/831017.
- [2] FREUDENRICH, C. How Biomechanics Works. *HowStuffWorks: Science* [online]. 2007. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/biomechanics.htm>
- [3] BŘÍŽĎALA, J. Směsi. *E-ChemBook: Multimediální učebnice chemie* [online]. 2018. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/smesi>
- [4] BARTOVSKÁ, L., M. ŠIŠKOVÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. 5. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. ISBN 80-7080-579-X.
- [5] Malvern Instruments Ltd. a ANAMET s.r.o., ed. Stabilita suspenzí a disperzí - Proč jsou parametry jako velikost částic, zeta potenciál a reologické vlastnosti tak důležité?. *CHEMAGAZÍN: Pevné a sypké látky, nanomateriály* [online]. 2011, **21**(4), 14-16. Dostupné z: http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/CHEMAGAZIN_XXI_4_cl3.pdf
- [6] Neužil, L., V. Míka: *Chemické inženýrství IA*. VŠCHT. Praha 1992. ISBN 80-7080-164-6
- [7] FENG, Z. Study of Sedimentation Stability of Magnetorheological Fluid. *Advances in Materials* [online]. 2015, **4**(1). DOI: 10.11648/j.am.20150401.11.
- [8] RODRIGUEZ-ARCO, L., A. GÓMEZ-RAMÍREZ, J. D. G. DURÁN a M. T. LÓPEZ-LÓPEZ. New Perspectives for Magnetic Fluid-Based Devices Using Novel Ionic Liquids as Carriers. *InTech: Ionic liquids as carriers for magnetic fluids* [online]. MECD, Spain, 2012, 17, 445-464. DOI: 10.5772/51398.
- [9] GENÇ, S. Synthesis and properties of magnetorheological (MR) fluids [online]. University of Pittsburgh, 2002. Dostupné z: <http://d-scholarship.pitt.edu/8924/1/genc12-20.pdf>. Disertační práce. University OF PITTSBURGH, SCHOOL OF ENGINEERING.
- [10] LÓPEZ-LÓPEZ, M. T., A. GÓMEZ-RAMÍREZ a J. D. G. DURÁN. Preparation and Characterization of Iron-Based Magnetorheological Fluids Stabilized by Addition of Organoclay Particles. *Langmuir* [online]. 2008, **24**(14), 7076-7084. DOI: 10.1021/la703519p.
- [11] TRENDLER, A.-M. a H. BÖSE. Influence of particle size on the rheological properties of magnetorheological suspensions. *International Journal of Modern Physics B* [online]. 2005, **19**(07n09), 1416-1422. DOI: 10.1142/S0217979205030384.
- [12] NGATU, G. T. a N. M. WERELEY. Viscometric and Sedimentation Characterization of Bidisperse Magnetorheological Fluids. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2007, **43**(6), 2474-2476. DOI: 10.1109/TMAG.2007.893867.

- [13] JÖNKKÄRI, I., M. ISAKOV a S. SYRJÄLÄ. Sedimentation stability and rheological properties of ionic liquid-based bidisperse magnetorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2014, **26**(16), 2256-2265. DOI: 10.1177/1045389X14551436.
- [14] KIM, S. Y., S. H. KWON, Y. D. LIU. Core-shell-structured cross-linked poly(glycidyl methacrylate)-coated carbonyl iron microspheres and their magnetorheology. *Journal of Materials Science* [online]. 2014, **49**(3), 1345-1352. DOI: 10.1007/s10853-013-7818-3.
- [15] MATYJASZEWSKI, K. Atom Transfer Radical Polymerization (ATRP): Current Status and Future Perspectives. *Macromolecules* [online]. 2012, **45**(10), 4015-4039. DOI: 10.1021/ma3001719.
- [16] CVEK, M., M. MRLIK, M. ILCIKOVA, T. PLACHY, M. SEDLACIK, J. MOSNACEK a V. PAVLINEK. A facile controllable coating of carbonyl iron particles with poly(glycidyl methacrylate): a tool for adjusting MR response and stability properties. *Journal of Materials Chemistry C* [online]. 2015, **3**(18), 4646-4656. DOI: 10.1039/C5TC00319A.
- [17] SHAH, K. a S.-B. CHOI. The influence of particle size on the rheological properties of plate-like iron particle based magnetorheological fluids. *Smart Materials and Structures* [online]. 2015, **24**(1), 015004. DOI: 10.1088/0964-1726/24/1/015004.
- [18] UPADHYAY, R. V., Z. LAHERISHETH a K. SHAH. Rheological properties of soft magnetic flake shaped iron particle based magnetorheological fluid in dynamic mode. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, **23**(1), 015002. DOI: 10.1088/0964-1726/23/1/015002.
- [19] MAYER, D. Magnetické kapaliny a jejich použití. *Elektro. Západočeská univerzita v Plzni*, 2007, **17**(3), 78-79.
- [20] ODENBACH, S. Recent progress in magnetic fluid research. *Journal of Physics: Condensed Matter* [online]. 2004, **16**, 1135-1150. DOI: 10.1088/0953-8984/16/32/R02.
- [21] BARTOVSKÁ, L., M. ŠIŠKOVÁ. *Integrovaný systém elektronických studijních opor VŠCHT Praha: Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav* [online]. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2005. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/hydrofilne-lipofilni_rovnovaha_hlb.html
- [22] PubChem Compound Database. *PubChem: Open chemistry database* [online]. New Orleans: American Chemical Society National Meeting, 2018. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
- [23] NGUYEN, Q.-H. a S.-B. CHOI. Optimal Design Methodology of Magnetorheological Fluid Based Mechanisms: Composition of MRF. *InTech* [online]. 2012, (14), 347-382. DOI: 10.5772/51078.
- [24] JANALÍK, J.: Viskozita tekutin a její měření. 2010, VŠBTU, fakulta strojní Ostrava

- [25] ENGLER, H., A. LANGE, D. BORIN a S. ODENBACH. Hindrance of thermomagnetic convection by the magnetoviscous effect. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2013(60), 499-504. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.049.
- [26] BARABANOVA, A., V. MOLCHANOV a A. KHOKHLOV. Magnetic polymer beads: Recent trends and developments in synthetic design and applications. *European Polymer Journal* [online]. 2011, April 2011, 47(4), 542-559. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2010.11.006.
- [27] SPENCER, B. F., G. YANG, J. D. CARLSON a M. K. SAIN. "Smart" Dampers for Seismic Protection of Structures: A Full-Scale Study. Second World Conference on Structural Control [online]. Kyoto (Japan), 1998, 1-10. Dostupné z: <http://sstl.cee.illinois.edu/papers/BMRD-2WCSC.pdf>
- [28] YANG, G. Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: Modeling, testing and control [online]. Notre Dame (Indiana), 2001. Dostupné z: http://sstl.cee.illinois.edu/papers/gyang2_thesis.pdf. Disertační práce. The University of Notre Dame. Vedoucí práce B.F. Spencer, Jr.
- [29] KIM, Y., J.-W. BAI a L. D ALBANO. Fragility estimates of smart structures with sensor faults. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013, 22(12), 1-12. DOI: 10.1088/0964-1726/22/12/125012.
- [30] BONSOR, K. How Smart Structures Will Work. Science/HowStuffWorks [online]. 2001. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/engineering/structural/smart-structure.htm>
- [31] GUÐMUNDSSON, K. H.. *Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry*. University of Iceland, 2011. Disertační práce. School of Engineering and Natural Sciences. Vedoucí práce Dr. Fjóla Jónsdóttir.
- [32] WANG, J a G. MENG. Magnetorheological fluid devices: Principles, characteristics and applications in mechanical engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* [online]. 2001, 215(3), 165-174. DOI: 10.1243/1464420011545012.
- [33] PARK, J. H., B. D. CHIN a O O. PARK. Rheological Properties and Stabilization of Magnetorheological Fluids in a Water-in-Oil Emulsion. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2001, 240(1), 349-354. DOI: 10.1006/jcis.2001.7622.
- [34] TURCZYN, R. a M. KCIUK. Preparation and study of model magnetorheological fluids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* [online]. 2008, 27(2), 131-134.
- [35] FEI, C., T. ZUZHI a W. XIANGFAN. Novel Process to Prepare High-Performance Magnetorheological Fluid Based on Surfactants Compounding. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2014, 30(2), 210-215. DOI: 10.1080/10426914.2014.892967.

[36] HUANG, Y., Y. JIANG, X. YANG a R. XU. Influence of Oleic and Lauric Acid on the Stability of Magnetorheological Fluids. *Journal of Magnetism* [online]. 2015, **20**(3), 317-321. DOI: 10.4283/JMAG.2015.20.3.317.

[37] FANG, Ch., B. Y. ZHAO, L. S. CHEN, Q. WU, N. LIU a K. A. HU. The effect of the green additive guar gum on the properties of magnetorheological fluid. *Smart Materials and Structures* [online]. 2005, **14**(1), N1-N5. DOI: 10.1088/0964-1726/14/1/N01. ISSN 0964-1726.

[38] ROUPEC, J., P. BERKA, I. MAZŮREK, Z. STRECKER, M. KUBÍK, O. MACHÁČEK a M. Taheri ANDANI. A novel method for measurement of MR fluid sedimentation and its experimental verification. *Smart Materials and Structures* [online]. 2017, **26**(10), 107001. DOI: 10.1088/1361-665X/aa83f2.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[mm]	výška nosné kapaliny
b	[mm]	výška celé MR kapaliny
c	[mm]	celková výška emulze
CI		částice z karbonylového železa (carbonyl iron)
d_c	[m]	průměr částice
F	[N]	akcelerační síla
F_G	[N]	gravitační síla
F_R	[N]	odpor prostředí
F_{VZ}	[N]	vztlaková síla
g	[m·s ⁻²]	gravitační zrychlení
h	[mm]	výška oddělené čiré části u emulze
HLB		hydrofilně-lipofilní rovnováha
m	[kg]	hmotnost částice
MR kapalina		magnetoreologická kapalina
O/V		emulze typu olej ve vodě
PGMA		poly(glycidylmethakrylát)
R	[%]	sedimentační poměr MR kapaliny
r	[m]	poloměr částice
R_E	[%]	sedimentační poměr emulze
SDS		dodecylsíran sodný
v	[m·s ⁻¹]	rychlost částice
V/O		emulze typu voda v oleji
ρ_l	[kg·m ⁻³]	hustota kapaliny
η	[Pa·s]	dynamická viskozita