



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav procesní a zpracovatelské techniky**



Vliv dispergace na tokové vlastnosti disperzí nátěrových hmot

Effect of dispergation on rheology of coating materials

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní technika
Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Bc. Pavel Zajíček

Praha 2015

Vysoká škola: ČVUT v Praze
Ústav: 12118

Fakulta: strojní
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Pavel Zajíček**
program N2301 Strojní inženýrství
obor 3909T012 Procesní technika

název česky:

Vliv dispergace na tokové vlastnosti disperzí nátěrových hmot

název anglicky:

Effect of dispergation on rheology of coating materials

Zásady pro vypracování

Zadání:

Na základě literární rešerše a vlastních experimentů popište vliv úrovně dispergace na tokové vlastnosti nátěrových hmot na bázi nanočásticových kompozitů. Podrobně se zaměřte na následující dílčí cíle práce:

- rešerše zaměřená na technologii dispergace nátěrových hmot a na vliv složení disperzí, zejména vlastností dispergované fáze, na jejich tokové vlastnosti,
- experimentální stanovení tokových vlastností disperzí v závislosti na technologii a zejména úrovni dispergace částic do nátěrové hmoty,
- vyhodnocení a porovnání tokových vlastností disperzí v závislosti na technologii a energii vnesené do systému v průběhu dispergace,
- návrh metodiky hodnocení úrovně dispergace na základě měření tokových vlastností připravovaných disperzí.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: Úvod, rešerše, teoretická část, experimentální část, vyhodnocení experimentů, diskuse a zhodnocení výsledků, návrh metodiky, závěr.

Seznam odborné literatury: dle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 1. dubna 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 19. června 2015

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
vedoucí ústavu



prof. Ing. Michael Valášek DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 1. dubna 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal dne: 8.4.2015

Bc. Pavel Zajiček

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, za poskytnuté konzultace a za poskytnutí veškerého potřebného laboratorního vybavení pro provedení měření. Dále chci poděkovat Ústavu technologie, jmenovitě Bc. Michalu Zoubkovi za přípravu vzorků a poskytnutí konzultací. V neposlední řadě patří též velké díky mé rodině za podporu při studiu na této škole.

Prohlášení autora:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Vliv dispergace na tokové vlastnosti disperzí nátěrových hmot“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Tomáše Jirouta, Ph.D. s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....
Jméno a Příjmení

Anotační list

Jméno autora:	Pavel
Příjmení autora:	Zajíček
Název práce česky:	Vliv dispergace na tokové vlastnosti disperzí nátěrových hmot
Název práce anglicky:	Effect of dispergation on rheology of coating materials
Rozsah práce:	počet stran: 72 počet obrázků: 71 počet tabulek: 50 počet příloh: 20
Akademický rok:	2014/2015
Jazyk práce:	Český
Ústav:	Procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Strojní inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Oponent:	
Konzultant práce:	
Zadavatel:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Anotace česky:

Tato práce pojednává o vlivu dispergace nátěrových hmot s přídavkem nanočástic na změnu tokových vlastností. První část práce se zabývá teoretickou rešerší, v níž je obsažen popis jednotlivých metod dispergace, základní charakteristika nátěrových systému, závislost velikosti částic na dodané energii a dále základní teorie reologie. Provedené experimenty se zabývají mimo jiné vlivem úrovně dispergace na změnu tokových vlastností. Jako podklad, o který se experimentální část opírá, je provedený rozbor současných vědeckých prací zabývajících se vlivem velikosti částic na tokové vlastnosti. V poslední části je popsán provedený výzkum zkoumající vliv metody dispergace a okrajových podmínek na velikost zdánlivé viskozity. Zpracované výsledky jsou následně diskutovány a je provedeno vyhodnocení a návrh pro další výzkum a možnost použití nové metody hodnocení úrovně dispergace na základě změny tokových vlastností.

Anotace anglicky:

This paper discusses the influence of dispersion on paints with the addition of nanoparticles to change the rheology properties. The first part deals with theoretical research, which is contained in the description of methods of dispersion, the basic characteristics of the coating system, the dependence of particle size on the dispersion energy and basic theories of rheology. Experiments deal with due to the change in the level of dispersion on rheology properties. As the basis on which it relies experimental part is the analysis carried scientific papers dealing with the influence of particle size on rheology properties. The last part describes the current research investigating the effects of dispersion methods and boundary conditions on the size of the apparent viscosity. Processed results are discussed and is done evaluation of a proposal for further research and the possibility to use new methods of assessing the level of dispersion based on changes in flow properties.

Klíčová slova:

nanočástice, dispergace, reologie, viskozita, velikost částic, nátěrové systémy

Využití:

Nová metoda hodnocení úrovně dispergace využitelná především v průmyslu výroby barev a nátěrových hmot.

1. Obsah

1. Obsah.....	6
2. Úvod.....	10
3. Teoretické uvedení do problematiky – rešerše.....	11
3.1 Dispergace a metody dispergace.....	11
3.1.1 High-shear míchadla.....	14
3.1.2 Zubové míchadlo.....	14
3.1.3 Stator-rotor.....	15
3.1.4 Koloidní mlýny.....	16
3.1.5 Radiální míchadla.....	17
3.1.6 Axiální míchadla.....	18
3.1.7 Ultrazvuk.....	20
3.1.8 Dispergace pigmentů.....	20
3.2 Nátěrové systémy.....	22
3.2.1 Složení.....	22
3.2.2 Filmotvorné složky.....	23
3.2.3 Pigmenty.....	23
3.2.4 Ředidla a rozpouštědla.....	23
3.2.5 Aditiva.....	24
3.2.6 Nanomateriály.....	24
3.3 Teorie reologie.....	25
3.3.1 Obecné reologické rovnice a modely chování.....	25
3.3.2 Konstitutivní rovnice a reologické modely chování.....	26
3.3.3 Pseudoplastické chování.....	28
3.3.4 Tixotropie.....	28
4. Rozbor souvisejících experimentálních prací.....	30
4.1 Vliv velikosti částic na viskozitu.....	30
4.2 Vliv metody dispergace na technologické vlastnosti nátěrové hmoty.....	34
5. Experimentální část.....	36
5.1 Testovaný vzorek.....	36
5.2 Použité stroje a zařízení.....	36
5.2.1 Pomocné laboratorní vybavení.....	37
5.2.2 Reometr.....	37
5.2.3 Stator-rotor míchadlo.....	37
5.2.4 Stator-rotor – numerická simulace.....	38
5.2.5 Zubové míchadlo.....	40
5.2.6 Ultrazvukové míchadlo.....	41
5.3 Schéma uspořádání experimentů.....	42
5.4 Postup měření experimentu.....	43
5.5 Zpracovávání naměřených dat.....	44
5.6 Vyhodnocování zpracovaných dat.....	46

6. Výsledky	49
6.1 Dispergace - stator-rotor (a)	50
6.2 Dispergace - stator-rotor (b)	52
6.3 Dispergace - zubové míchadlo	55
6.4 Dispergace - ultrazvuk	58
7. Diskuze	61
8. Závěr	65
Seznam příloh	69
Seznam obrázků	70
Seznam tabulek	71

Seznam použitých zkratk

CNT	Carbon nanotube
DWCNT	Dual carbon nanotubes
MWCNT	Multi wall carbon nanotubes
SWCN	Single wall carbon nanotubes

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
τ_c	[Pa]	napětí způsobující rozpad kapky
τ_s	[Pa]	povrchové napětí
τ_d	[Pa]	viskózní napětí
ρ_c	[kg/m ³]	hustota kontinuální fáze
ρ_d	[kg/m ³]	hustota dispergované fáze
ε	[W/kg]	měrná disipovaná energie
ε_{\max}	[W/kg]	maximální měrná disipovaná energie
ε_{avg}	[W/kg]	průměrná měrná disipovaná energie
σ	[N/m]	povrchové napětí
d	[m]	průměr kapky
d_{\max}	[m]	maximální průměr stabilní kapky
d_{32}	[m]	Sauterův průměr
C_1	[1]	empirická konstanta
C_3	[1]	empirická konstanta
C_4	[1]	empirická konstanta
C_5	[1]	empirická konstanta
μ_d	[Pa.s]	dynamická viskozita
μ_p	[Pa.s]	dynamická viskozita
P	[W]	příkon
V	[m ³]	objem
$\vec{\Delta}$	[s ⁻¹]	tenzor rychlosti deformace
Δ_{12}	[s ⁻¹]	složka tenzoru rychlosti deformace
Δ_{21}	[s ⁻¹]	složka tenzoru rychlosti deformace
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	smyková rychlost
$\dot{\gamma}_{1N}$	[s ⁻¹]	newtonská smyková rychlost
$\vec{\tau}$	[Pa]	tenzor dynamických napětí
τ_{12}	[Pa]	složka tenzoru napětí
τ_{22}	[Pa]	složka tenzoru napětí
τ_{33}	[Pa]	složka tenzoru napětí

η	[Pa.s]	zdánlivá viskozita
ψ_{12}	[1]	koeficient 1. difference normálových napětí
ψ_{23}	[1]	koeficient 2. difference normálových napětí
I	[s ⁻¹]	1. invariant smykové rychlosti
\bar{II}	[s ⁻¹]	modifikovaný 2. invariant smykové rychlosti
III	[s ⁻¹]	3. invariant smykové rychlosti
τ_0	[Pa]	počáteční smykové napětí
K	[1]	koeficient konzistence
\bar{K}	[1]	fiktivní koeficient konzistence
n	[1]	index toku
n	[ot/s]	otáčky
m	[kg]	hmotnost
C_p	[J/(kg.K)]	měrná tepelná kapacita
t	[s]	čas
κ	[1]	poměr poloměrů válců

2. Úvod

Pod pojmem částicové nanokompozity rozumíme nátěrové hmoty s vlastnostmi modifikovanými pomocí nanočástic. Takovéto nátěrové hmoty mají široké uplatnění v oboru povrchových úprav. Volbou vhodné matrice doplněné nanočásticemi může chráněný povrch získat výrazně lepší vlastnosti. Tím je myšleno například vyšší abrazivní odolnost, lepší korozivzdorné vlastnosti, vyšší odolnost proti opotřebení, ale také může takto chráněný povrch získat antibakteriální schopnost.

Problém však nastává v případě přípravy takového nátěrového systému. Nejdůležitější v procesu výroby je optimálně provedená dispergace mikro- a nanočástic v matrici. V současné době se okrajové podmínky dispergace volí na základě zkušeností, konkrétně metodou „pokus-omyl“ tak, aby výsledný produkt měl přijatelné vlastnosti. Úroveň dispergace se v současné době hodnotí pomocí tzv. grindometrů, což jsou normalizované měrné etalony. Bohužel takovéto vyhodnocování však velmi závisí na zkušenosti obsluhy a je částečně subjektivní. Též není vhodná pro menší rozměry částic.

Hlavním cílem této práce je tedy prozkoumat možnost hodnocení úrovně dispergace na základě změny tokových vlastností. Předpoklad, ze kterého tato práce vychází, je ten, že s vyšší úrovní dispergace dostaneme větší počet menších částic, což by mohlo mít za následek změnu tokových vlastností, především nárůst zdánlivé viskozity

Jedním z cílů této práce bylo také provést rešerši zabývající se mimo jiné současnými technologiemi dispergace. Kromě tohoto jsem se zde měl zaměřit též na vliv velikosti částic na tokové vlastnosti nátěrové hmoty. Jak již uvádím výše, hlavním cílem této práce bylo provést sérii experimentů s cílem zmapovat vliv metody a úrovně dispergace na tokové vlastnosti nátěrové hmoty s přídavkem nanočástic. Dalším krokem bylo provést vyhodnocení a porovnání tokových vlastností disperzí v závislosti na technologii a energii vnesené do systému. Na základě výše uvedených experimentů a vyhodnocení provést návrh metodiky hodnocení úrovně dispergace na základě měření tokových vlastností připravovaných disperzí.

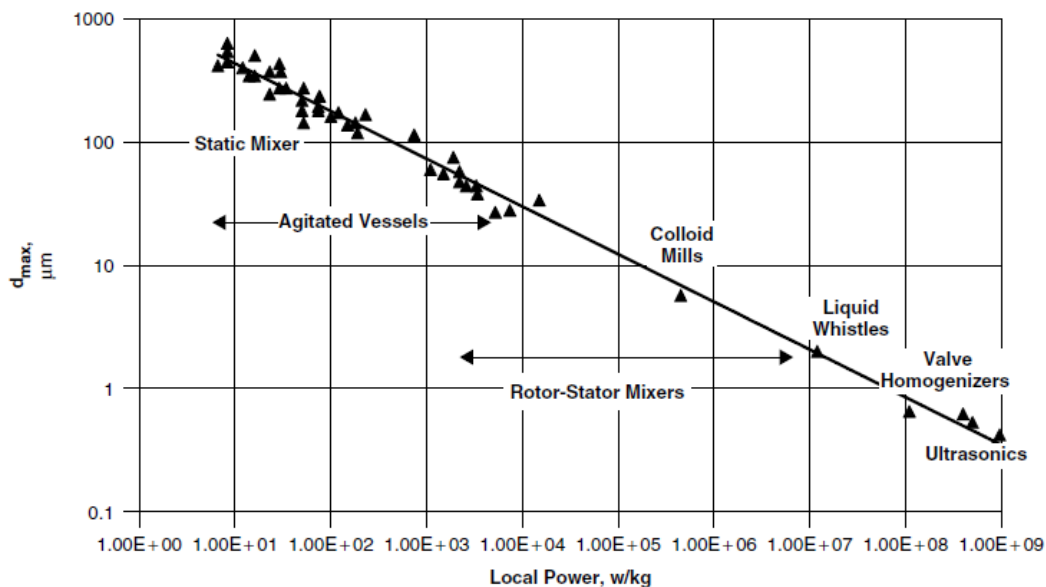
Mnou vybrané téma „Vliv dispergace na tokové vlastnosti disperzí nátěrových hmot“ jsem zvolil zejména z toho důvodu, že tato práce má možnost praktického uplatnění v průmyslu, konkrétně by mohla sloužit jako jeden z kroků pro návrh nové metody hodnocení úrovně dispergace na základě vnesené energie do systému.

3. Teoretické uvedení do problematiky – řešerše

3.1 Dispergace a metody dispergace

Disperzní soustava je taková soustava, která obsahuje minimálně dva rozdílné druhy materiálů. Jeden z nich je nazýván disperzním prostředím a druhý je nazýván disperzním podílem. Cílem dispergace je tedy disperzní podíl rozmíchat v disperzním prostředí za účelem vytvoření homogenní disperze. Takovýmto disperzním podílem jsou často pevné částice, případně shluky částic.

Existují různé metody dispergace. Na níže uvedeném obrázku je vidět, jakých velikostí částic jsme schopni dosáhnout určitou metodou dispergace. Abychom dosáhli určité velikosti částic, musíme do dané soustavy vložit odpovídající množství energie.



Obr. 1: Dosažitelná velikost částic pro danou metodu

Graf zobrazuje závislost vložené energie, metodě dispergace a dosažitelné velikosti částic (Paul et al., 2004).

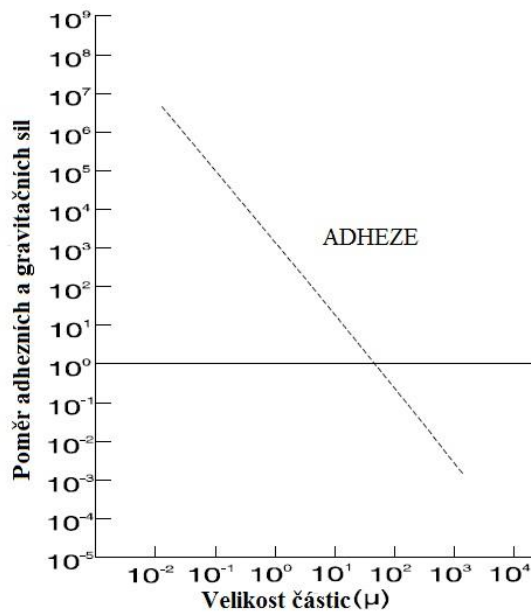
Tab. 1: Dosažitelná velikost částic pro danou metodu - shrnující tabulka

V tabulce je uvedena disipovaná energie v závislosti na metodě dispergace a maximální dosažitelné rozměry (Paul et al., 2004).

Druh zařízení	Disipovaná energie (W/kg)	Typické rozměry částic (μm)
Statický směšovač	10 - 1000	50-1000
Míchaná nádoba	0,1 - 100	20-500
Rotor-stator míchadlo	1000-100000	0,5-100
Vysokotlaká tryska	10 ⁸	0,5-1
Ultrazvuk	10 ⁹	0,2-0,5

Schopnost dispergace částic se dramaticky mění s klesající velikostí částic. Na obrázku 2 je vidět porovnání gravitačních sil a adhezních sil v závislosti na velikosti částic. Je patrné, že pro větší

částice převládají gravitační síly nad adhezními a dispergace je tudíž snadná. Ovšem pro částice menší jak 20 μm je zřejmé, že dochází k prudkému růstu adhezních sil a tím i potřebné energie pro jejich překonání a dosažení menších částic.



Obr. 2: Poměr adhezních a gravitačních sil v závislosti na velikosti částic v suspenzi
(Rawle, 2002)

Určení maximální stabilní velikosti částic závisí na velikosti vratných sil a na velikosti vnějších deformačních sil. Rozbití částice má za následek vznik většího množství částic o celkově větším povrchu při stejné hmotnostní koncentraci. Znamená to tedy, že k rozbití částice může dojít pouze tehdy, pokud částice získá dostatek energie pro kompenzaci povrchového napětí, které vzroste vlivem nárůstu plochy. Rozbití částice na menší rozměr může být tedy způsobeno dvěma mechanismy: působením setrvačných nebo dynamických tlakových sil turbulentních pulsací, anebo dále viskózními silami způsobenými rychlostním gradientem v okolní kontinuální fázi (Zhou and Kresta, 1998).

Pro dispergaci se dále uvažují pouze turbulentní víry menší než je délkové měřítko $k = l/d$, kde d je velikost částic. Větší turbulentní víry způsobují spíše jen pohyb kapky než její dispergaci. Z Kolmogorovy teorie (Kolmogoroff, 1941a,b in Leng and Calabrese, 2004) můžeme vyjádřit velikost napětí, které způsobuje rozpad kapky:

$$\tau_c \approx \rho_c \cdot \varepsilon^{\frac{2}{3}} \cdot d^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

kde ρ_c je hustota kontinuální fáze, ε je lokální rychlost disipace energie a d je rozměr kapky.

Povrchové síly jsou vyjádřeny následujícím vztahem:

$$\tau_s \approx \frac{\sigma}{d} \quad (2)$$

Dále dle Hinze (1955) in Leng and Calabrese (2004) ještě musíme uvažovat i viskózní napětí uvnitř kapky:

$$\tau_d \approx \mu_d \frac{(\tau_c / \rho_d)^{\frac{1}{2}}}{d} \quad (3)$$

Pokud budeme uvažovat rovnováhu výše uvedených sil:

$$\tau_c = \tau_s + \tau_d, \quad (4)$$

můžeme poté vyjádřit maximální rozměr kapky z rovnic 1-4 dle toho, jak viskózní máme dispergovanou fázi.

Pro nízko-viskózní dispergovanou fázi můžeme zanedbat vliv viskózní síly na stabilitu velikosti kapky a platí následující vztah:

$$d_{max} = C_1 \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{\frac{3}{5}} \varepsilon_{max}^{-\frac{2}{5}} \quad (5)$$

Přičemž konstanta C_1 musí být určena empiricky a je funkcí typu dispergátoru a geometrie nádoby. Veličina d_{max} nám říká, jaký maximální rozměr kapky je ještě v disperzi stabilní. Jinými slovy to znamená, že kapky o větším průměru než d_{max} nejsou udržitelné a rozpadnou se na menší rozměry. Též to můžeme chápat tak, že hodnota d_{max} nám říká, jakého rozměru jsme schopni dosáhnout pro dané fyzikální vlastnosti a danou maximální disipovanou energii (ε_{max}). Rovnice 5 je platná pro maximální míru disipované energie (ε_{max}), která je pouze v okolí dispergátoru. Kapky tedy nejsou v celém objemu vsádky uniformní. Tudíž aby v celé vsádce bylo dosaženo tohoto rozměru, bylo by nutné, aby vsádka prošla míchadlem mnohokrát. Z tohoto důvodu se často používá tzv. Sauterův střední průměr d_{32} . V případě, že maximální disipovaná energie se blíží průměrné disipované energii celého systému ($\varepsilon_{max} \propto \varepsilon_{avg}$), kde:

$$\varepsilon_{avg} = \frac{P}{\rho_c V}, \quad (6)$$

tak lze uvažovat, že Sauterův střední průměr odpovídá přibližně maximálnímu rozměru stabilní kapky a můžeme tedy spojením rovnic 5 a 6 získat závislost středního průměru kapky na disipované energii, povrchovém napětí a hustotou kontinuální fáze.

$$d_{32} \approx \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{\frac{3}{5}} \varepsilon_{max}^{-\frac{2}{5}} \quad (7)$$

Jak je vidět, velikost dispergovaných kapek se snižuje s rostoucí disipovanou energií.

Pro vysoko-viskózní látky však nemůžeme zanedbat vnitřní viskózní síly kapičky držící ji pohromadě. Po dosazení rovnic 1 až 3 do rovnice 4 dostaneme následující vztah:

$$\frac{\rho_c \varepsilon_{max}^{\frac{2}{3}} d_{max}^{\frac{5}{3}}}{\sigma} = C_3 \left[1 + C_4 \left(\frac{\rho_c}{\rho_d} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\mu_d \varepsilon_{max}^{\frac{1}{3}} d_{max}^{\frac{1}{3}}}{\sigma} \right] \quad (8)$$

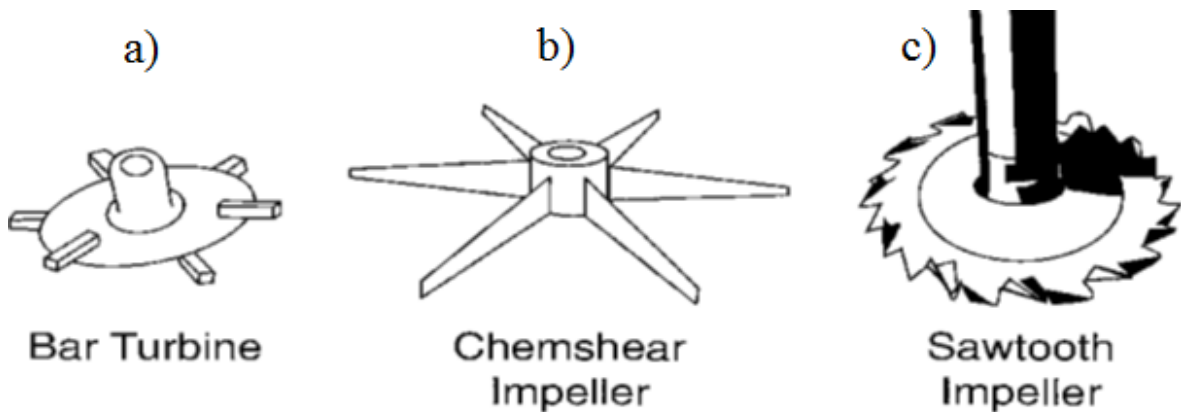
Jestliže bude viskozita dispergované fáze vysoká a/nebo povrchové napětí bude velmi malé, viskózní síly budou mít mnohem vyšší vliv na udržení kapičky než povrchové napětí. Rovnice tedy přejde do tvaru:

$$d_{max} = C_5(\rho_c \rho_d)^{-\frac{3}{8}} \mu_d^{\frac{3}{4}} \varepsilon_{max}^{-\frac{1}{4}} \quad (9)$$

Jak je z výše uvedené teorie a rovnic patrné, velikost kapiček závisí na povrchovém napětí, viskózních silách, na tlakových silách turbulentních pulsací a také na velikosti maximální disipované energie. Přestože jsou výše uvedené závislosti primárně určeny pro skupenství kapalina-kapalina příp. kapalina-plyn, předpokládám platnost stejného principu i pro dispergaci kapalina-tuhá fáze.

3.1.1 High-shear míchadla

Tato míchadla byla speciálně vyvinuta pro vytváření emulzí. Základní charakteristikou těchto míchadel je provoz při vysokých rychlostech a malý průměr vzhledem k průměru nádoby. Nevýhodou těchto míchadel je, že mají velmi malý čerpací účinek. Proto se často používají v kombinaci s přidaným cirkulačním míchadlem pro zajištění dobré cirkulace a homogenity vsádky (Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004). Níže na obrázku jsou pro představu uvedeny tři základní typy high-shear míchadel.

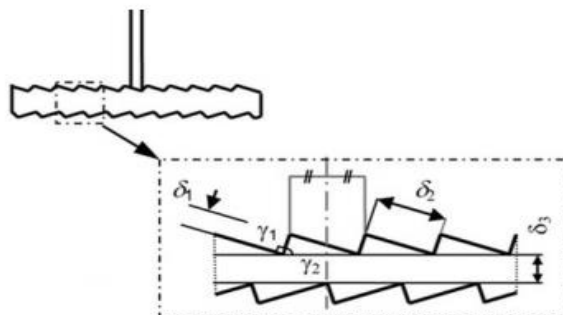


Obr. 3: Základní typy vysoko-smykových míchadel

Na obrázku jsou uvedeny tři typy míchadel: a) „tyčové“ míchadlo, b) je tzv. „Chemshear“ míchadlo a c) je poté zubové míchadlo (Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004).

3.1.2 Zubové míchadlo

Zubová míchadla také spadají do kategorie „high-shear“ míchadel. Jedná se o rotující disk na koncích opatřený „zuby“, které zlepšují čerpací účinek. Vlivem vysokých otáček dochází v okolí zubového míchadla ke vzniku vysokého smykového napětí, které má za následek dispergaci částic v matrici. Disperze poté vytéká v radiálním směru vlivem odstředivé síly.



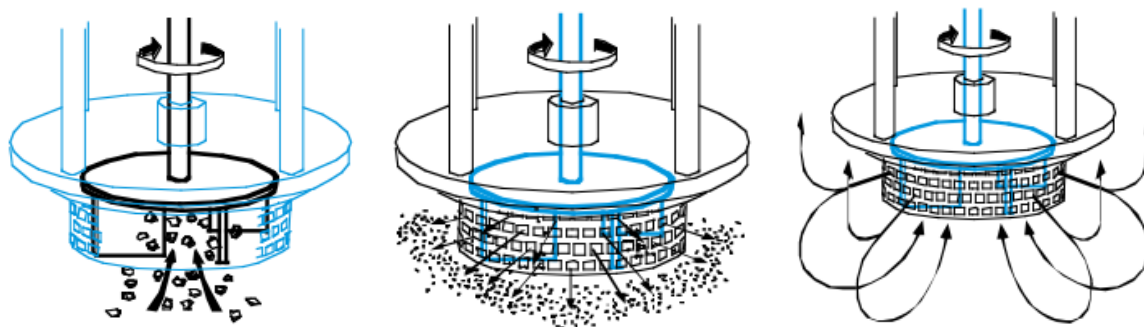
Obr. 4: Zubové míchadlo ekatomizér

(Xie, L. et al., 2007)

Pro bližší informace o možnostech použití zubového míchadla pro dispergaci doporučuji práci Ditla et al. (1981). Popisují zde vliv okrajových podmínek na dispergační účinek pro dvě odlišné geometrie zubových míchadel, tři lopátkové míchadlo a pro rotující disk.

3.1.3 Stator-rotor

Zařízení stator-rotor je charakteristické vysokými otáčkami, vysokým smykovým napětím a vysokými příkonovými nároky. Kromě toho je jeho hlavním rysem úzká mezera mezi státorem a rotorem, která se pohybuje od 100 do 3000 μm (Karbstein and Shubert, 1995). Rotor dosahuje obvodových rychlostí 10 až 50 m/s, což vytváří vysokou smykovou rychlost v mezeře v rozsahu od 20 000 do 100 000 s^{-1} (Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004). Množství disipované energie může být až o tři řády výše než v konvenčně míchaných nádobách. Mají široké uplatnění v průmyslu chemickém, biochemickém, potravinářském a kosmetickém. Použit se dají pro suspenze, které mají viskozitu menší než 150 Pa.s (Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004).



Obr. 5: Postup dispergace v míchadle typu stator-rotor

V prvním kroku dochází vlivem vysoké rotace rotoru k nasávání kapaliny a částic do pracovní oblasti, kde začíná dispergace. V dalším kroku dochází vlivem vysokých odstředivých sil k posunu materiálu do mezery mezi stator a rotor, kde je suspenze vystavena vysokým smykovým napětím. V posledním kroku dochází k opuštění suspenze z pracovního prostoru zpět do vsádkového systému a současně s tím je do míchadla nasáván "čerstvý" materiál. Celý objem vsádky takto projde míchadlem mnohokrát, než se systém stane plně dispergovaným. Obrázky převzaty z firemních podkladů firmy Silverson, dostupné z:

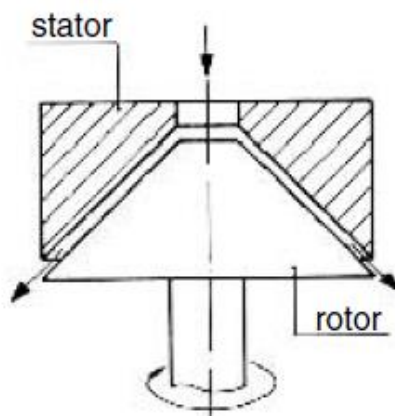
<http://www.silverson.com/images/uploads/documents/CFumedSilica.pdf>

Míchadla typu stator-rotor můžeme dle geometrie rozdělit do tří následujících kategorií.

1. Koloidní mlýny
2. Radiální míchadla
3. Axiální míchadla

3.1.4 Koloidní mlýny

Jak je vidět níže na obrázku 6 a 7, koloidní mlýny se skládají ze statoru s kuželovou dírou a rotoru ve tvaru kužele. Počet otáček za minutu se pohybuje od 3000 do 20000. Rotor a stator mohou mít hladký nebo hrubý povrch případně mohou být opatřeny drážkami. Mezera mezi rotorem a státorem se pohybuje od 0,051 do 0,8 mm. Tato mezera bývá většinou nastavitelná a lze tím ovlivňovat průtok a redukci velikosti částic (IKA WORKS, 2013). Přívod suspenze je malou mezerou mezi státorem a rotorem, kdy vtok je čerpán díky rotaci rotoru a působením odstředivé síly rotoru je dále tlačěn k výstupu. Shluky částic jsou rozbíjeny působením vysokých smykových napětí.



Obr. 6: Schématicky znázorněná geometrie koloidního míchadla „stator-rotor“
(Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004)

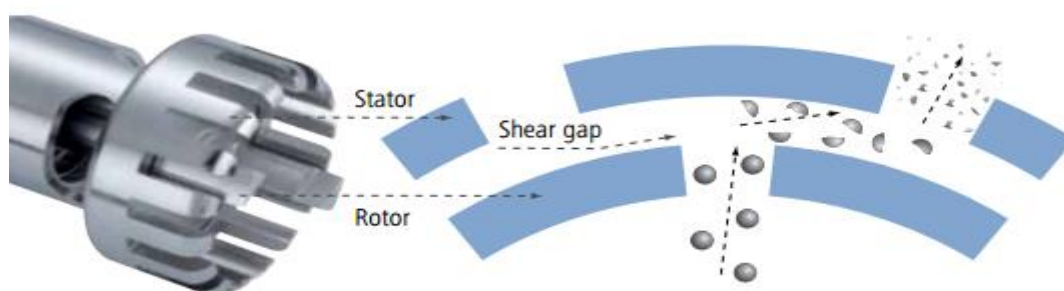


Obr. 7: Konfigurace drážkovaného koloidního mlýnu
(Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004)

3.1.5 Radiální míchadla

Tímto typem stator-rotor míchadel se zabývají především firmy Silverson a IKA s jejich míchadlem Ultra-Turrax (viz obr. 8 a 9).

Rotor funguje jako radiální míchadlo, které se otáčí uvnitř stacionárního statoru s otvory. Vlivem otáčení rotoru a odstředivých sil dochází k nasávání suspenze. Jak je patrné na obrázku 7, k rozbíjení částic dochází v mezeře mezi státorem a rotorem. Poté jsou zbytky částic vystaveny vysokým smykovým silám, když prochází skrz otvory statoru. Tudíž zde dochází k dalšímu rozbíjení částic. Suspenze poté dále proudí od statoru radiálně.



Obr. 8: Ilustrační obrázek postupné dispergace v míchadle Ultra-Turrax

V mezeře mezi státorem a rotorem dochází díky působení vysokých smykových napětí k rozbíjení částic. Toto pokračuje i na výstupu v mezeře statoru. Převzato ze stránek firmy IKA, dostupné na: http://www.ika.com/ika/pdf/flyer-catalog/Dispenser_Brochure_EN_wop_web_screen.pdf



Obr. 9: Detail dispergační hlavice míchadla Ultra-Turrax

Převzato ze stránek firmy IKA, dostupné na: http://www.ika.com/ika/pdf/flyer-catalog/Dispenser_Brochure_EN_wop_web_screen.pdf

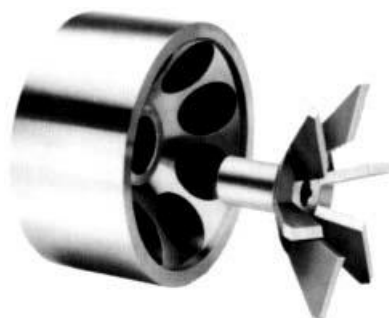


Obr. 10: Provedení statoru radiálního míchadla stator-rotor

Na obrázku je uvedeno několik konstrukčních provedení statoru. Jak je vidět, provedení se liší především ve tvaru a množství otvorů, kterými prochází dispergovaná vsádka. Uvedená řešení jsou z firmy Silverson (Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004).

3.1.6 Axiální míchadla

Firma Chemineer Greerco nabízí odlišnou geometrii míchadel typu stator-rotor a zaměřila se na axiální míchadlo. Používá stator s otvory, přes které je suspenze axiálně nasávána díky axiálnímu míchadlu – rotoru. Firma používá i dvoustupňovou verzi, která se skládá z primárního stupně s většími otvory ve statoru a ze sekundárního stupně s menšími otvory. Jedna z hlavních charakteristik jejich provedení je ta, že je zde možnost měnit šířku mezery mezi rotorem a státorem, a to pomocí podložek nebo pouzder (Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004).



Obr. 11: Stator-rotor firmy Chemineer Greerco – jedno-patrové provedení
(Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004)



Obr. 12: Stator-rotor firmy Chemineer Greerco – dvou-patrové provedení
(Atiemo-Obeng and Calabrese, 2004)

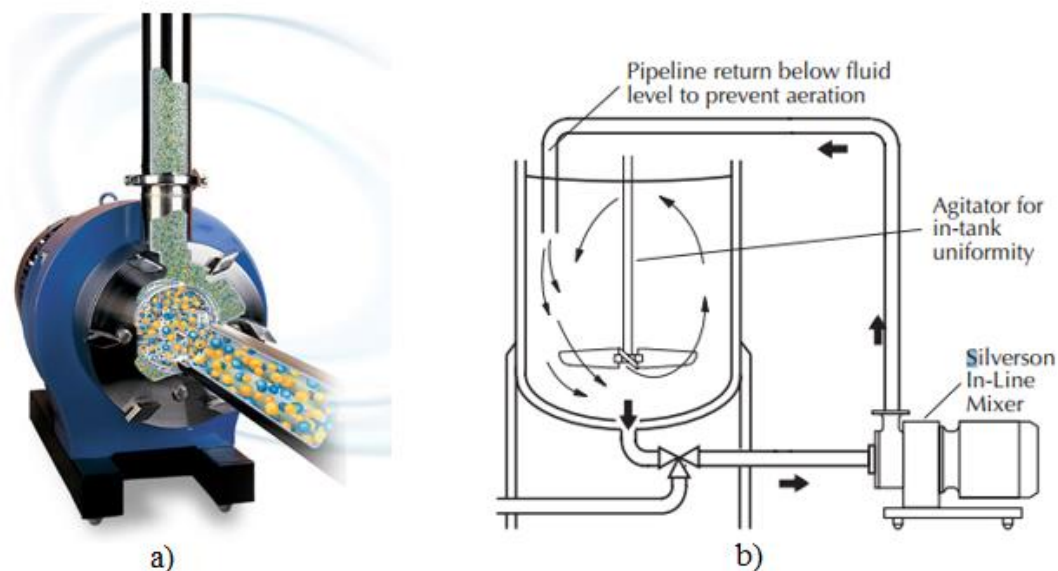
Míchadla typu stator-rotor jsou koncipována jak pro vsádkové, tak i pro průtočné uspořádání provozu. Pro vsádkový, případně polo-kontinuální provoz se používá míchadlo na dlouhé hřídeli s podpůrnými tyčemi (viz obr. 13). Míchadla mají v porovnání s nádobou poměrně malý průměr, což má za následek nedostatečnou cirkulaci vsádky zvláště u nádob větších než 40 litrů. Řešením je

použití přídatných míchadel pro zajištění dostatečné cirkulace vsádky. Kontinuální uspořádání se podobá statickému směšovači. Stator a rotor je umístěn v pouzdře s odděleným vstupem a výstupem, kdy vstup je většinou situován přímo do středu rotoru.



Obr. 13: Vsádkový dispergátor stator-rotor firmy Silverson

Převzato z firemních stránek společnosti Silverson. Dostupné z: <http://www.silverson.com/us/products/batch-mixers/mixer-options>)



Obr. 14: Průtočný dispergátor firmy Silverson

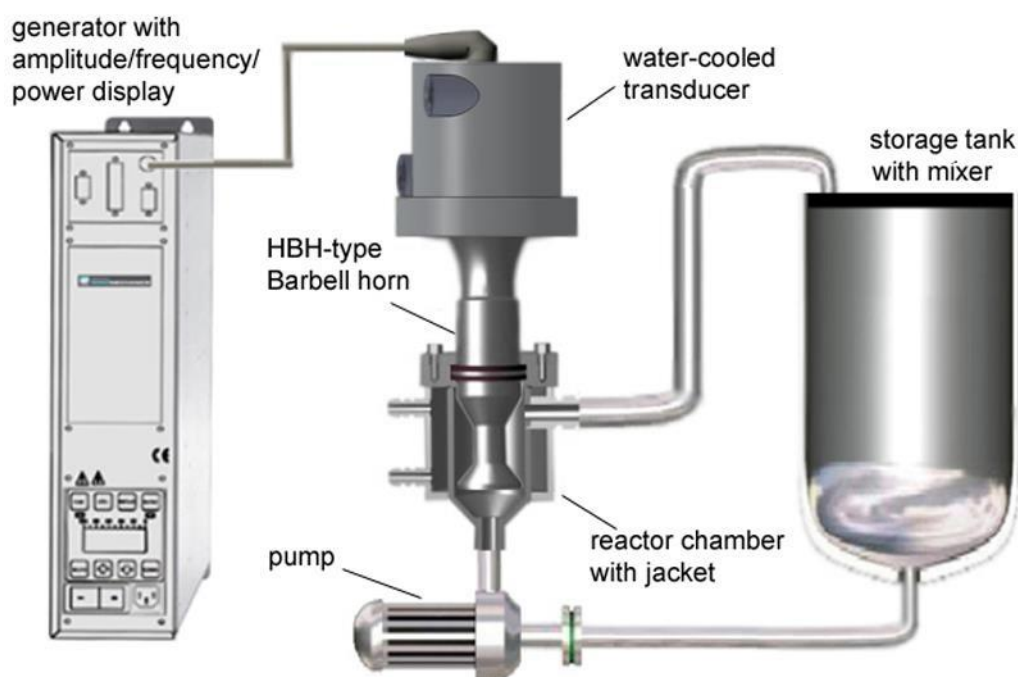
Na obrázku a) je vidět vnitřní uspořádání a tok dispergované suspenze průtočným míchadlem typu stator-rotor firmy Silverson. Převzato z firemních stránek. Dostupné z: <http://www.silverson.com/us/products/in-line-mixers/>

Obrázek b) poté schématicky zobrazuje průtočný proces dispergace za použití dispergátoru firmy Silverson. Převzato z firemních stránek. Dostupné z: http://www.silverson.com/images/uploads/documents/CCoding_MarkingInks.pdf)

3.1.7 Ultrazvuk

Metoda dispergace využívající technologii ultrazvuku je *defacto* jedinou metodou, která je schopna dispergovat částice spadající do řádu nanočástic – jednotky až stovky nanometrů. Shluky částic jsou drženy pohromadě přitažlivými silami různých fyzikálních a chemických povah, které je nutno překonat pro dobrou homogenizaci částic v disperzním prostředí.

Vysoce intenzivní ultrazvuk se používá pro zpracování kapaliny především pro emulzifikaci, dispergaci a deaglomeraci. Vyvolává cyklickou změnu tlaku – vysokotlakou (komprese) a poté nízkotlakou, která se šíří kapalným médiem. Během působení nízkého tlaku dochází k vytváření malých vakuových bublin a v případě dosažení takového objemu, při kterém již nemohou bubliny absorbovat další energie, dojde během komprese k jejich zhroucení. Tomuto jevu se též říká „kavitace“ což znamená tvorba, růst a zhroucení bubliny v kapalině. Při zborcení bublinek v kapalině dojde ke vzniku oblastí tlakových diferencí, jenž mají za následek vytváření vírů a turbulencí. Takovýto kavitací kolaps vytváří intenzivní lokální zdroj tepla (až 5000 K), vysoké tlaky v řádech megapascalů a lokální turbulenci (Hielscher 2005).



Obr. 15: Schéma zařízení využívající ultrazvukové dispergace

Schéma sestává z míchaného zásobního tanku, čerpadla a ultrazvukové sondy s generátorem. Suspenze je čerpána z tanku a axiálně protéká v okolí sondy (Jafari and Bhandari, 2007).

3.1.8 Dispergace pigmentů

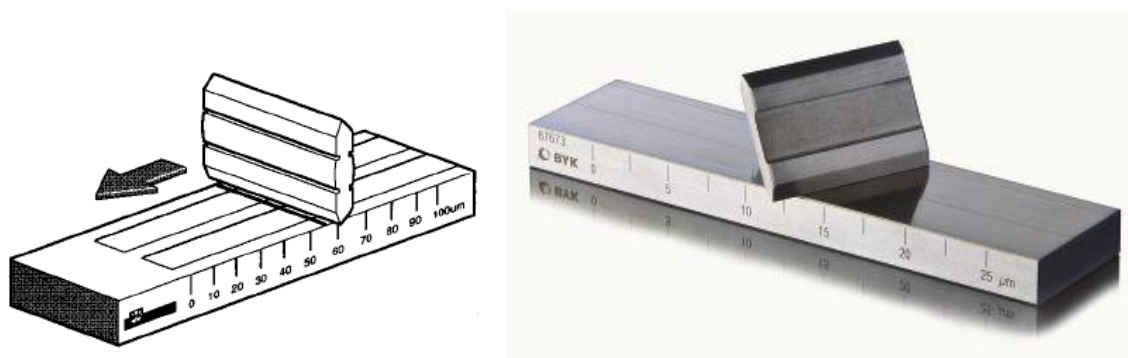
Nejdůležitější částí při výrobě nátěrových hmot je dispergace pigmentu a příprava stabilního a reprodukovatelného produktu. Tato část probíhá většinou ve dvou fázích. V první fázi se připraví koncentrovaná disperze o vyšší koncentraci pigmentu v pojivu (nebo jiné matici), tzv. „master

batch“. V druhé části dochází k finální úpravě správné koncentrace a přidání aditiv, rozpouštědel (pro úpravu viskozity) případně dalších ingrediencí (Lambourne a Strivens, 1999).

Z výše uvedeného vyplývá, že je důležité správně určit dobu dispergace pro zajištění homogenní suspenze o požadovaných vlastnostech. Momentální stav je takový, že doba dispergace se volí na základě zkušeností a pro kontrolu se používá měření velikosti částic pomocí tzv. grindometru. Toto stanovení je uvedeno v normě ČSN EN ISO 1524 - 67 3017: Nátěrové hmoty a tiskové barvy – Stanovení jemnosti tření. Jak uvádí norma, používají se grindometry o třech velikostech – 100, 50 a 25 μm . Přičemž ke všeobecnému použití se doporučuje grindometr s rozsahem 100 μm . Menší velikosti již mohou poskytovat spolehlivé výsledky jen v případě použití kvalifikovaných pracovníků. A jak uvádí Lambourne a Strivens (1999), kvalitu vyhodnocení ovlivňuje též osvětlení, opotřebení a nevhodná manipulace. Jak však udává, jedná se v průmyslu o běžně používanou metodu, jak posoudit stupeň dispergace pigmentu v matrici. Není to však ničím jiným, než pouze kontrolním testem. Neměří distribuci částic samotnou, nýbrž pouze největší nedispergované shluky částic.

Grindometry jsou tvořeny z bloku z nástrojové oceli a ze stěrky. V bloku jsou vytvořeny drážky s rovnoměrně se zvyšující hloubkou. Na jednom konci je hloubka nulová a na druhém konci je určitá hloubka v μm (100, 50, 25). Stěrka je tvořena ocelovou čepelí s jedním nebo dvěma ostřími (ČSN EN ISO 1524 – 67 3017, 2013).

Stručný postup je dle ČSN EN ISO 1524 – 67 3014 (2013) následující. Do hlubšího konce žlábků se nalije malé množství vzorku tak, aby jen nepatrně přetékal ze žlábků. Poté se použije stěrka a kolmo k povrchu se provede stěr jedním tahem od hlubšího konce žlábků v rozmezí 1 – 2 sekund. Okamžitě poté se musí provést vizuální vyhodnocení pohledem z boku na grindometr pod úhlem mezi 20 – 30° od povrchu grindometru. Určí se místo, kde se poprvé objevuje převážně tečkovaný vzhled – počet částic v rozmezí od 5 do 10 v pásu o šířce 3 mm. Ze stupnice se poté odečte číselná hodnota, která je brána jako velikost dispergovaných částic.



Obr. 16: Grindometr

Vlevo je vidět dvoudrážkový grindometr s maximální hloubkou žlábků 100 μm . Vpravo je poté zobrazena fotografie skutečného provedení grindometru firmy BYK Gardner s maximální hloubkou žlábků 25 μm . Převzato z: BYK Gardner, 2015. Dostupné z: http://www.byk.com/fileadmin/byk/support/instruments/technical_information/datasheets/English/Physical%20Test/Dispersion/Dispersion_Technologies.pdf

3.2 Nátěrové systémy

Použití barev a nátěrových systémů může mít dvojí důvod, a to jednak estetický tak i funkční, popřípadě kombinace obou těchto důvodů. Jako příklad lze uvést barvu motorového vozidla, kdy se očekává zlepšení vzhledu vozidla – barva a lesk. Zároveň však musí poskytnout ochranu proti korozi a nepříznivým vlivům počasí. Při posuzování povahy barvy je zřejmé, že platí důležitý vztah mezi nátěrem a chráněným povrchem. Tím je myšleno, že jsou naprosto odlišné požadavky pro nátěrové hmoty podle chráněného povrchu. Pro dřevo požadujeme jiné vlastnosti nátěru než například pro kov. Existuje velmi mnoho požadavků na nátěrové hmoty. Např. barva, lesk, hladkost, přilnavost k povrchu, specifické fyzikální a mechanické vlastnosti, ochrana proti korozi, chemická odolnost a v neposlední řadě též životnost. Z tohoto jasně vyplývá, že neexistuje jediný nátěrový systém, který by pokryl většinou požadavků (Lambourne a Strivens, 1999).

Pro představu nekryté železo nebo dřevo jsou často poměrně náchylné na degradaci. Použitím nátěrů můžeme razantně zvýšit životnost takovýchto objektů.

Dle Krause (2000) je nejběžnější a nejekonomičtější v průmyslových oborech použití organických nátěrových hmot. Tvoří asi 80 – 90 % všech použitých povlaků. Nátěrem se rozumí souvislá vrstva o požadovaných vlastnostech vzniklá nanesením a zaschnutím v jedné nebo více vrstvách. Podle tohoto lze také nátěry rozlišovat na jednovrstvé a vícevrstvé.

Podle Zoubka (2013) jsou organické nátěrové hmoty ideální pro vytvoření nanokompozitních nátěrových systémů, kde jsou použity nanočástice jako plnidla. Toto má za následek výrazné změny funkčních a mechanických vlastností.

3.2.1 Složení

Složení nátěrových hmot může být velmi pestré a různorodé. Přesné složení si navíc výrobci drží v tajnosti. Níže v tabulce 2 jsou uvedeny hlavní skupiny složek nátěrových hmot.

Tab. 2: Složky nátěrových hmot a jejich stručná charakteristika

(Lambourne a Strivens, 1999)

Složka barvy	Charakteristická vlastnost
Filmotvorné složky	Určují většinu hlavních vlastností nátěru jakými jsou např. mechanické vlastnosti, odolnost vůči prostředí a životnost
Pigmenty	Pigmenty určují stupeň krytí, barvu a další vizuální efekty. Mohou však mít i antikorozi vlastnosti
Ředidla a rozpouštědla	Slouží pro usnadnění nanášení nátěru. Sníží viskozitu a dochází k rozpouštění filmotvorných složek. Jejich přítomnost je však po zaschnutí nátěru nežádoucí
Aditiva (přísady)	Mají velmi široký rozsah působnosti. Používají se např. pro rychlejší dispergaci pigmentů, zabránění pěnění, atd.

3.2.2 Filtrovací složky

Filtrovací látky vytvářejí souvislý film rozdílné tloušťky po zaschnutí. Tyto látky většinou určují hlavní vlastnosti zaskleného nátěru jako je adheze, různé optické a mechanické vlastnosti jako je odolnost okolním vlivům. Další složky nátěru - pigmenty, jsou fixovány ve filtrovací matrici. Jedná se o netěkavé organické látky. Níže v tabulce jsou uvedeny příklady takovýchto filtrovacích složek, kde jsou rozděleny podle molekulové hmotnosti (Lambourne a Strivens, 1999).

Tab. 3: Typy filtrovacích složek
(Lambourne a Strivens, 1999)

Nízká molekulová hmotnost	Vysoká molekulová hmotnost
alkydy	nitrocelulóza
Polyuretany	vinyl
uretanové oleje	akryl
amino pryskyřice	Bezvodé disperze polymerů (Nads)
fenolové pryskyřice	Polyvinylacetát (PVA)
epoxidové pryskyřice	akryl
nenasycené polyestery	butadienstyren
chlorkaučuk	

3.2.3 Pigmenty

Vhodný výběr pigmentů ovlivňuje nejenom barvu, ale zásadně též ovlivňuje vlastnosti jako odolnost vůči korozi nebo stupeň krytí povrchu. Dávají nátěru zabarvení, neprůhlednost a mohou být organické nebo anorganické povahy. Dle Krause (2000) můžeme pigmenty dělit do tří skupin podle jejich ochrany vůči korozi:

- inhibiční pigmenty (zinková žluť, zinkový prach, olovičitan divápenatý, suboxid olova)
- neutrální pigmenty (titanová běloba, oxid železitý, hliníkový bronz, slída)
- stimulující pigmenty (grafit, saze, některé oxidy železa)

Inhibiční pigmenty korozi zpomalují. Neutrální nemají vliv na korozi a stimulující pigmenty korozi zrychlují (Kraus, 2000). Nejpoužívanějším pigmentem současnosti jsou bezpochyby oxidy titanu (tzv. titanová běloba). Mají velmi široký rozsah excelentních vlastností a nízkou cenu. Barva pigmentu je bílá (Lambourne a Strivens, 1999).

3.2.4 Ředidla a rozpouštědla

Jelikož jsou nátěrové systémy vysoce viskózní, používají se pro snazší manipulaci ředidla a rozpouštědla. Filtrovací látky jsou v nich rozpuštěny a upravují viskozitu, čímž umožňují její nanášení na chráněný povrch. Je však nežádoucí, aby rozpouštědla dále setrvala v nátěru po jeho zaschnutí, jelikož snižují odolnost nátěru. Druh rozpouštědla se volí podle použitých filtrovacích

složek a jejich rozpustnosti. Nejčastěji se používají toluen, benzen, etylalkohol, aceton a další. Ředidla jsou rozpouštědla, která se používají pro potřebnou do-úpravu konzistence nátěrových hmot pro určitou technologii nanášení (Kraus, 2000).

Hlavní účel rozpouštědel v nátěrových systémech je dvojitý. Jednak aby vůbec mohly být barvy vyrobeny a pak aby mohly být nanášeny na chráněný povrch.

3.2.5 Aditiva

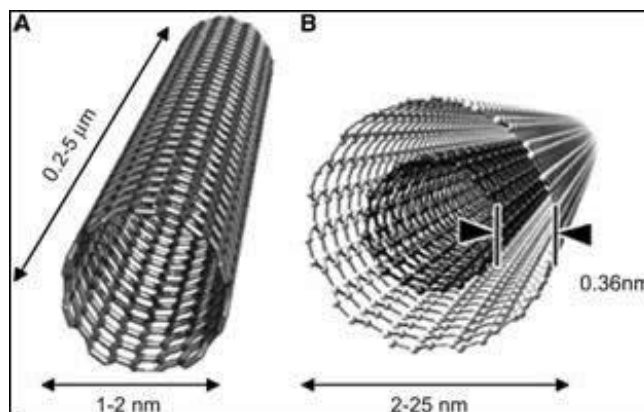
Aditiva mají především sekundární funkci. Slouží k tomu, aby vhodně upravovala technologické a fyzikální vlastnosti tří základních složek barviv: pigmentů, filmotvorných složek a rozpouštědel. Pro představu mohou například usnadňovat dispergaci pigmentů, omezit tvorbu pěny a další (Lambourne a Strivens, 1999).

3.2.6 Nanomateriály

Použití nanomateriálu je poměrně lukrativní a perspektivní. Takovéto nanomateriály se využívají v povrchových úpravách ve formě nanotrubic, nanočástic a nanotyčí. Využívají se i takové nanomateriály, které poskytují antibakteriální a antivirové účinky (Zoubek, 2013).

Některé pigmenty, které se používají v nátěrových systémech, spadají až do oblasti nanomateriálu. Nanomateriály jsou takové částice, kdy alespoň jeden ze tří rozměrů je v rozmezí od 1 do 100 nm (nanotrubičky, nanovláčka, tenké vrstvy) (Nováková et al., 2009). Mezi takové spadají například uhlíkové nanotuby CNT (Carbon NanoTube). O něco větší jsou ještě saze s rozměrem od 100 – 800 nm. Pro představu, organické pigmenty dosahují velikosti částic od 0,01 do 1 μm a anorganické pigmenty od 0,1 do 5 μm . Nejpoužívanější oxid titaničitý má velikost okolo 0,25 μm (Lambourne a Strivens, 1999).

Uhlíkové nanotuby CNT jsou nanočástice, které vzniknou lineárním stočením grafémového listu do válcové trubice. Podle počtu stěn trubice můžeme tyto nanotuby dělit na jedностěnné SWCNT (Single Wall Carbon NanoTubes), dvojestěnné DWCNT (Dual Wall Carbon NanoTubes) a víceštěnné MWCNT (Multi Wall Carbon NanoTubes). Uhlíkové nanotuby se vyznačují extrémní pevností v tahu, mechanickou poddajností a vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí (Reilly, 2007). Průměr SWCNT se pohybuje mezi 1-2 nm a DWCNT mezi 2 -25 nm. Délka uhlíkových nanotub se pohybuje od 0,2 do 5 μm .



Obr. 17: Zobrazení a) SWCNT, b) DWCNT
(Reilly, 2007)

3.3 Teorie reologie

Definice reologie je dle Bielemana (2000) následující: „Reologie je věda zabývající se chováním toku a deformací v závislosti na působení vnějších sil“. V širším slova smyslu se jedná o zkoumání viskozity v závislosti na širokém rozsahu okrajových podmínek. Viskozita nám říká, jakou odolnost vykazuje kapalina proti deformaci. Malá odolnost proti deformaci (vnějšímu zatížení) vypovídá o nízké viskozitě a naopak vysoká odolnost vůči deformaci vypovídá o vysoké viskozitě (Bielman, 2000).

3.3.1 Obecné reologické rovnice a modely chování

Matematický popis reologického chování v obecných případech proudění je značně složitý. Ovšem v řadě inženýrských případech dochází k tzv. smykovému proudění, kdy je matematický popis reologického chování mnohem jednodušší. Abychom dosáhli smykového proudění, musí být splněny tři podmínky:

1. Musí existovat pouze jediná nenulová složka rychlosti.
2. Souřadnicové plochy se nedeformují a pohybují se jako dokonale tuhé.
3. Nemění se vzdálenost souřadnicových ploch.

Při smykovém proudění má tenzor rychlosti deformace ($\vec{\Delta}$) pouze 2 nenulové složky, které jsou vzájemně symetrické a lze ho tedy charakterizovat jedinou hodnotou smykové rychlosti $\dot{\gamma}$.

$$\Delta_{12} = \Delta_{21} = \frac{1}{2} \dot{\gamma} \quad (10)$$

Lze též prokázat, že matice tenzoru dynamických napětí má při smykovém proudění tři nenulové normálové složky (na diagonále) a dvě nenulová smyková napětí. Což je tedy 5 nenulových složek tenzoru dynamických napětí. Pouze však jen 3 z nich jsou nezávislé.

Tyto nezávislé složky tenzoru napětí jsou funkcemi smykové rychlosti a vyjadřují se následovně:

$$\tau_{12} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (11)$$

$$\tau_{11} - \tau_{22} = \psi_{12}(\dot{\gamma})\dot{\gamma}^2 \quad (12)$$

$$\tau_{22} - \tau_{33} = \psi_{23}(\dot{\gamma})\dot{\gamma}^2, \quad (13)$$

kde η je viskozitní funkce, ψ_{12} a ψ_{23} jsou koeficienty první nebo druhé diference normálových napětí.

Viskozitní funkce η je funkcí smykové rychlosti $\eta(\dot{\gamma})$ nebo též funkcí tří invariantů $\eta(I, \bar{II}, III)$. Podstatné však je, že první invariant je rovný nule a třetí invariant se z důvodu obtížné měřitelnosti a malého vlivu zanedbává.

$$I = \text{tr} \vec{\Delta} = \Delta_{ii} = 0 \quad (14)$$

$$\bar{II} = \vec{\Delta} : \vec{\Delta} = \Delta_{ij}\Delta_{ji} \quad (15)$$

$$III = \det \left[\vec{\Delta} \right] = \varepsilon_{ijk}\Delta_{1i}\Delta_{2j}\Delta_{3k} \cong 0 \quad (16)$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta(\bar{II}) \quad (17)$$

$$\bar{II} = \Delta_{12}\Delta_{21} + \Delta_{21}\Delta_{12} = 2\Delta_{12}^2 = \frac{1}{2}\dot{\gamma}^2 \rightarrow \dot{\gamma} = \sqrt{2\bar{II}} \quad (18)$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta(\sqrt{2\bar{II}}) \quad (19)$$

Z rovnice 10 a rovnice 11 a převedením smykového napětí na tenzor dynamických napětí dostaneme tzv. **konstitutivní rovnici pro nestlačitelné kapaliny**:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta(\sqrt{2\bar{II}}) \quad (20)$$

$$\vec{\tau} = 2\eta\vec{\Delta} \quad (21)$$

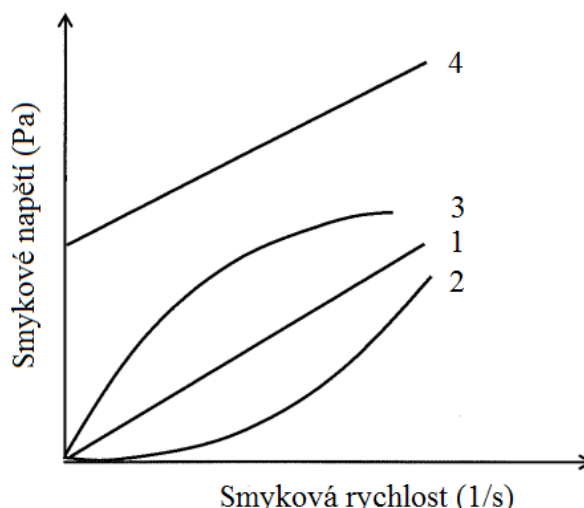
3.3.2 Konstitutivní rovnice a reologické modely chování

Pro newtonské nestlačitelné kapaliny můžeme psát konstitutivní rovnici ve tvaru:

$$\vec{\tau} = 2\mu\vec{\Delta}, \quad (22)$$

kde μ je tzv. dynamická viskozita a je funkcí teploty.

Pro nenewtonské látky platí konstitutivní rovnice odvozená v kapitole 3.3.1. Symbol η je takzvaná zdánlivá viskozita a je popsána viskozitní funkcí v závislosti na tom, jaké reologické chování vykazuje nenewtonovská kapalina – viz obrázek 18.



Obr. 18: Reogram pro kladný gradient rychlosti

Na obrázku je patrné chování 4 rozdílných modelů tekutiny: 1. Newtonská kapalina, 2. dilatantní kapalina, 3. pseudoplastická kapalina, 4. viskoplastická kapalina (binghamská) (Vieira and Peres, 2012).

Nutno podotknout, že model 4 se označuje též jako viskoplastický a model 1 až 3 označuje čistě viskózní látky.

Pro smykové proudění lze ze závislosti smykového napětí na rychlosti smykové deformace (pro kladný gradient rychlosti) - tzv. reogram (viz obr. 18) rozlišit 4 základní modely chování tekutin. Přičemž jsou dvě základní skupiny – látky viskoplastické (model 4) a látky čistě viskózní (model 1-3). Pro čistě viskózní látky se používá tzv. mocninný model viskozitní funkce (viz rovnice 23). Zatímco pro viskoplastické chování kapaliny se používá tzv. binghamský model viskozitní funkce (viz rovnice 24).

Mocninný model viskozitní funkce:

$$\eta = K \left| \sqrt{2\dot{\gamma}} \right|^{n-1} = K |\dot{\gamma}|^{n-1}, \quad (23)$$

kde K je koeficient konzistence a n je index toku.

Index toku n v této rovnici rozhoduje o tom, zdali je kapalina dilatantní, newtonská nebo pseudoplastická. Pokud je $n = 1$ jedná se o látku newtonskou, pokud $n < 1$ jedná se pseudoplastickou látku a pokud je $n > 1$ tak mluvíme o látce dilatantní.

Binghamský model viskozitní funkce:

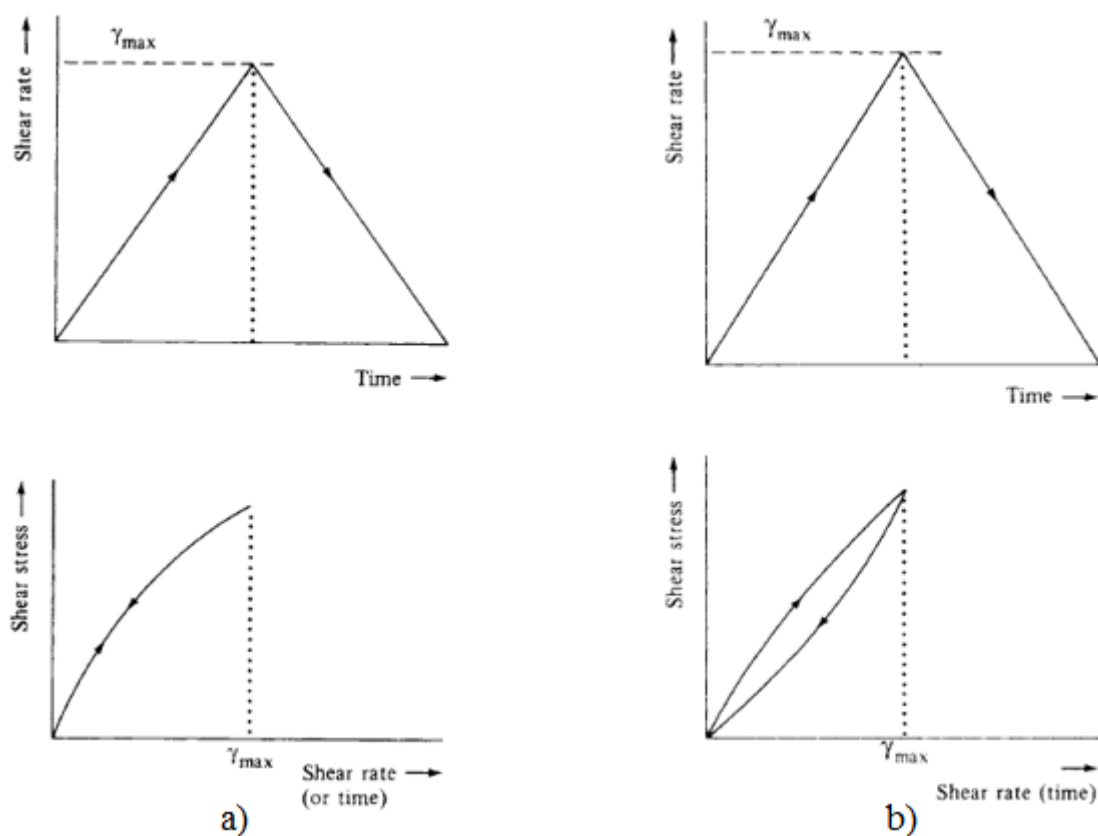
$$\eta \rightarrow \infty \text{ pro } \tau_{12} < \tau_0 \quad (24)$$

$$\eta = \mu_p + \frac{\tau_0}{|\dot{\gamma}|} \text{ pro } \tau_{12} > \tau_0 \quad (25)$$

Většina barev a nátěrových hmot vykazuje pseudoplastické chování (index toku $n < 1$) a platí pro ně tedy viskozitní mocninná funkce (rovnice 23).

3.3.3 Pseudoplastické chování

Jedná se o neneutonské chování, které spadá mezi mocninné modely chování. Toto chování vykazují prakticky všechny barvy a nátěrové systémy. Jedná se o to, že s rostoucí smykovou rychlostí dochází k poklesu viskozity. Tento typ chování je způsoben změnou uspořádání částic nátěrových komponent pod vlivem smykové síly (Bielman, 2000). Částice zaujmou energeticky nižší rozmístění, aby kladly co nejmenší odpor v tekutině. Tím dojde k menšímu tření a snížení viskozity.



Obr. 19: Pseudoplastické chování

Na obrázku je pro porovnání vidět čistě pseudoplastické chování – a), zatímco na obrázku b) je vidět pseudoplastické chování s tixotropickými vlastnostmi (Lambourne a Strivens, 1999).

3.3.4 Tixotropie

Nicméně viskozita může vykazovat též časově závislé chování známé jako tixotropie. Při působení smykového napětí dochází k poklesu viskozity po určité době působení. A naopak, jestliže systém odlehčíme a bude bez vnějšího zatížení, dojde k nárůstu viskozity. Tento efekt může být přínosem, a to zejména v průmyslu barev. Při natírání barvy vkládáme energii do systému a dochází k poklesu viskozity a rovnoměrnějšímu nanášení. Poté, když se nechá v klidu, tak dojde k nárůstu viskozity, až barva ztuhne (Kvítek et al., 2007).

Tixotropické chování tekutin je takové chování, které je časově závislé. Tím je myšleno to, že při konstantní smykové rychlosti, teplotě a tlaku nedostaneme konstantní viskozitu, ale naopak můžeme pozorovat, že viskozita s časem klesá. Ovšem pokud bude tekutina v klidu bez smykového namáhání, dojde opět k růstu viskozity na původní úroveň (Bielman, 2000).

4. Rozbor souvisejících experimentálních prací

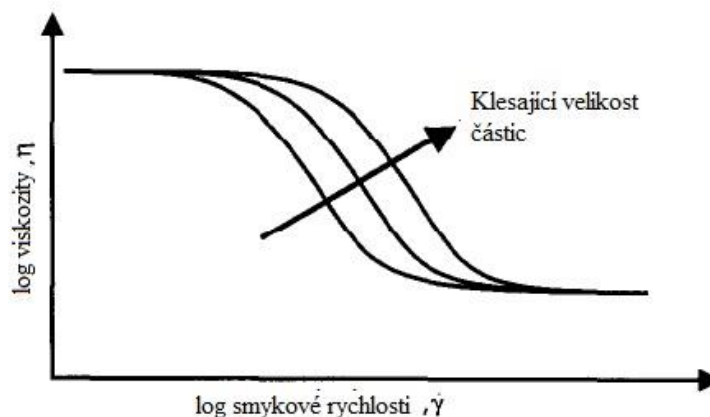
4.1 Vliv velikosti částic na viskozitu

Vliv na viskozitu suspenze má mnoho faktorů. Kromě fyzikálních vlastností tekutiny samotné jsou to především objemová koncentrace, tvar a v neposlední řadě také velikost částic. Dispergací bude docházet k rozbíjení shluků částic na menší rozměry, což bude mít za následek nárůst počtu těchto částic menšího rozměru v disperzi. S tímto dochází i k nárůstu interakcí mezi částicemi. Předpoklad, ze kterého vychází tato práce, je ten, že s klesajícím rozměrem částic v suspenzi dochází k nárůstu viskozity a naopak, s rostoucí velikostí částic dochází ke snížení viskozity. Tento efekt není však tak výrazný při vyšších smykových rychlostech, jelikož tyto interakce jsou relativně slabé a snadno se překonají vyšší smykovou rychlostí.

Níže je uvedeno několik autorů a závěrů jejich prací, ve kterých se zabývali vlivem velikosti částic na viskozitu. Bohužel se doposud žádný z autorů nezabýval přímo problematikou, která bude stěžejní pro tuto diplomovou práci. Nicméně předpoklad je takový, že dané závěry jsou aplikovatelné i na náš případ.

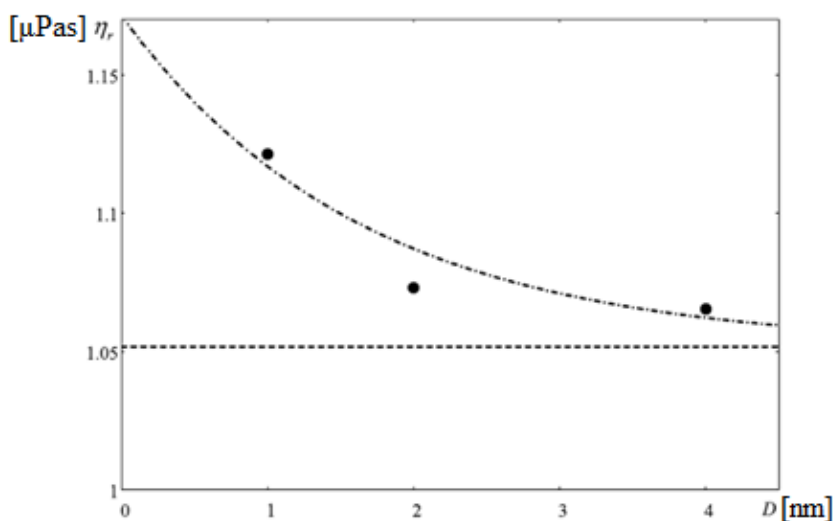
Disperze je dvoufázový systém stávající se z média (kapalina nebo plyn) a pevných částic. Typická média jsou voda, organické tekutiny (olej, ethylenglycol). Dispergované částice jsou většinou z chemicky stabilních kovů a jejich oxidů. Mechanismus transportu větších nanočástic – řádově 10 až 100 nm – by se měl řídit Brownovým pohybem. Závislost viskozity na koncentraci dispergovaných částic a teplotě byla zkoumána ve značném množství prací – jak teoreticky, tak i experimentálně. Ovšem korelace mezi viskozitou a velikostí částic byla zkoumána jen ve velmi malém množství prací. Důvodem je zejména obtížné stanovení distribuce částic pro velmi malé rozměry. Ne každé pracoviště má dostatečné technologické zázemí. Rudyak (2013) po prostudování a porovnání řady článků vyslovil předpoklad, že existuje silná pravděpodobnost závislosti zdánlivé viskozity na velikosti a materiálu částic.

Dle Barnse (1994) má velikost částic velký vliv na reologii. Se snižující se velikostí částic roste viskozita disperze (viz obr. 20). Barnes (1994) tvrdí, že tento efekt je nejvíce patrný především v koloidních suspenzích – takových, kde jsou částice menší jak 1 μm . Dále Barnes et al. (1989) uvádí, že pro rozměry částic menší než 1 μm roste počet interakcí mezi částicemi vlivem Brownova pohybu částic.



Obr. 20: Graf závislosti velikosti částic, viskozity a smykové rychlosti
(Barns, 1994)

Rudyak (2014) se zaměřil na vliv velikosti nanočástic na viskozitu. Pracoval s litiovými nanočásticemi v argonu. Velikost částic byla od 1 do 4 nm, objemové koncentraci 2 % a při teplotě 300 K. Jak je vidět na následujícím grafu, velikost částic zde měla jednoznačně vliv na viskozitu suspenze (viz obr. 21).

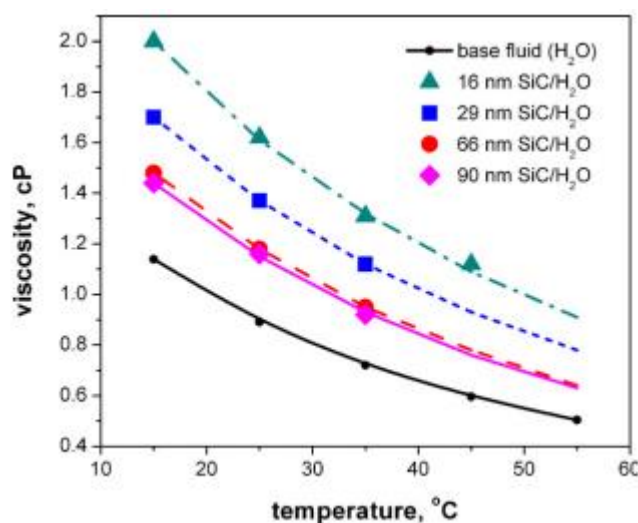


Obr. 21: Závislost viskozity na velikosti částic
(Rudyak, 1994)

Efekt velikosti částic na viskozitu popisují též Konijn et al. (2014), kteří testovali částice o velikosti 15 – 40 μm v glycerinu při teplotách 23 $^{\circ}\text{C}$ a 75,7 $^{\circ}\text{C}$. Jejich experimenty poukázaly na to, že na viskozitu suspenze má vliv mimo jiné i velikost částic.

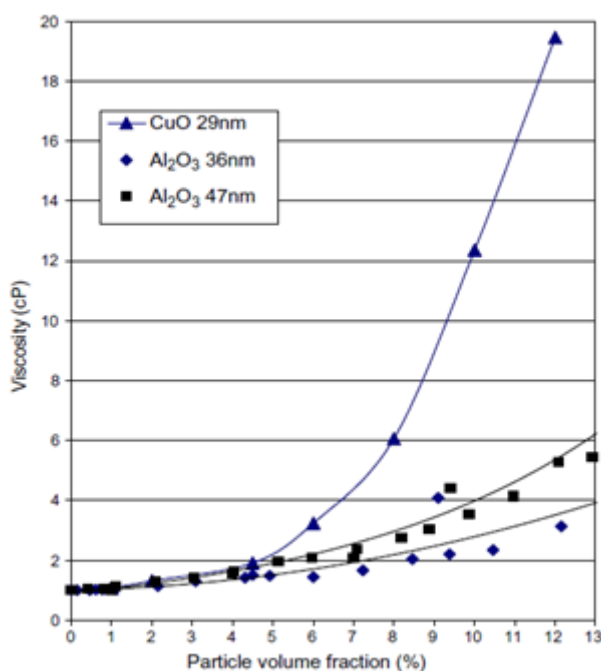
Timofeeva et al. (2010) zkoumali závislost viskozity disperze s částicemi karbidu křemíku (SiC) a maticí na vodní bázi. Porovnávali zde disperze se 4 velikostmi: 16, 29, 66 a 90 nm. Nejvyšší viskozitu naměřili u částic s nejmenším rozměrem a naopak nejnižší viskozita byla změřena pro částice o největší velikosti. Použili 4,1% obj. koncentraci nanočástic. Níže v grafu je patrný jednoznačný vliv rozměru částic na viskozitu (viz obr. 22). Prokázali, že pro rozměr částic 90 nm

byla naměřená viskozita o cca 30 % vyšší než viskozita základní matrice a pro rozměr částic 16 nm byla viskozita dokonce o 85 % vyšší než viskozita základní matrice.



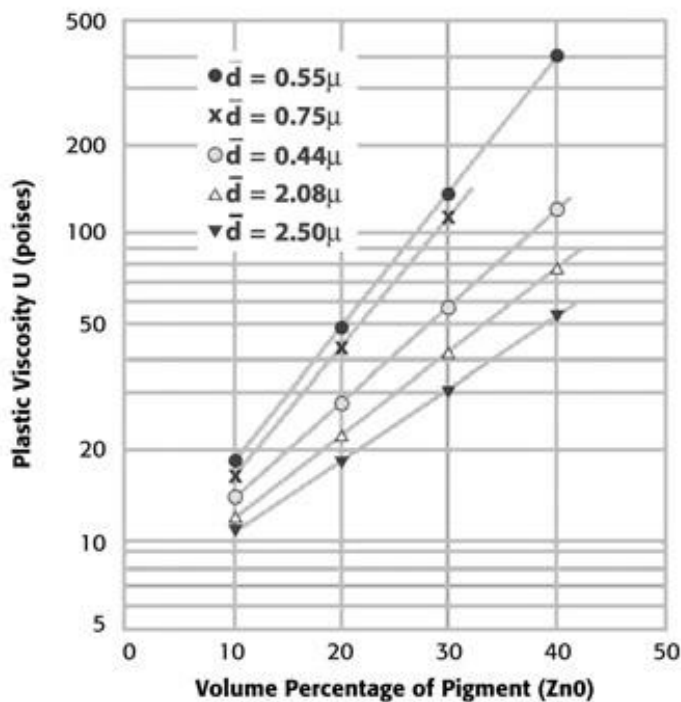
Obr. 22: Závislost viskozity na teplotě pro dané velikosti částic křemíku
(Timofeeva et al., 2010)

Nguyen et al. (2007) vyšetřovali vliv teploty a velikosti částic na viskozitu. Použili zde částice Al₂O₃ o velikosti 36 a 47 nm a poté částice CuO o velikosti 29 nm. Matricí zde však byla voda. Tudíž takováto disperze měla odlišné fyzikální vlastnosti (newtonská látka o nízké viskozitě) než použitá disperze v mém experimentu. I v tomto případě však jednoznačně prokázali vliv velikosti částic na viskozitu (viz obr. 23). Předpokládám, že podobný efekt bude patrný i v odlišné matrici, což prokázali výše uvedené články.



Obr. 23: Závislost velikosti částic, objemové koncentrace a viskozity
(Nguyen et al., 2007)

Další z autorů, který zkoumal efekt velikosti částic na viskozitu, byl Weltmann et al. (1943). Jako základní matici použil olej z lněných semínek. K měření používal rotační viskozimetr. Rychlost smykové deformace byla 150 s^{-1} . Jako pigment byl použit oxid zinečnatý o velikostech: 0,55; 0,75; 1,44; 2,08; 2,50 μm . Směs byla tixotropická, plastická, newtonská. I Weltmann již v roce 1943 prokázal vliv velikosti částic na nárůst zdánlivé viskozity. Nevýhodou ovšem je, že používal vysoké objemové koncentrace pigmentů – od 10 % obj. do 40 % obj.



Obr. 24: Závislost velikosti částic, objemové koncentrace a viskozity
(Weltmann et al., 1943)

Z výše uvedených prací je patrné, že je zde prokazatelně měřitelný vliv velikosti částic, počtu částic a materiálu na reologické vlastnosti disperze. Předpokládám, že výsledky daných experimentů budou přenositelné i do oblasti našeho výzkumu. S úrovní dispergací dochází k nárůstu počtu částic o menším rozměru při konstantní hmotnostní koncentraci. Tím roste i povrch částic a začíná převažovat interakce částice-částice (Brownův pohyb) nad gravitačními silami. V závislosti na tom dochází i k vyššímu tření v tekutině a nárůstu viskozity. Zároveň však z výše uvedeného vyplývá, že při vyšších smykových rychlostech začíná být vliv Brownova pohybu na pohyb částic zanedbatelný. Proto s rostoucí smykovou rychlostí dochází ke snižování viskozity.

4.2 Vliv metody dispergace na technologické vlastnosti nátěrové hmoty

V rámci své bakalářské a diplomové práce se Zoubek (2013 a 2015) zabýval hledáním optimální matrice a koncentrace nanočástic v závislosti na technologických vlastnostech nátěru. Jako nejoptimálnější varianta z hlediska ekonomického a funkčního byla zvolena matrice LV EPS 620 s 1% hmotnostním podílem nanočástic MWCNT. S tímto typem funkční nátěrové hmoty dále provedl několik experimentů. Použil tři metody dispergace – zubové míchadlo o průměru 50 mm, míchadlo typu stator-rotor SR-25G a ultrazvukové Bedelin Sonopuls HD 3400 osazený sondou VS 200T s průměrem 25 mm. Po dispergaci hodnotil aplikační a vzhledové vlastnosti, přilnavost, lesklost a dále mimo jiné hodnotil i abrazivní odolnost.

Po 24 hodinách po provedené dispergaci použil stříkací pistoli pro nanesení povlaku. Povlak nanášel na ocelový plech o materiálu 11 375. Velmi zajímavé je porovnání abrazivní odolnosti v závislosti na použité metodě dispergace. K určení abrazivní odolnosti použil zařízení Taber-Abrazer. Princip spočívá v abrazivním účinku otěrových kotoučů a zkoumá se hmotnostní úbytek po určitém počtu cyklů. Tato závislost je zobrazena na níže uvedeném obrázku.

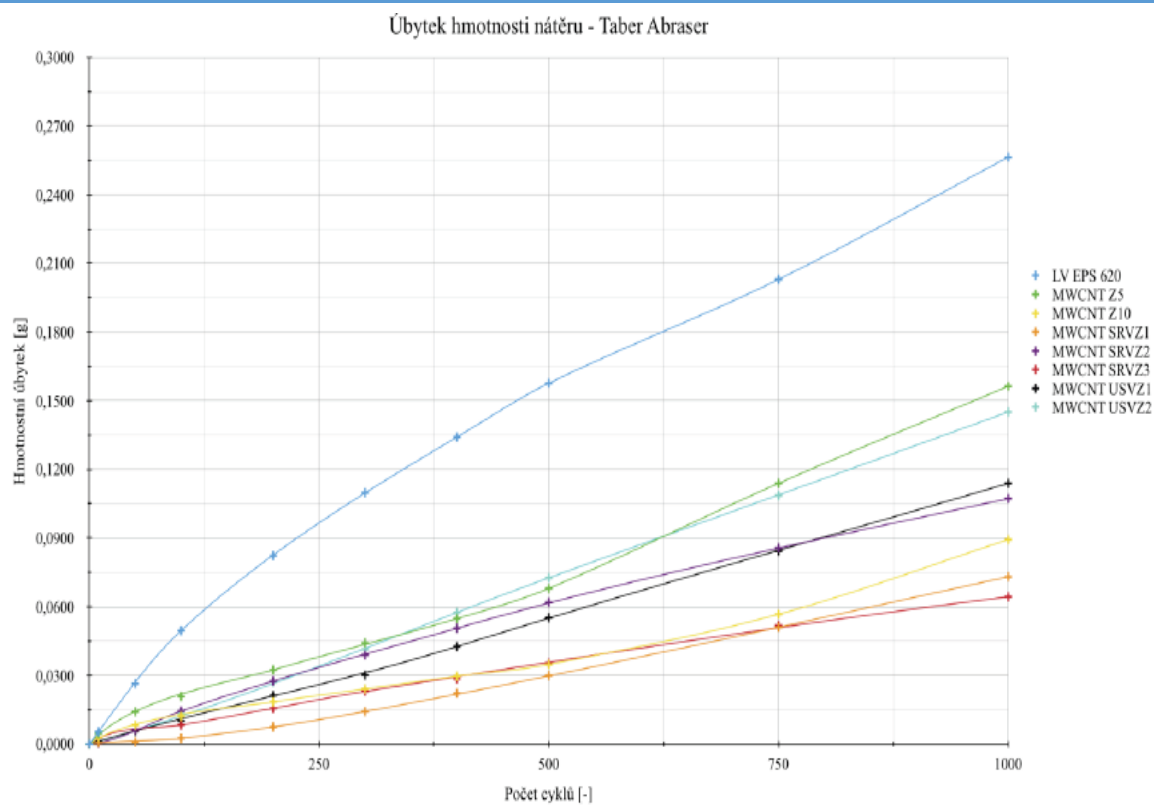
Tab. 4: Označení vzorků pro prováděný experiment

Převzato z: Zoubek, 2015 a Kovařík, 2015

Označení vzorku	Metoda dispergace	Parametry dispergace
MWCNT Z2	zubové míchadlo	t = 2 min
MWCNT Z10	zubové míchadlo	t = 10 min
MWCNT SRVZ1	stator-rotor	n = 10 000 min ⁻¹ , t = 10 min
MWCNT SRVZ2	stator-rotor	n = 10 000 min ⁻¹ , t = 5 min
MWCNT SRVZ3	stator-rotor	n = 7 000 min ⁻¹ , t = 1,5 min
MWCNT USVZ1	ultrazvukový homogenizátor	P = 300 W, t = 5 min
MWCNT USVZ2	ultrazvukový homogenizátor	P = 300 W, t = 1,5 min

Jak je z obrázku patrné, nejvyšší abrazivní odolnost vykazuje vzorek MWCNT SRVZ3. A to téměř 4 násobně vyšší odolnost v porovnání s původní matricí (LV EPS 620) bez přídavku MWCNT nanočástic. Jedná se o vzorek dispergovaný míchadlem typu stator-rotor, jak je patrné v tabulce. V porovnání s ostatními metodami dispergací (zubové míchadlo, ultrazvuk) je zřejmé, že míchadlem stator-rotor bylo dosaženo nejlepších výsledků. Ovšem je zde patrný ještě jeden důležitý faktor. A tím je i čas dispergace. Tudiž na abrazivní odolnost měla vliv nejen použitá metoda dispergace, ale také použité parametry dispergace.

Mým předpokladem, proč Zoubek (2015) dosáhl vyšší abrazivní odolnosti vůči základní matrici a proč se tato odolnost liší v jednotlivých metodách dispergace je v úrovni dispergace. Jak je vidět, nejvyšších hodnot dosahuje míchadlo typu stator-rotor. Při provádění mých experimentů použiji tento předpoklad, kdy nárůst viskozity v závislosti na metodě a době dispergace bude korespondovat s daty abrazivní odolnosti. Tudiž že největší změny viskozity v porovnání s homogenizovaným vzorkem bude u dispergace míchadlem typu stator-rotor.



Obr. 25: Abrazivní odolnost

Závislost hmotnostního úbytku při testování abrazivní odolnosti jednotlivých vzorků dispergovaných různými metodami po různou dobu dispergace (Zoubek, 2015).

5. Experimentální část

V experimentální části byla provedena série měření s cílem zmapovat změnu v reologickém chování v závislosti na metodě a době dispergace. Předpoklad byl takový, že na počátku dispergace budou v suspenzi velké shluky pevných částic, které se budou postupně rozbíjet, a dojde tak ke zmenšování rozměru částic a shluků. Toto způsobí nárůst počtu částic v systému, což by mělo mít za následek nárůst viskozity. V průběhu dispergace byly v určitém časovém horizontu odebrány vzorky a měřeny jejich reologické vlastnosti.

5.1 Testovaný vzorek

Byl testován pouze jeden typ nátěrové hmoty. Konkrétně se jedná o nanokompozitní nátěrový systém na bázi epoxidové pryskyřice, který splňuje jak otěruvzdorné tak i antikorozi vlastnosti. Otěruvzdornost zde zajišťují nanomateriály MWCNT (Multi Wall Carbon Nanotubes) – vícestěnné uhlíkové nanotuby. Takovýto nátěr tedy poskytuje bariérovou ochranu proti korozi a též je schopný odolávat působení abraze a otěru. Matrici systému tvoří epoxidová pryskyřice s označením LV EPS 620 od výrobce Synpo a.s. Do této matrice je zakomponováno 1 % hm. MWCNT (uhlíkových nanotub). Nanotuby jsou do matrice přidány ve formě zkoncentrované suspenze EPOCYL XCR 128-06 na bázi bisfenolu A s 5 % hm. MWCNT. Jako tvrdidlo, bylo použito LV BU 45 N v poměru 1:6. Dle Zoubka (2015) lze tento nátěr aplikovat běžnými metodami. Jako nejoptimálnější však doporučuje vzduchové stříkání.

Svými vlastnostmi zvyšuje takovýto nátěrový systém životnost chráněných částí a dle Zoubka (2015) je vhodné takovýto nátěrový systém aplikovat na zemědělskou a těžkou techniku, pracovní nástroje a části zařízení, které jsou vystaveny abrazivnímu působení. Tudiž použití všude tam, kde může být chráněný povrch vystaven mechanickému opotřebení, korozi a abrazi.

Pro dispergaci byly zvoleny tři metody:

1. Stator-rotor
2. Zubové míchadlo
3. Ultrazvuk

Fyzikální parametry stejného nátěrového systému měřil Kovařík (2015) od něhož jsem převzal následující hodnoty: hustota $\rho = 1391,42$ (kg/m³) měrná tepelná kapacita $c_p = 963,1$ (J/kg.K).

5.2 Použité stroje a zařízení

Níže je uveden popis a specifikace použitých strojů a zařízení využívaných v experimentální části této diplomové práce.

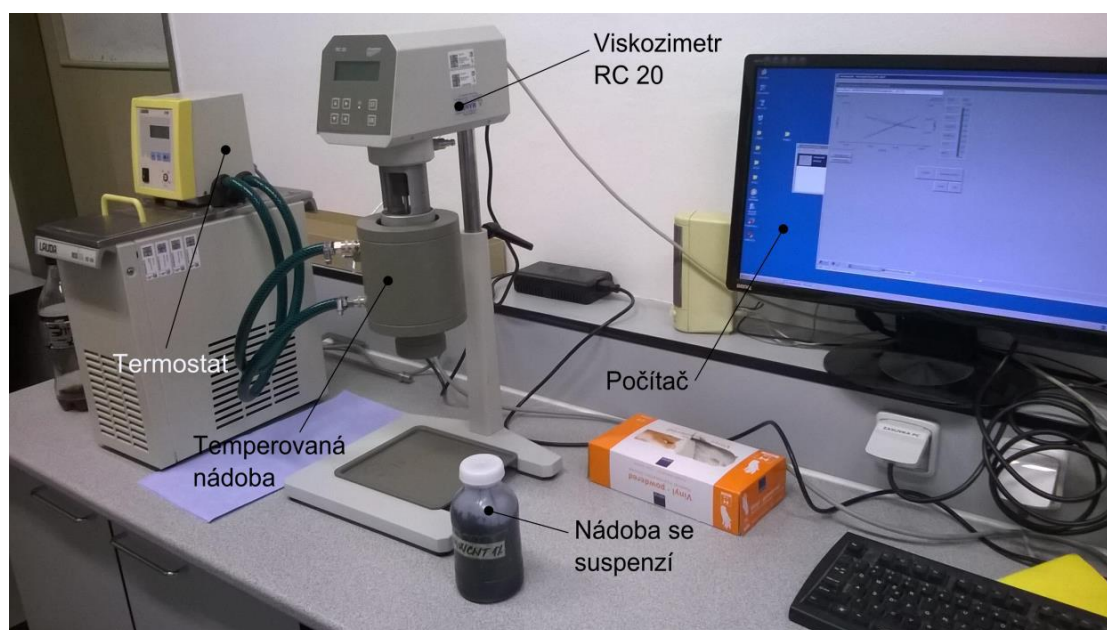
5.2.1 Pomocné laboratorní vybavení

K vážení vzorků byly použity váhy KERN EW6200-2NM s maximálním zatížením 6200 gramů při chybě měření 0,1 gramů a s minimálním zatížením 1 gram při chybě 0,01 gramů. Pro ohřev a chlazení vzorků byl použit termostat LAUDA ecoline RE106.

Pro homogenizaci vzorků bylo použito míchadlo firmy IKA označením lab egg comact. Maximální otáčky tohoto míchadla jsou 2000 za minutu. Toto míchadlo je osazeno motorem o výkonu 10 Wattů.

5.2.2 Reometr

Pro měření reologických vlastností byl využit reometr RC 20, jenž je zobrazen níže na obrázku. Měřicí stanice byla opatřena duplikátorovým pláštěm připojeným na chladicí okruh, který měl za úkol udržovat konstantní teplotu 20 °C. V duplikátoru je zapojena sonda Pt100. Celý systém je připojen k počítači, kde jsou zaznamenávána naměřená data. K měření bylo použito uspořádání „kužel-válec“. Použité množství vzorku bylo 70 ml dávkované injekční stříkačkou s rozsahem od 0 – 20 ml.

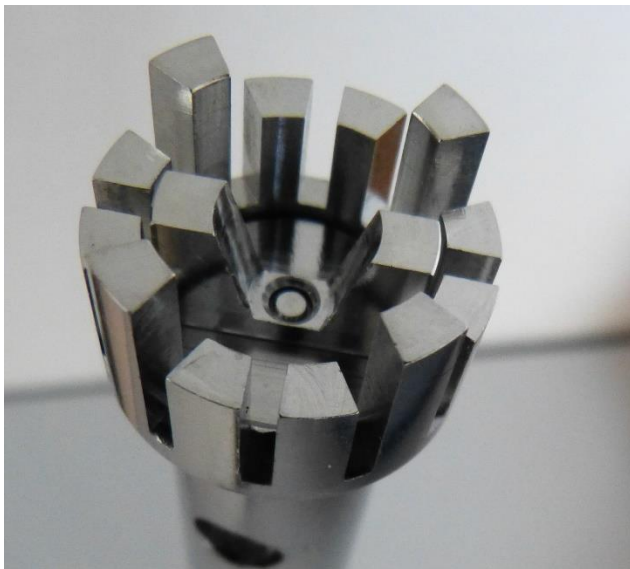


Obr. 26: Pracoviště měření tokových vlastností
(Kovařík, 2015)

5.2.3 Stator-rotor míchadlo

Použité míchadlo stator-rotor je od firmy IKA, konkrétní model: *IKA T25 Digital* osazené rotorem SR-25G. Jedná se o radiální vysoko-otáčkové míchadlo zobrazené níže na obrázku. Díky vysokým otáčkám je zajištěna cirkulace „nasáváním“ vzorku skrz dutou hřídel a z oblasti mezi dnem a koncem míchadla – „odspodu“. Stator je opatřen otvory, kterými protéká vzorek. Částice jsou drceny v mezeře o tloušťce 0,25 mm mezi státorem a rotorem a dále na hranách rotoru a statoru.

Míchadlo bylo vloženo do nádoby se vzorkem v ose nádoby v dostatečné vzdálenosti ode dna (2 cm), aby došlo k vhodné cirkulaci vsádky. Otáčky byly nastaveny tak, aby bylo zajištěno subjektivně dostatečné čerpání vzorku.

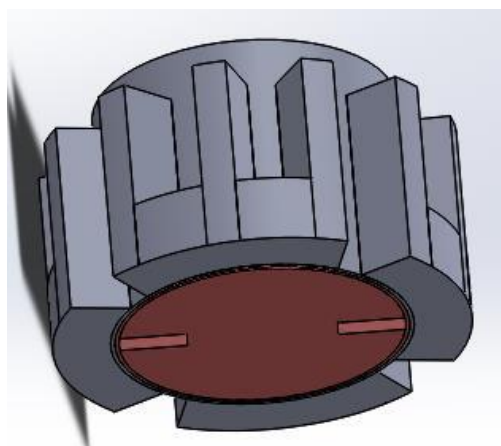


Obr. 27: IKA T25 – SR-25G

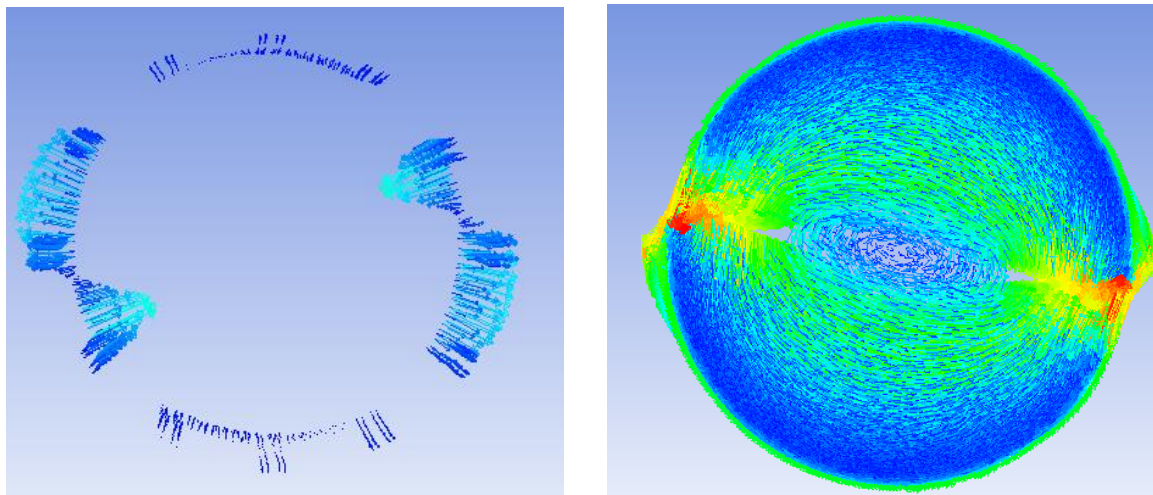
Vlevo je patrný detail dispergační hlavice. Uvnitř je dvoulopatkový rotor. Z vnějšku je perforovaný stator. Vpravo je vidět celá míchací stanice.

5.2.4 Stator-rotor – numerická simulace

Kvůli přiblížení toho, jak vypadá proudění v míchadle typu stator-rotor, jsem provedl numerickou simulaci zjednodušeného modelu dispergátoru IKA T25, SR-25G. K simulaci jsem využil software ANSYS, konkrétně Fluent v15. K simulaci jsem použil médium o stejných fyzikálních vlastnostech, jako má měřený nátěrový systém. V okrajových podmínkách jsem nastavil vstup – hmotnostní průtok 0,1 kg/s a výstup. Výstup jsem zvolil pouze přes otvory ve statoru. Počet otáček rotoru za minutu jsem nastavil 15 000. Jako výpočtový model byla použita metoda k-omega (SST).



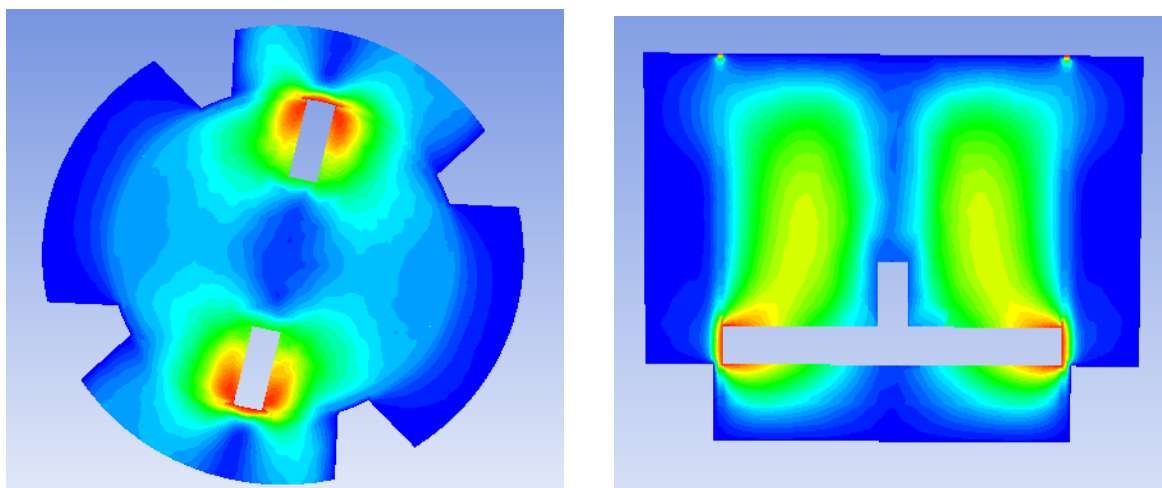
Obr. 28: Zjednodušená geometrie stator-rotor míchadla



Obr. 29: (vlevo) Rychlostní profil na výstupu ze statoru

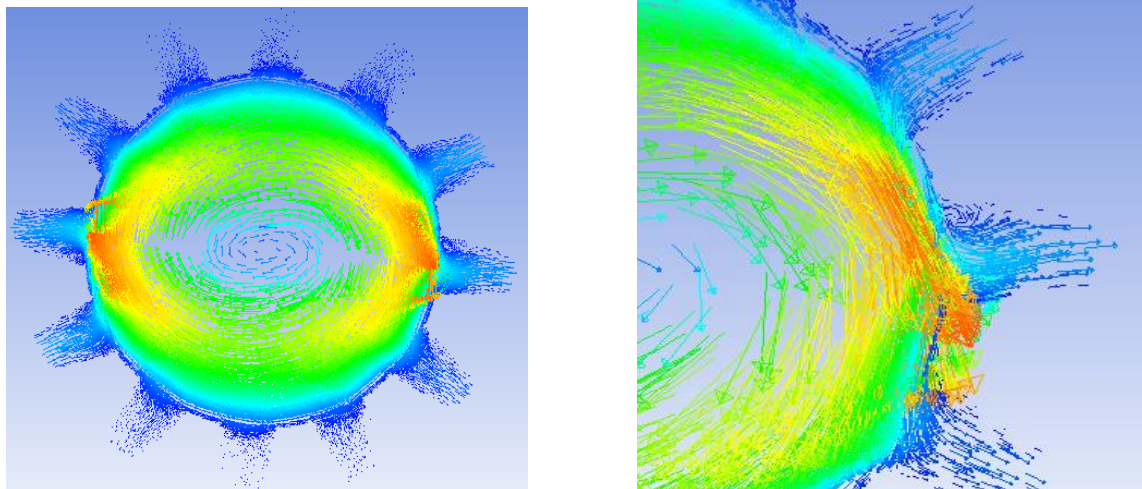
Obr. 30: (vpravo) Rychlostní profil v objemu rotoru

Na obrázku 29 je vidět, že v otvorech ve statoru nedochází pouze k výstupu kapaliny, ale i k nasávání vlivem podtlaku zapříčiněného vysokými otáčkami rotoru. Nejvyšší rychlosti na výstupu je dosaženo v okolí lopatek rotoru. Na obrázku 30 je poté vidět rychlostní profil objemu rotoru. Je dobře zřetelné, že nejvyšší rychlost je na okrajích lopatek rotoru.



Obr. 31: (vpravo) Kontury rychlostního pole při pohledu na půdorys („od spodu“) na stator-rotor

Obr. 32: (vlevo) Kontury rychlostního pole v řezu stator-rotor míchadla



Obr. 33: (vlevo) Rychlostní profil v řezu kolmém k ose

Obr. 34: (vpravo) Detail obrázku 33 s viditelným výtokem a přisáváním

Obrázek 34 zobrazuje detail řezu kolmého k ose, kde je vidět, jak dochází k výstupu kapaliny a zároveň také k nasávání kapaliny za míchadlem – oblast podtlaku.

Provedl jsem i výpočet maximální disipované energie s hodnotou: $\varepsilon_{max} = 1942$ J/kg. Při provedeném výpočtu zobrazeném v kapitole 6 – výsledky mi vyšla hodnota $\varepsilon_{max} \sim 13200$ J/kg. Mnou spočítaná hodnota je přibližně 6,8x vyšší než hodnota získaná z numerické simulace.

5.2.5 Zubové míchadlo

Zubové míchadlo, které je vidět níže na obrázku, má průměr 50 mm. Míchadlo bylo vloženo do nádoby se suspenzí a bylo umístěno v ose nádoby. Vzdálenost ode dna nádoby k míchadlu byla přibližně 2 cm. V průběhu dispergace byla měněna poloha míchadla v radiálním směru z důvodu lepšího promíchání v celém objemu vsádky.



Obr. 35: Detail použitého zubového míchadla

(Zoubek, 2013)

5.2.6 Ultrazvukové míchadlo

Pro ultrazvukovou dispergaci byl použit ultrazvukový homogenizátor Bedelin Sonoplus HD 3400 spolu se sondou VS200T. Homogenizátor byl nastaven na 300W s impulsy o délce 0,8 sekundy a pauze 1 sekunda.

Tento typ homogenizátoru produkuje vysoko výkonný ultrazvuk s velkou amplitudou. Samotné kmity jsou následně přenášeny a zesíleny podél nástavce, přes sondu až do kapalného vzorku. Tento homogenizátor se využívá především pro laboratorní účely ve zdravotnictví a pro speciální účely v průmyslovém výzkumu.

Generátor transformuje přijatou energii o frekvenci 50/60 Hz na frekvenci 20 kHz. Následně ultrazvukový měnič přemění vysokofrekvenční výkon z generátoru na ultrazvuk a to díky mechanické přeměně energie. Hrot sondy vibruje o frekvenci 20 kHz a vibrace následně přenáší do zpracovávaného vzorku.

Tab. 5: Parametry ultrazvukového dispergátoru

Ultrazvukový konvertor UW3400		Generátor GM3400		Sonda VS200T	
Frekvence	20 kHz	Frekvence	20 kHz	Objem	100 - 2500 ml
Hmotnost	2,2 kg	Hmotnost	3,1 kg	Průměr	25 mm
Rozměry	180xØ90 mm	Výkon max	400 W		
Třída ochrany	IP20	Rozsah výkonu	60-300 W		



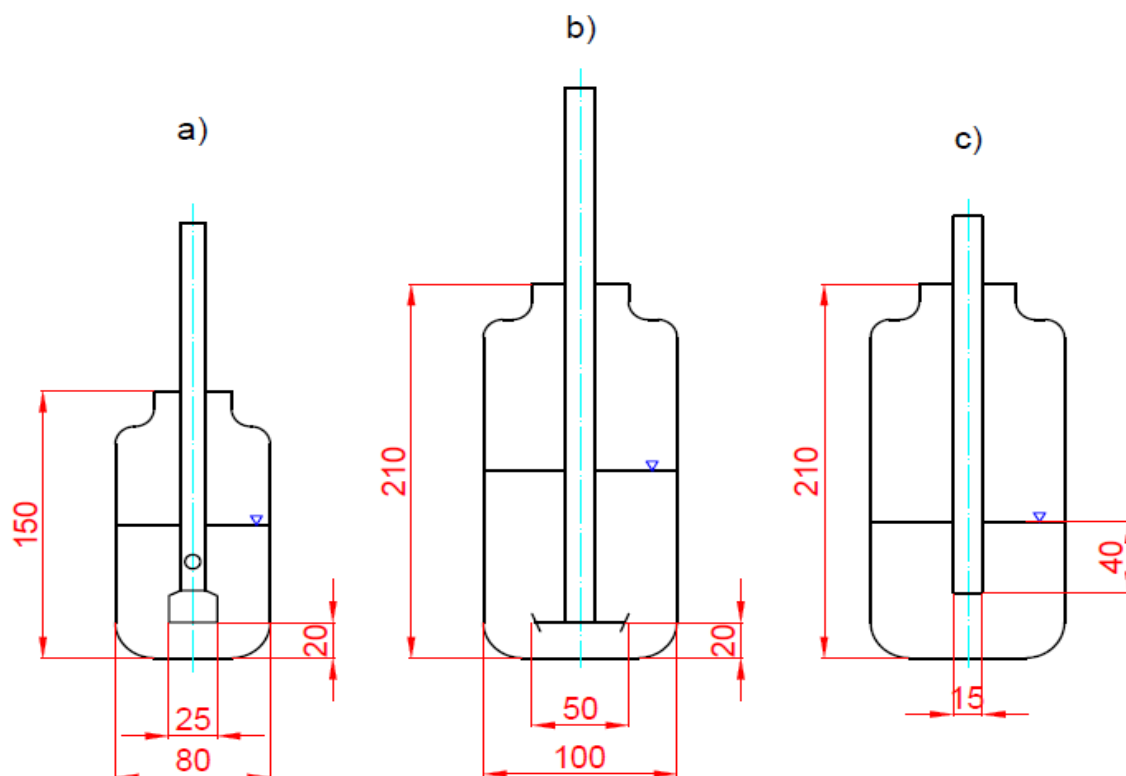
Obr. 36: Ultrazvukový generátor GM3400



Obr. 37: Sonda VS200T

Vlevo je vidět, jakým způsobem probíhala dispergace vzorku. Vpravo poté samotná sonda VS200T.

5.3 Schéma uspořádání experimentů



Obr. 38: Uspořádání experimentů

Na obrázku a) je zobrazeno uspořádání měření technologií stator-rotor. Měření probíhalo v menších nádobách. Obrázek b) ukazuje dispergaci technologií zubového míchadla. Zde musela být použita větší nádoba, aby se míchadlo vešlo skrz hrdlo. Na obrázku c) je poté zobrazena dispergace technologií ultrazvuku. Sonda byla ponořena do vzorku přibližně 40 mm.

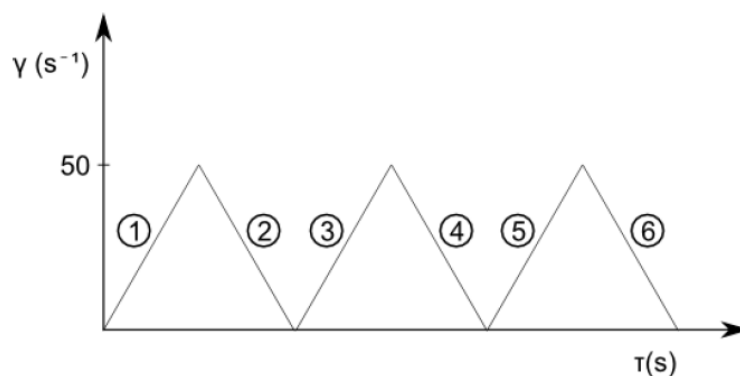
5.4 Postup měření experimentu

Postup a příprava měření byla rutinní záležitostí. Vzorek nátěru vykazoval vysokou viskozitu a výrobcem bylo tedy doporučeno takový vzorek před dispergací zahřát na teplotu 60 – 80 °C, což nám usnadnilo manipulaci a dispergaci kvůli poklesu viskozity. Po ohřátí vzorku na požadovanou teplotu bylo provedeno vážení z důvodu možného odparu vzorku. Poté teprve následovala homogenizace dvoulopatkovým vrtulovým míchadlem IKA lab egg. Po homogenizaci se odebralo 70 ml vzorku na reologii. Zbýlý vzorek se opět ohřál na doporučenou teplotu, následně se zvažil a postupoval dále na dispergaci. Po každém předem daném stupni dispergace bylo opět odebráno 70 ml vzorku na reologii. Počáteční hmotnost vzorku se pohybovala okolo 600 gramů. Toto množství stačilo pro provedení homogenizace a přibližně tří stupňů dispergace.

Níže uvádím pracovní postup v bodech, dle kterého jsem postupoval:

1. Ohřátí vzorku na teplotu přibližně 70 °C.
2. Zvážení vzorku.
3. Homogenizaci dvoulopatkovým vrtulovým míchadlem (IKA lab egg) po danou dobu.
4. Odebrání 70 ml vzorku na reologii.
5. Ohřátí vzorku na teplotu přibližně 70 °C.
6. Zvážení vzorku.
7. Provedení dispergace při určitých okrajových podmínkách.
8. Odebrání části vzorku na reologii.
9. Dle potřeby opakování bodů 5 až 8.

Tokové vlastnosti byly měřeny na reometru RC20 s uspořádáním kužel-válec. Dle doporučení výrobce se použilo 70 ml vzorku pro jedno měření. Před měřením a v průběhu měření byl vzorek chlazen na teplotu 20 °C externě zapojeným termostatem LAUDA ecoline RE106. Vzhledem k tomu, že měřený systém vykazoval tixotropické chování (tj. časově závislé), bylo nutné nastavit program v ovládacím softwaru. Tento program proměřoval fyzikální vlastnosti suspenze v závislosti na čase. A to tím způsobem, že postupně zvyšoval a snižoval smykovou rychlost a měřil velikost smykové deformace. Níže na obrázku je patrné, jak takové měření probíhalo. Z jednoho měření jsme tedy obdrželi časově závislou sadu dat v rozmezí smykové rychlosti od nuly do 50 s⁻¹.



Obr. 39: Postup měření časově závislého chování

5.5 Zpracovávání naměřených dat

V první fázi byla změřena nejprve samotná matrice bez příměsí nanočástic pro ověření mocninového chování tekutiny. Po tomto ověření jsem mohl postupovat dle níže uvedeného popisu.

Po každém měření na reometru RC20 byl z počítače získán soubor dat s cílem daná data zpracovat a vyhodnotit. Vzhledem k tomu, že nátěrová barva vykazuje pseudoplastické chování – mocninný model, platí rovnice:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (26)$$

Cílem je tedy stanovit neznámé parametry rovnice, které charakterizují tokové vlastnosti daného vzorku. Konkrétně je to index toku n a koeficient konzistence K .

Jak je patrné na obrázku 39, z každého měření tokových vlastností dostanu sérii dat, které jsou pomyslně rozděleny na 6 kroků. Vyhodnocení indexu toku a koeficientu konzistence jsem vyhodnocoval pro každý tento krok zvlášť. Nejdůležitější z čeho jsem vycházel při výpočtech, byla rychlost smykového napětí $\dot{\gamma}_{1N}$ a příslušné smykové napětí τ .

Tyto dvě veličiny jsem zlogaritmoval a následně vynesl do grafu. Data jsem dále proložil lineární regresí, kdy regresní model byl ve tvaru:

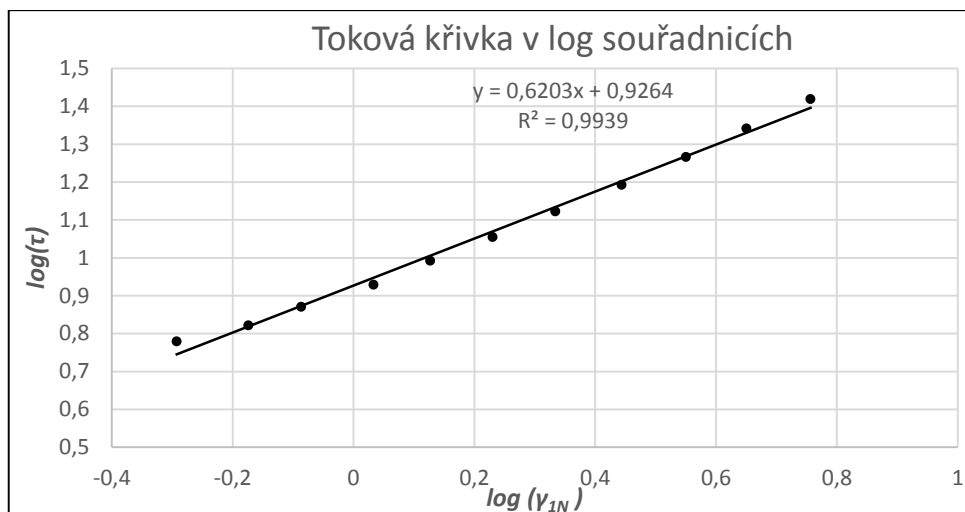
$$y = ax + b \quad (27)$$

Průsečík s osou y je tedy logaritmem koeficientu konzistence \bar{K} , tj. když $x = 0$. Ovšem tento koeficient konzistence je pro takzvanou smykovou rychlost newtonskou ($\dot{\gamma}_{1N}$). Logaritmus indexu toku odpovídá směrnici přímky, tj. hodnotě a z regresního modelu. Tyto hodnoty se následně odlogaritmují a získáme již skutečný index toku a koeficient konzistence pro newtonskou smykovou rychlost, který je nutno přepočítat dle následujícího vztahu:

$$K = \bar{K} \left[\frac{n \left(1 - \kappa^{\frac{2}{n}} \right)}{1 - \kappa^2} \right]^n \quad (28)$$

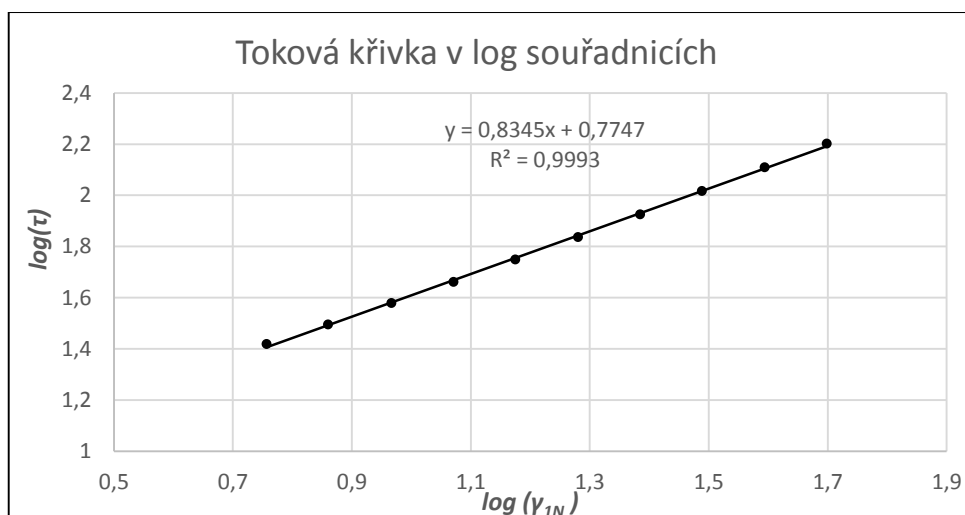
Kde κ je v tomto vztahu poměr poloměrů válců reometru, n je již zjištěný index toku.

Poměr poloměrů válců je určen z výrobcem dané geometrie a je roven 0,9795. Vzhledem k tomu, že rozsah smykových rychlostí byl od 0 do 50 s^{-1} a jedna regrese v celém tomto rozsahu by nedostatečně popisovala naměřená data, bylo nutné tento interval rozdělit na dva a v každém tomto intervalu provést lineární regresí zvlášť. Vyhodnocovány byly tyto rozsahy smykových rychlostí: interval od 0 do $5,71 \text{ s}^{-1}$ a interval od $5,71$ do 50 s^{-1} . Celkem bylo tedy nutné pro každý krok určit dva indexy toku a dva koeficienty toku a to celkem 6 krát – pro každý krok zvlášť. Dohromady tedy 12 krát provedená lineární regrese a její vyhodnocení pro každý bod dispergace.



Obr. 40: Toková křivka pro rozsah smykových napětí od $0,51 \text{ s}^{-1}$ do $5,71 \text{ s}^{-1}$

Výše uvedený obrázek zobrazuje ukázkou z určování indexu toku a koeficientu konzistence z lineární regrese.



Obr. 41: Toková křivka pro rozsah smykových rychlostí od $5,71 \text{ s}^{-1}$ do $49,98 \text{ s}^{-1}$

Výše uvedený obrázek zobrazuje ukázkou z určování indexu toku a koeficientu konzistence z lineární regrese.

Z regrese získaných hodnot K a n pro daný interval smykových rychlostí, jsem následně mohl dopočítat zdánlivou viskozitu, se kterou jsem dále pokračoval ve vyhodnocení.

Kromě určení výše uvedených tokových parametrů bylo dalším krokem určit velikost vložené (disipované) energie do systému vztaženou na jeden kilogram ($E \text{ [J/kg]}$). To se určí z disipovaného příkonu (ε), který se vynásobí časem dispergace. Disipovaný příkon se vypočte tak, že se dodaný příkon vydělí hmotnostní dispergovaného vzorku.

$$\varepsilon = \frac{P \text{ [W]}}{m \text{ [kg]}} \quad (29)$$

$$E = \varepsilon \text{ [W/kg]} \cdot t \text{ [s]} \quad (30)$$

Kromě výše uvedeného jsem provedl i výpočet lokálního maximálního disipovaného příkonu (ε_{max}). Postup výpočtu je stejný jako v rovnici 29 s tím rozdílem, že hmotnost celé vsádky

se nahradí hmotností vzorku jen v oblasti, kde probíhá samotná dispergace. V případě technologie dispergace stator-rotor je oblastí dispergace vnitřní objem statoru. V případě zubového míchadla byl zvolen válec o průměru 50 mm a výšce 20 mm. A v případě použití ultrazvuku byla zvolena vrstva 2 mm o výšce 40 mm v okolí sondy. Poté se pomocí hustoty a známého objemu dopočítá hmotnost lokálního vzorku podrobeného disipovanému příkonu.

Dalším úkolem bylo určit jaká je závislost mezi tokovými vlastnostmi a množstvím disipované energie. Pro určení celkové disipované energie je nutné spočítat součet vložené energie po homogenizaci i po dispergaci. Hmotnost vzorku byla předem známa, tudíž podstatné bylo určit dodaný příkon.

Pro určení příkonu homogenizací jsem použil známý vztah:

$$P = P_0 \rho n^3 d^5, \quad (31)$$

kde P_0 je známé příkonové číslo, které lze pro turbulentní oblast považovat za konstantu, ρ je hustota míchaného vzorku, n jsou otáčky míchadla a d je průměr míchadla. Příkonové číslo P_0 laboratorního míchadla IKA lab egg bylo odhadnuto na 0,9 a průměr míchadla je 34 mm.

Výpočet příkonu zubového míchadla vychází ze stejné rovnice jako u míchadla pro homogenizaci, kdy příkonové číslo zubového míchadla pro turbulentní oblast je rovno 0,37.

Pro určení příkonu míchadla typu stator-rotor jsem použil korelaci získanou od Kovaříka (2015), který prováděl experiment pro určení příkonové charakteristiky tohoto míchadla – IKA S25N – 25G. Příkon stanovil z měření rozdílu teplot před a po dispergaci po danou dobu dle následujícího vztahu:

$$P = \frac{m C_p \Delta T}{t}, \quad (32)$$

kde C_p je měrná tepelná kapacita vzorku, m je hmotnost vzorku. Touto metodou dospěl k následujícímu vztahu získaného regresí naměřených dat:

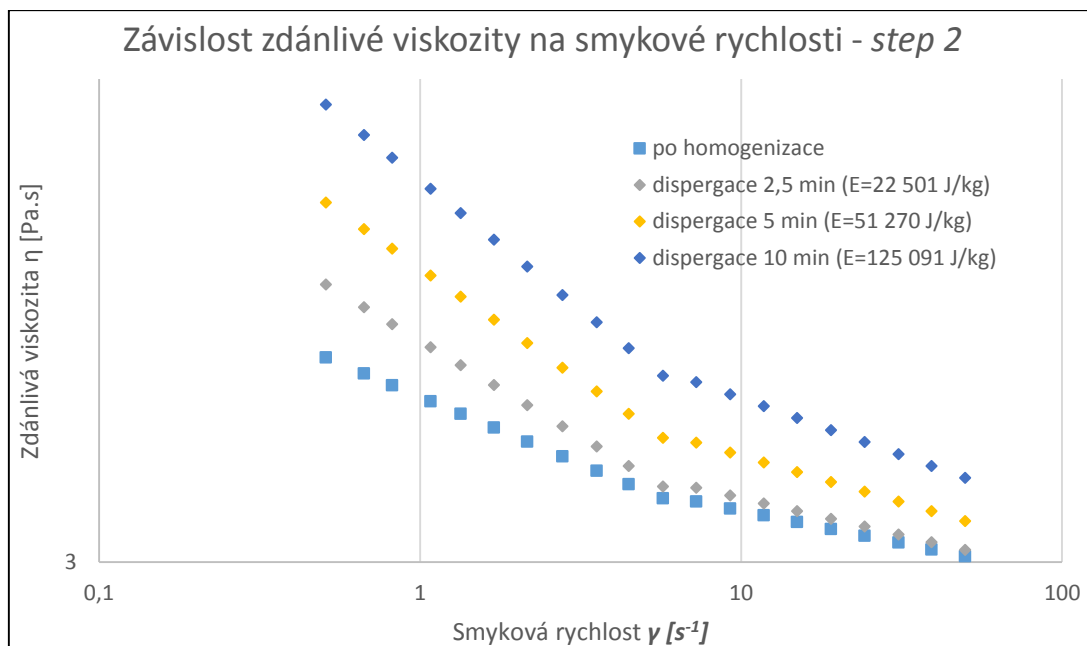
$$P = 2,0846 \cdot 10^{-10} n^{2,7595} \quad (33)$$

S tím, že tento vztah je platný pouze pro oblast turbulence (Kovařík, 2015).

Při dispergaci pomocí ultrazvuku se příkon volí a nastavuje přímo na přístroji. Po dokončení dispergace přístroj automaticky zobrazí celkové množství disipované energie.

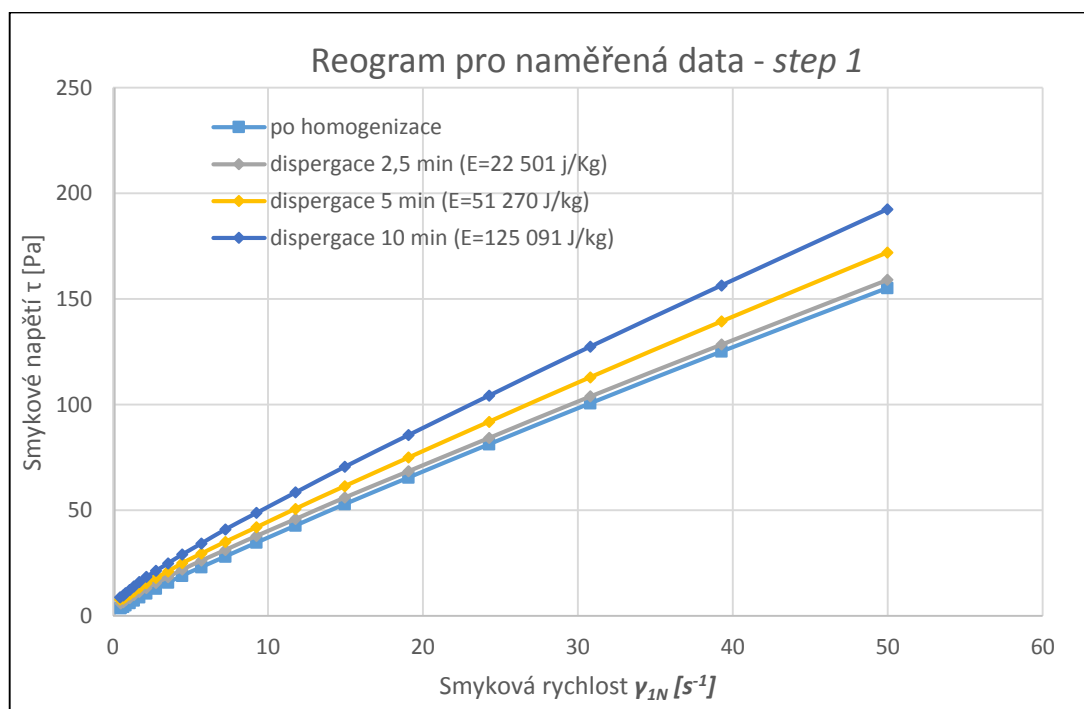
5.6 Vyhodnocování zpracovaných dat

Samotné vyhodnocování dat zpracovaných dle výše uvedeného v kapitole 5.4 probíhalo v několika rovinách. Jednak byla vynesena závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro všechny naměřené body dané dispergace a vynesena do jednoho grafu (viz obr. 42). Z tohoto je velmi dobře patrný posun zdánlivé viskozity pro danou metodu a dobu dispergace.



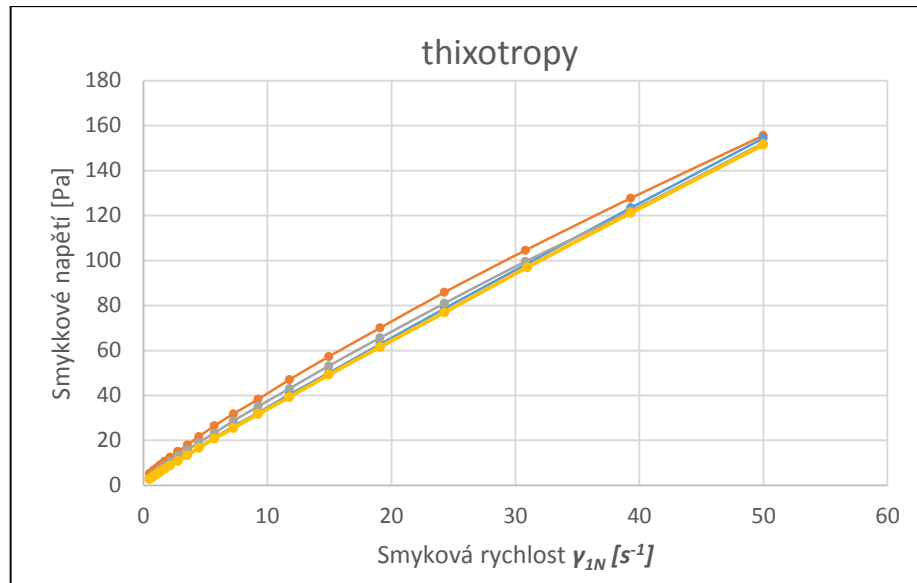
Obr. 42: Zdánlivá viskozita funkcí smykové rychlosti

Uvedený graf je pro dispergaci metodou stator-rotor pro dobu dispergace: 1. homogenizace, 2. dispergace 2,5 min, 3. dispergace 2,5 min, 4. dispergace 5 min.



Obr. 43: Reogram pro měření technologií stator-rotor (a), krok 1

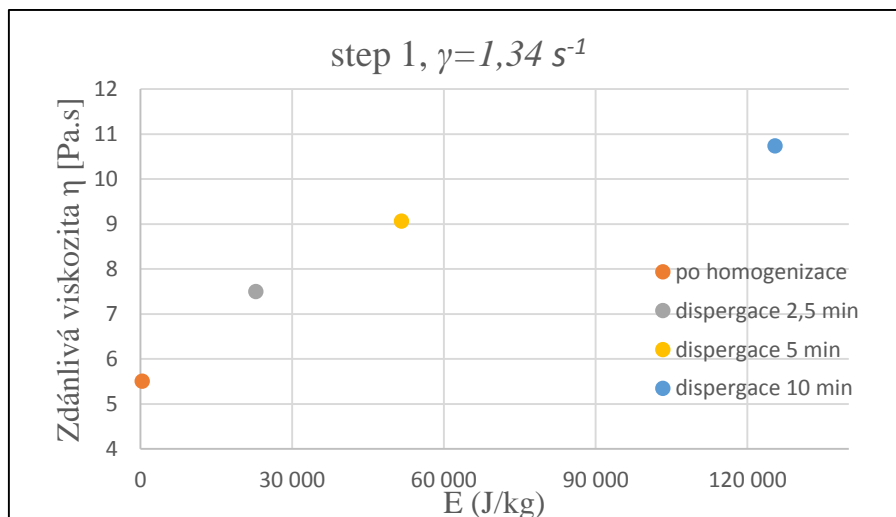
Dále v rámci každého naměřeného bodu byly vyneseny závislosti smykového napětí na smykové rychlosti pro všech 6 kroků (příp. 4 kroky) do jednoho grafu, aby bylo zobrazeno tixotropické chování. Je patrné, že 1. krok vykazuje viditelný posun tokové křivky v porovnání se zbývajícími kroky.



Obr. 44: Tixotropické chování měřených vzorků

Uvedený graf je pro dispergaci metodou stator-rotor.

Zdánlivá viskozita je funkcí smykové rychlosti. Z tohoto důvodu jsem byl nucen provést vyhodnocení pro určitou smykovou rychlost. Zvolil jsem tyto smykové rychlosti: 1,34; 4,47 a 39,28 s^{-1} . Smyková rychlost 1,34 s^{-1} reprezentuje chování pro nízké smykové rychlosti. Naopak smyková rychlost 39,28 s^{-1} popisuje chování v oblasti vyšších smykových rychlostí a poslední hodnota 4,47 s^{-1} popisuje chování „mezi“ těmito dvěma extrémami.



Obr. 45: Nárůst zdánlivé viskozity

Graf zobrazuje nárůst zdánlivé viskozity pro 1. krok, při smykové rychlosti 1,34 s^{-1} , metoda dispergace: stator-rotor.

Vzhledem k tomu, že pro každé měření dispergace nebyla zaručena stejná koncentrace nanočástic v matrici – 1 % hm., provedl jsem vyhodnocení nárůstu zdánlivé viskozity v procentuálním vyjádření vzhledem k viskozitě vypočtené po homogenizaci jako referenční hodnotě. Toto jsem provedl pouze pro krok 1 a 4. Nikoliv pro všechny kroky z důvodu „ohromného“ množství dat.

6. Výsledky

Byly provedeny celkem 4 úspěšná měření. Dvě měření se zabývala dispergací metodou stator-rotor, jedno měření byla dispergace pomocí zubového míchadla a poslední měření byla dispergace pomocí ultrazvuku. Níže jsou uvedeny zpracované výsledky z těchto 4 měření. V úvodu každého měření je přehledná tabulka udávající okrajové podmínky dispergace a vnesené množství energie do systému. Dále jsou uvedeny hodnoty koeficientu konzistence a indexu toku pro všechny měřené body dané metody dispergace. V další části jsou uvedeny grafy a procentuální hodnocení změny zdánlivé viskozity vůči zjištěné viskozitě po homogenizaci. Vzhledem k tomu, že je toto vyhodnocení nutno provést pro každý krok zvlášť, bylo by zde ohromné množství tabulek a grafů. Zvolil jsem proto referenční krok 1 a krok 4, na kterých jsem toto vyhodnocení provedl. Všechna zdrojová a upravená data jsou k dispozici v přílohách, kdy členění je dle následující tabulky. Přílohy byly vytvořeny v programu *Excel 2013*.

Vzorek	Příloha	Poznámka
Cista matrice	A.1	Matrice LV EPS 620 bez nanočástic, reologie.
SR(a)HOM	A.2	Dispergace stator-rotor (a), homogenizace - 4 (min), 1500 (ot/min).
SR(a)DIS1	A.3	Dispergace stator-rotor (a), dispergace1 - 2,5 (min), 15 000 (ot/min).
SR(a)DIS2	A.4	Dispergace stator-rotor (a), dispergace2 - 2,5 (min), 15 200 (ot/min).
SR(a)DIS3	A.5	Dispergace stator-rotor (a), dispergace3 - 5 (min), 15 200 (ot/min).
SR(a) vyhodnocení	A.6	Vyhodnocení zpracovaných dat stator-rotor(a).
SR(b)HOM	B.1	Dispergace stator-rotor (b), homogenizace - 4 (min), 1500 (ot/min).
SR(b)DIS1	B.2	Dispergace stator-rotor (b), dispergace1 - 15 (min), 15 500 (ot/min).
SR(b)DIS2	B.3	Dispergace stator-rotor (b), dispergace1 - 10 (min), 15 200 (ot/min).
SR(b)DIS3	B.4	Dispergace stator-rotor (b), dispergace1 - 7,5 (min), 15 200 (ot/min).
SR(b) vyhodnocení	B.5	Vyhodnocení zpracovaných dat stator-rotor(b).
ZMHOM	C.1	Dispergace zubové míchadlo, homogenizace - 6 (min), 1500 (ot/min).
ZMDIS1	C.2	Dispergace zubové míchadlo, dispergace - 5 (min), 4884 (ot/min).
ZMDIS2	C.3	Dispergace zubové míchadlo, dispergace - 5 (min), 5100 (ot/min).
ZMDIS3	C.4	Dispergace zubové míchadlo, dispergace - 5 (min), 5280 (ot/min).
ZMDIS4	C.5	Dispergace zubové míchadlo, dispergace - 5 (min), 6060 (ot/min).
ZM vyhodnocení	C.6	Vyhodnocení zpracovaných dat zubové míchadlo.
ULTHOM	D.1	Dispergace ultrazvukem, homogenizace - 7 (min), 1500 (ot/min).
ULTDIS1	D.2	Dispergace ultrazvukem, dispergace - 27 (min), 300 W.
ULT vyhodnocení	D.3	Vyhodnocení zpracovaných dat ultrazvuk.

Obr. 46: Shrnující tabulka příloh

Celkový čas dispergace pro každé měření se určí jako součet dílčích časů. Například dispergace stator-rotor (a), kdy první dispergace trvala 2,5 min, druhá dispergace trvala dalších 2,5 min (celkově tedy byl vzorek dispergován 5 min pro druhou dispergaci) a třetí dispergace trvala dalších 5 min. Celkový čas dispergace byl tedy 10 min.

6.1 Dispergace - stator-rotor (a)

Tab. 6: Parametry dispergace metodou stator-rotor (a)

STATOR-ROTOR (a)							
Vzorek	n (1/min)	t (min)	m (g)	P (W)	ε (W/kg)	E (J/kg)	ε_{\max} (W/kg)
Homogenizace	1500	4	550,35	0,89	2	388	-
Dispergace 1	15000	2,5	464,34	69,65	150	22501	13232
Dispergace 2	15200	2,5	376,68	72,25	192	28770	13725
Dispergace 3	15200	5	293,6	72,25	246	73822	13725

Tab. 7: (vlevo) Homogenizace – parametry K a n

Tab. 8: (vpravo) Dispergace 2,5 min – parametry K a n

step	K1	K2	n1	n2
1	5,88	4,89	0,77	0,88
2	4,53	4,01	0,85	0,93
3	4,94	4,66	0,87	0,89
4	4,41	3,94	0,86	0,93
5	4,73	4,52	0,89	0,89
6	4,39	3,87	0,86	0,93

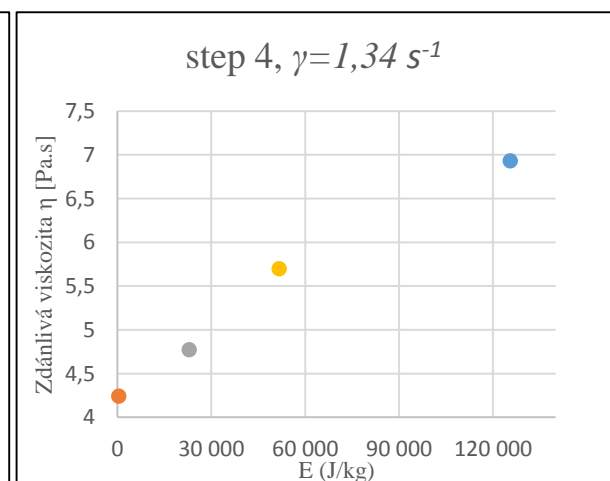
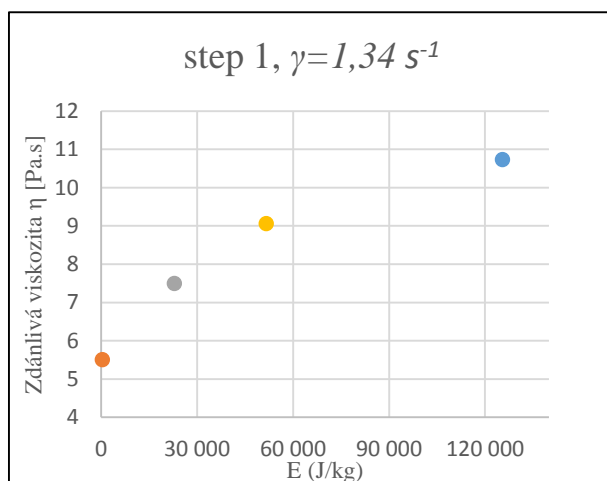
step	K1	K2	n1	n2
1	8,38	5,93	0,62	0,83
2	5,21	4,23	0,79	0,92
3	5,84	5,21	0,82	0,87
4	5,05	4,19	0,80	0,92
5	5,67	5,08	0,83	0,87
6	4,99	4,13	0,81	0,92

Tab. 9: (vlevo) Dispergace 5 min – parametry K a n

Tab. 10: (vpravo) Dispergace 10 min – parametry K a n

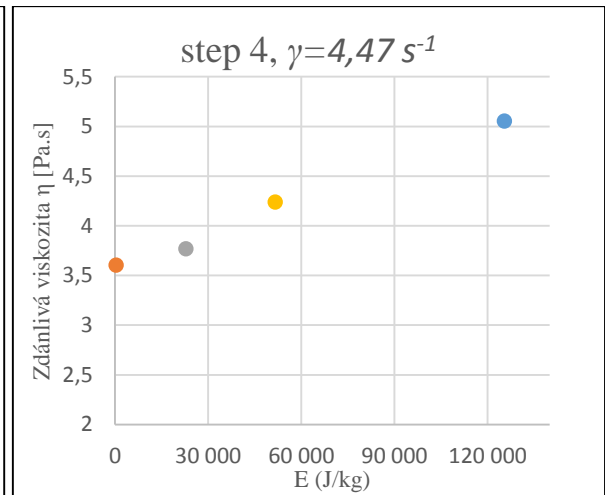
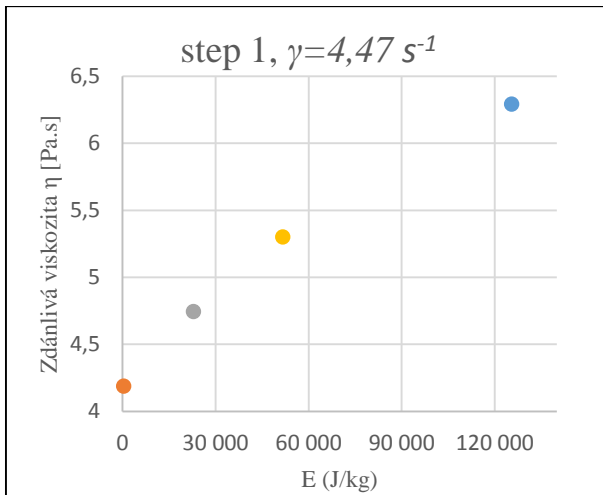
step	K1	K2	n1	n2
1	10,33	6,86	0,55	0,82
2	6,24	4,94	0,76	0,90
3	7,04	6,04	0,78	0,85
4	6,12	4,81	0,75	0,90
5	6,90	5,88	0,78	0,85
6	5,93	4,73	0,77	0,91

step	K1	K2	n1	n2
1	12,22	8,33	0,56	0,80
2	7,77	6,00	0,72	0,88
3	8,55	7,08	0,74	0,83
4	7,49	5,87	0,74	0,88
5	8,33	6,94	0,75	0,84
6	7,45	5,83	0,73	0,88



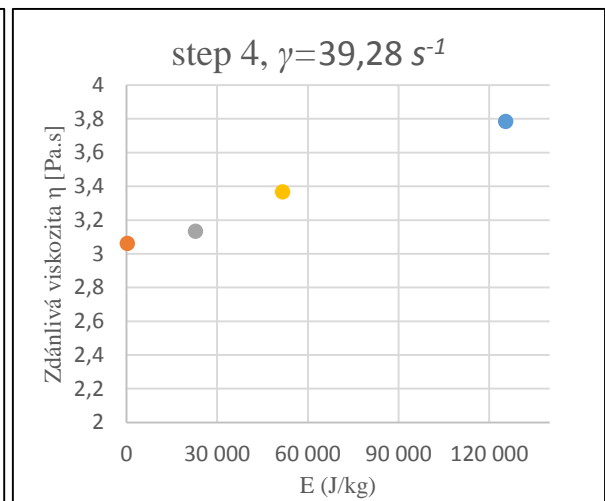
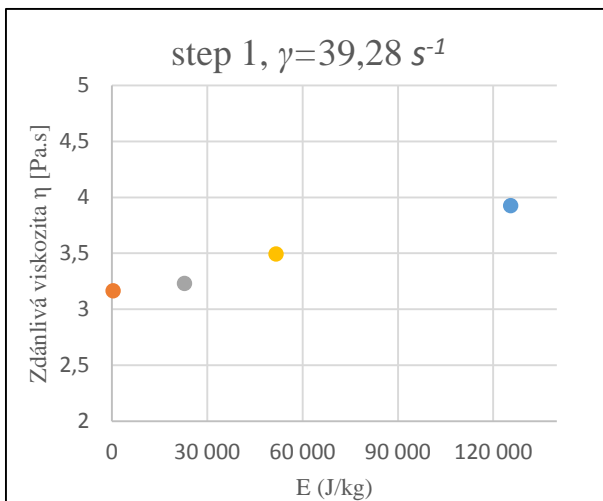
Obr. 47: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 48: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 49: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 50: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 51: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 52: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 11: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a). (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 12: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a). (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 1,34 \text{ [s}^{-1}\text{]}$

	η [Pa.s]	Rozdíl [%]
Homogenizace	5,51	0,00
Dispergace 1	7,49	36,13
Dispergace 2	9,06	64,64
Dispergace 3	10,73	94,98

Smyková rychlost $\gamma = 4,47 \text{ [s}^{-1}\text{]}$

	η [Pa.s]	Rozdíl [%]
Homogenizace	4,19	0,00
Dispergace 1	4,74	13,27
Dispergace 2	5,30	26,60
Dispergace 3	6,29	50,25

Tab. 13: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 39,28 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	3,17	0,00
Dispergace 1	3,23	2,09
Dispergace 2	3,50	10,48
Dispergace 3	3,93	24,12

Tab. 14: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 15: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 1,34 \text{ [s}^{-1}\text{]}$			Smyková rychlost $\gamma = 4,47 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]		$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	4,24	0,00	Homogenizace	3,60	0,00
Dispergace 1	4,77	12,46	Dispergace 1	3,77	4,60
Dispergace 2	5,70	34,32	Dispergace 2	4,24	17,67
Dispergace 3	6,93	63,41	Dispergace 3	5,05	40,27

Tab. 16: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 39,28 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	3,06	0,00
Dispergace 1	3,13	2,37
Dispergace 2	3,37	10,00
Dispergace 3	3,79	23,62

6.2 Dispergace - stator-rotor (b)

Tab. 17: Parametry dispergace metodou stator-rotor (b)

STATOR-ROTOR (b)							
Vzorek	n (1/min)	t (min)	m (g)	P (W)	ε (W/kg)	E (J/kg)	ε_{\max} (W/kg)
Homogenizace	1500	4	496,45	0,89	2	430	-
Dispergace 1	15500	15	418,36	76,25	182	164035	14485
Dispergace 2	15200	10	338,44	72,25	213	128082	13725
Dispergace 3	15200	7,5	254,84	72,25	283	127575	13725

Tab. 18: (vlevo) Homogenizace – parametry K a n

Tab. 19: (vpravo) Dispergace 15 min – parametry K a n

step	K1	K2	n1	n2
1	6,29	5,30	0,79	0,88
2	4,85	4,37	0,87	0,93
3	5,32	4,97	0,86	0,89
4	4,79	4,28	0,87	0,93

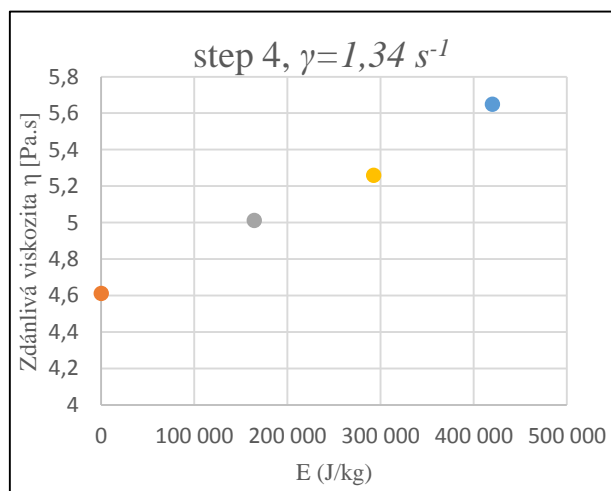
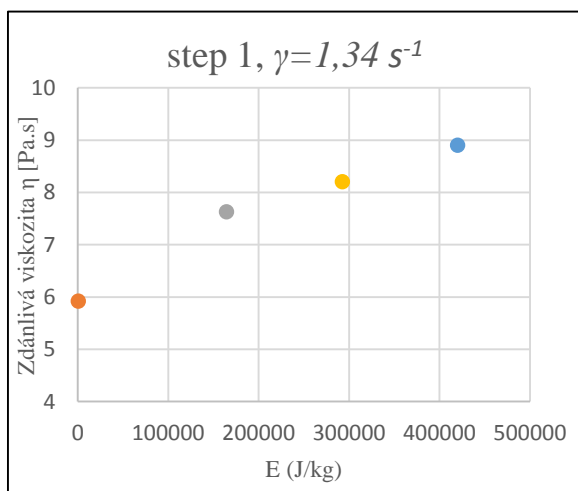
step	K1	K2	n1	n2
1	8,39	5,96	0,67	0,86
2	5,44	4,61	0,83	0,92
3	6,33	5,64	0,81	0,87
4	5,26	4,43	0,84	0,93

Tab. 20: (vlevo) Dispergace 25 min – parametry K a n

Tab. 21: (vpravo) Dispergace 32,5 min – parametry K a n

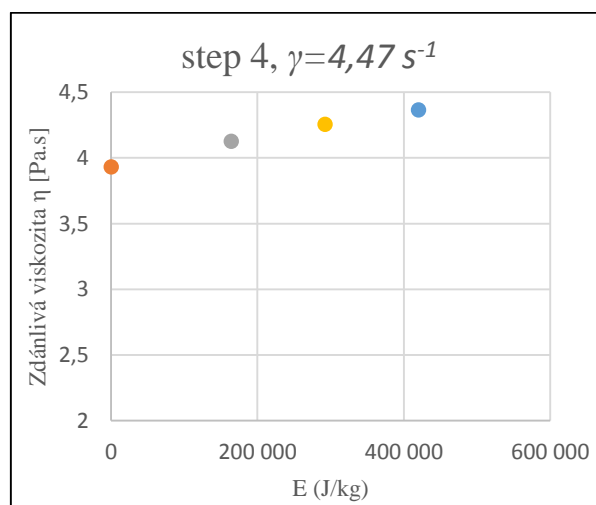
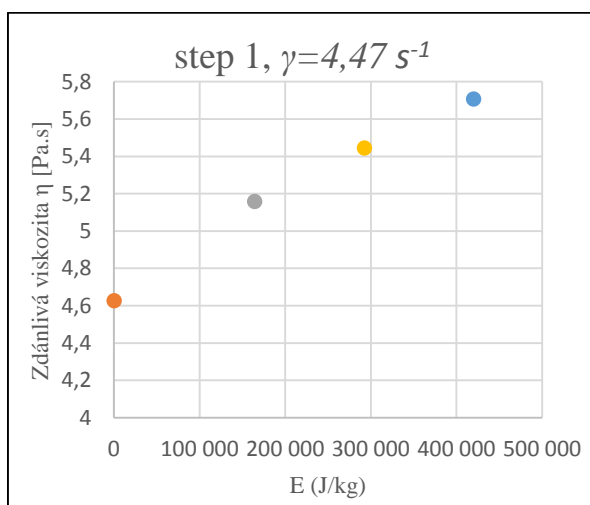
step	K1	K2	n1	n2
1	9,07	6,52	0,66	0,84
2	5,89	4,87	0,80	0,91
3	6,86	5,95	0,78	0,86
4	5,54	4,61	0,82	0,92

step	K1	K2	n1	n2
1	9,84	7,09	0,64	0,82
2	6,18	5,09	0,79	0,90
3	7,37	6,31	0,77	0,84
4	5,95	4,76	0,79	0,91



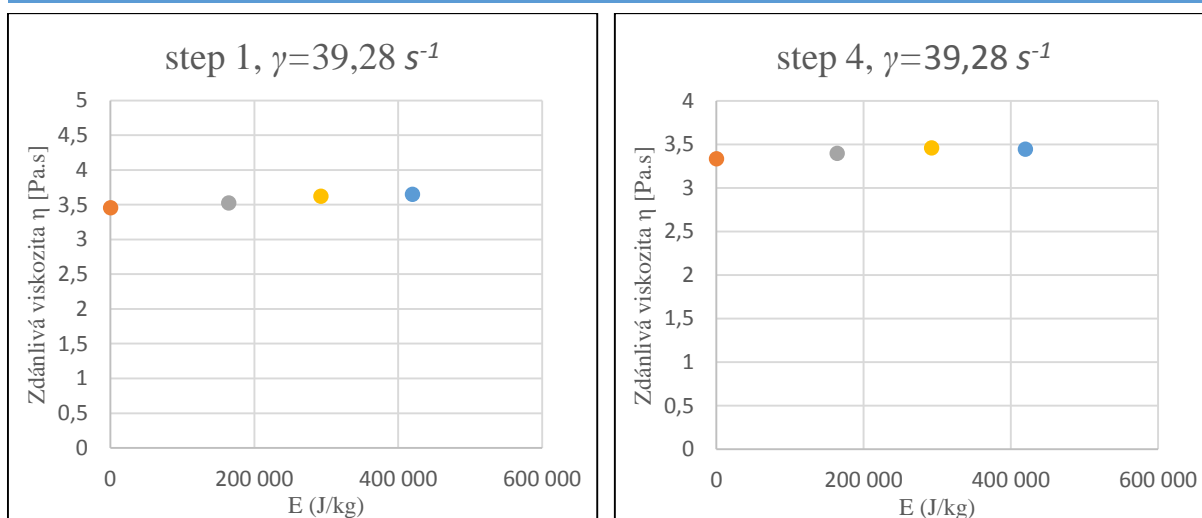
Obr. 53: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 54: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 55: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 56: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 57: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 58: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 22: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 23: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 1,34 \text{ [s}^{-1}\text{]}$			Smyková rychlost $\gamma = 4,47 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]		$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	5,93	0,00	Homogenizace	4,63	0,00
Dispergace 1	7,63	28,75	Dispergace 1	5,16	11,50
Dispergace 2	8,21	38,46	Dispergace 2	5,44	17,68
Dispergace 3	8,91	50,26	Dispergace 3	5,71	23,34

Tab. 24: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 39,28 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	3,46	0,00
Dispergace 1	3,52	1,89
Dispergace 2	3,62	4,76
Dispergace 3	3,65	5,56

Tab. 25: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 26: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 1,34 \text{ [s}^{-1}\text{]}$			Smyková rychlost $\gamma = 4,47 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]		$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	4,61	0,00	Homogenizace	3,93	0,00
Dispergace 1	5,01	8,69	Dispergace 1	4,12	4,91
Dispergace 2	5,26	14,05	Dispergace 2	4,25	8,22
Dispergace 3	5,65	22,49	Dispergace 3	4,36	10,98

Tab. 27: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 39,28 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	3,33	0,00
Dispergace 1	3,40	1,87
Dispergace 2	3,46	3,73
Dispergace 3	3,44	3,28

6.3 Dispergace - zubové míchadlo

Tab. 28: Parametry dispergace zubovým míchadlem

ZUBOVÉ MÍCHADLO							
Vzorek	n (1/min)	t (min)	m (g)	P (W)	ϵ (W/kg)	E (J/kg)	ϵ_{\max} (W/kg)
Homogenizace	1500	6	1108,22	0,89	1	289	-
Dispergace 1	4884	5	948,01	86,75	92	27451	1588
Dispergace 2	5100	5	870,54	98,77	113	34038	1808
Dispergace 3	5280	5	799,25	109,60	137	41140	2006
Dispergace 4	6060	5	728,25	165,71	228	68263	3033

Tab. 29: (vlevo) Homogenizace – parametry K a n

Tab. 30: (vpravo) Dispergace 5 min – parametry K a n

step	K1	K2	n1	n2
1	6,20	5,24	0,78	0,89
2	4,88	4,40	0,87	0,93
3	5,21	4,96	0,88	0,90
4	4,84	4,30	0,86	0,93

step	K1	K2	n1	n2
1	7,65	6,19	0,68	0,82
2	4,86	4,20	0,83	0,92
3	5,35	5,13	0,86	0,86
4	4,75	4,10	0,82	0,92

Tab. 31: (vlevo) Dispergace 10 min – parametry K a n

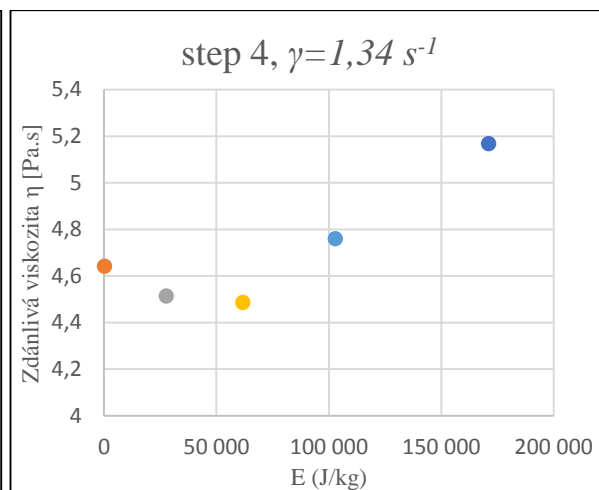
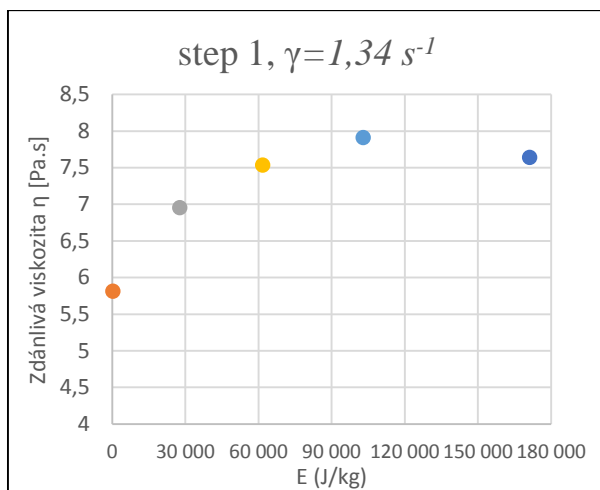
Tab. 32: (vpravo) Dispergace 15 min – parametry K a n

step	K1	K2	n1	n2
1	8,33	6,65	0,66	0,80
2	5,04	4,20	0,81	0,92
3	5,58	5,18	0,82	0,86
4	4,69	4,12	0,85	0,92

step	K1	K2	n1	n2
1	8,82	6,86	0,63	0,80
2	5,26	4,43	0,81	0,91
3	5,96	5,43	0,81	0,85
4	5,02	4,32	0,82	0,91

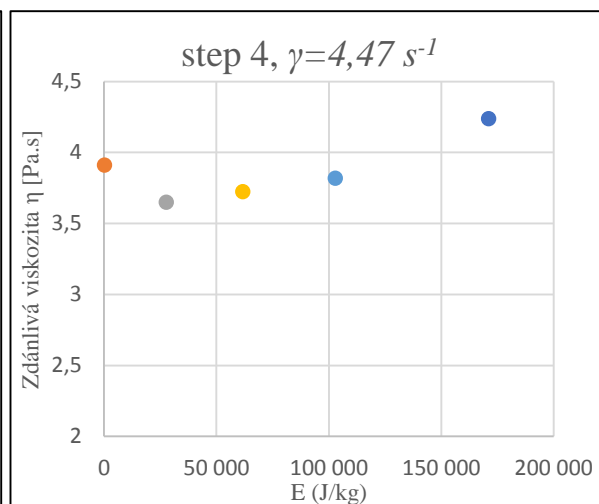
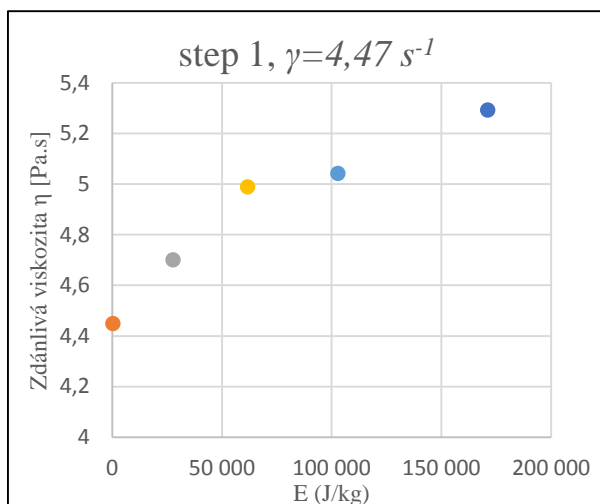
Tab. 33: Dispergace 25 min – parametry K a n

step	K1	K2	n1	n2
1	8,35	6,86	0,70	0,83
2	5,61	4,69	0,81	0,92
3	6,24	5,63	0,83	0,87
4	5,42	4,71	0,84	0,92



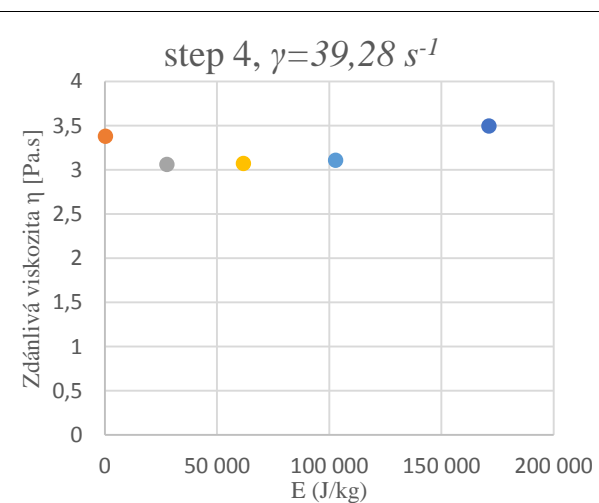
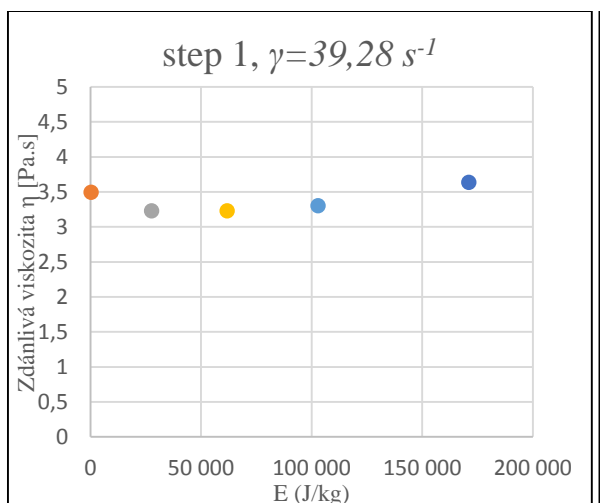
Obr. 59: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 60: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 61: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 62: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 63: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 64: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 34: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)
Tab. 35: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

	Smyková rychlost $\gamma = 1,34 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		Smyková rychlost $\gamma = 4,47 \text{ [s}^{-1}\text{]}$	
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	5,81	0,00	4,45	0,00
Dispergace 1	6,95	19,60	4,70	5,68
Dispergace 2	7,53	29,59	4,99	12,15
Dispergace 3	7,91	36,07	5,04	13,34
Dispergace 4	7,64	31,40	5,29	18,98

Tab. 36: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

	Smyková rychlost $\gamma = 39,28 \text{ [s}^{-1}\text{]}$	
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	3,49	0,00
Dispergace 1	3,23	-7,59
Dispergace 2	3,23	-7,55
Dispergace 3	3,31	-5,42
Dispergace 4	3,64	4,02

Tab. 37: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)
Tab. 38: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

	Smyková rychlost $\gamma = 1,34 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		Smyková rychlost $\gamma = 4,47 \text{ [s}^{-1}\text{]}$	
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	4,64	0,00	3,91	0,00
Dispergace 1	4,51	-2,78	3,65	-6,68
Dispergace 2	4,49	-3,36	3,72	-4,77
Dispergace 3	4,76	2,54	3,82	-2,36
Dispergace 4	5,17	11,33	4,24	8,34

Tab. 39: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

	Smyková rychlost $\gamma = 39,28 \text{ [s}^{-1}\text{]}$	
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	3,38	0,00
Dispergace 1	3,06	-9,41
Dispergace 2	3,07	-9,11
Dispergace 3	3,11	-7,95
Dispergace 4	3,50	3,49

6.4 Dispergace - ultrazvuk

Tab. 40: Parametry dispergace ultrazvukem

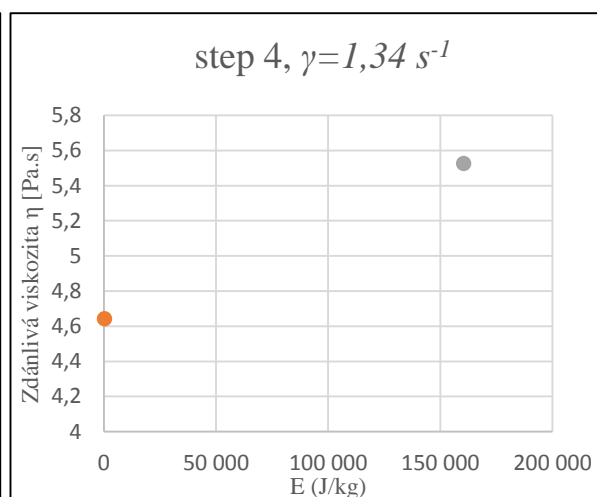
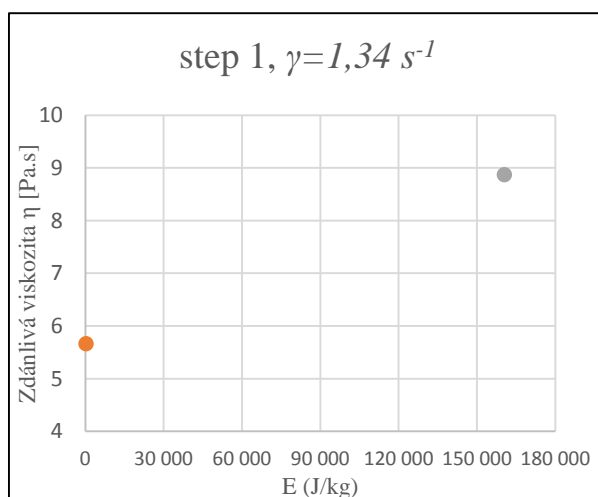
ULTRAZVUK							
Vzorek	n (1/min)	t (min)	m (g)	P (W)	ϵ (W/kg)	E (J/kg)	ϵ_{\max} (W/kg)
Homogenizace	1500	7	1058,74	0,89	1	353	-
Dispergace 1	-	27	963,25	300,00	311	160156	31773

Tab. 41: Homogenizace – parametry K a n

Tab. 42: Dispergace 27 min – parametry K a n

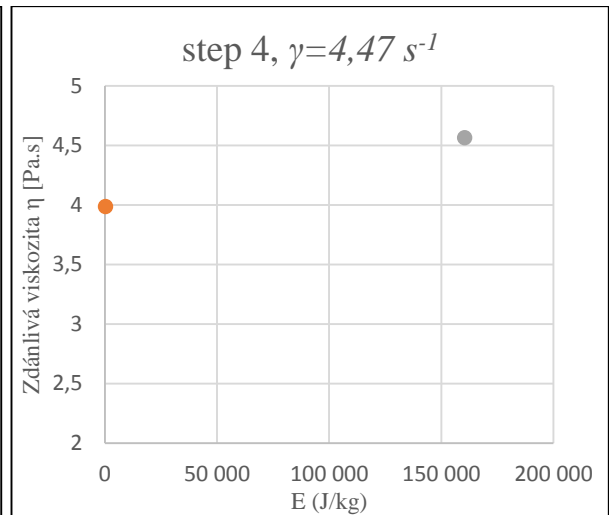
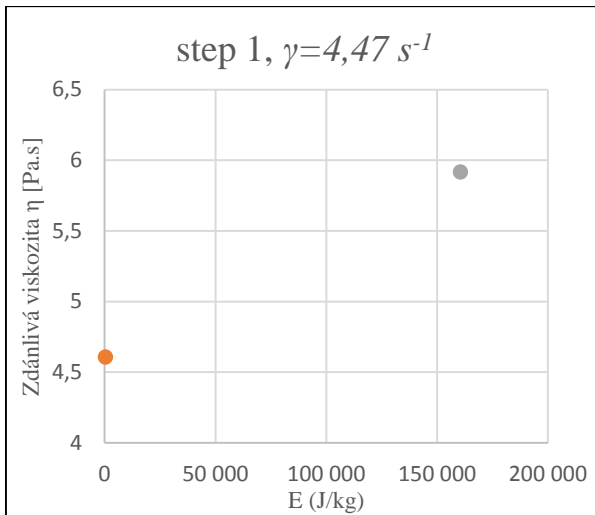
step	K1	K2	n1	n2
1	5,95	5,33	0,83	0,89
2	5,07	4,45	0,85	0,93
3	5,43	5,07	0,87	0,90
4	4,82	4,37	0,87	0,93

step	K1	K2	n1	n2
1	9,79	7,26	0,66	0,84
2	6,02	5,09	0,82	0,93
3	6,63	6,09	0,85	0,88
4	5,79	4,99	0,84	0,94

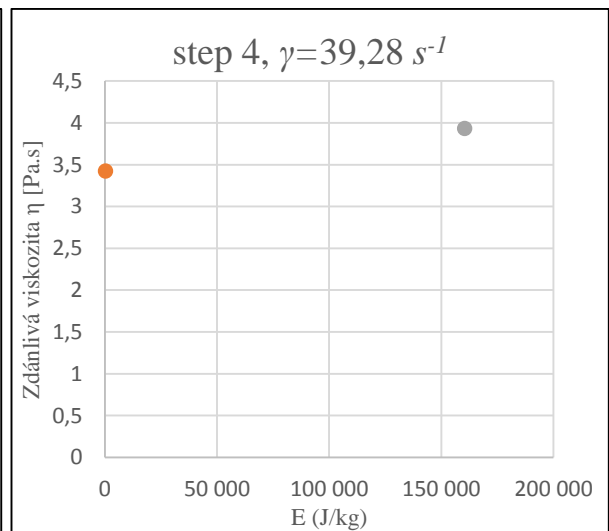
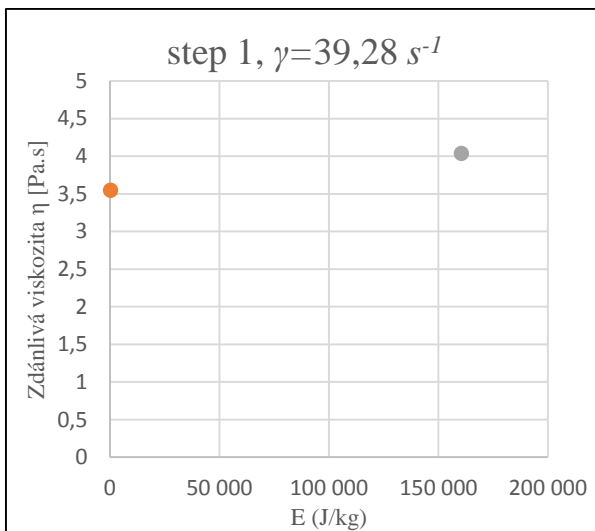


Obr. 65: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Obr. 66: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 67: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)
Obr. 68: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 69: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)
Obr. 70: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 43: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)
Tab. 44: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 1,34 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	5,66	0,00
Dispergace 1	8,87	56,69

Smyková rychlost $\gamma = 4,47 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	4,61	0,00
Dispergace 1	5,92	28,43

Tab. 45: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 39,28 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	3,55	0,00
Dispergace 1	4,04	13,73

Tab. 46: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 47: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 1,34 \text{ [s}^{-1}\text{]}$			Smyková rychlost $\gamma = 4,47 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]		$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	4,64	0,00	Homogenizace	3,99	0,00
Dispergace 1	5,53	19,01	Dispergace 1	4,57	14,53

Tab. 48: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$)

Smyková rychlost $\gamma = 39,28 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
	$\eta \text{ [Pa.s]}$	Rozdíl [%]
Homogenizace	3,43	0,00
Dispergace 1	3,93	14,81

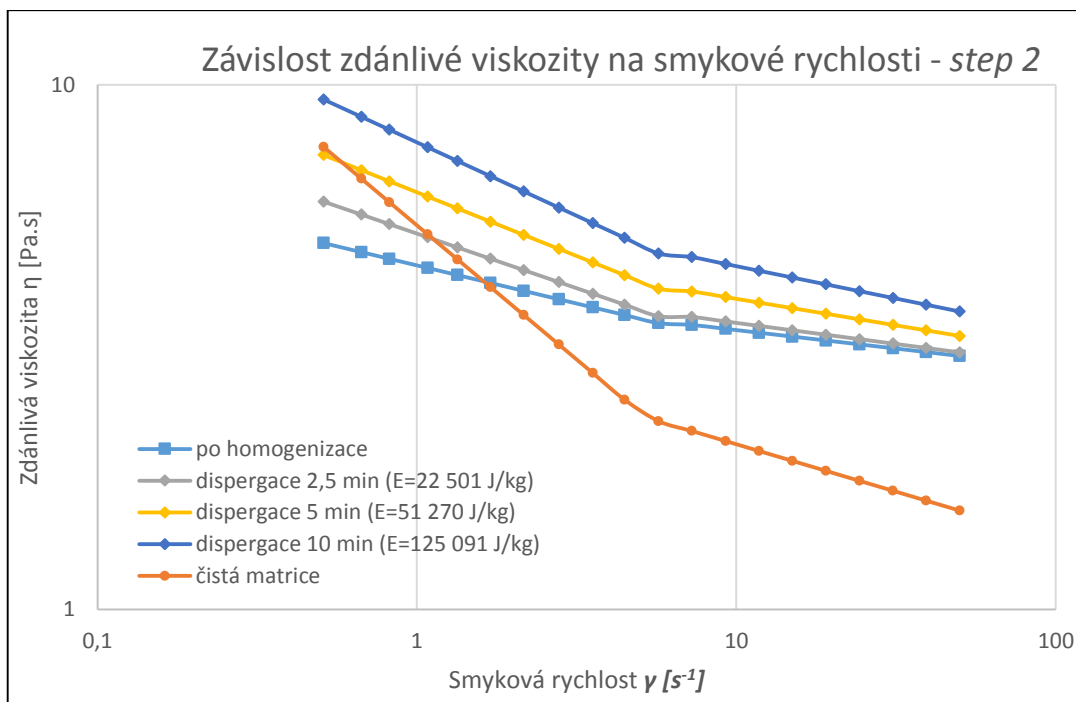
7. Diskuze

V této kapitole budu diskutovat zjištěné výsledky uvedené v kapitole 6. Nejprve však popíšu strukturu zde prezentovaných výsledků. Celkem byly provedeny 4 měření se třemi různými technologiemi dispergace. Odlišeny jsou následovně: stator-rotor (a), stator-rotor (b), zubové míchadlo a ultrazvuk. V průběhu dispergace danou technologií byl po zvoleném časovém kroku odebrán vzorek, který byl podroben měření tokových vlastností. V úvodu každého měření je uvedena tabulka popisující nastavené okrajové hodnoty. Tím se rozumí počet odebíraných vzorků, doba dispergace, hmotnost dispergovaného vzorku a nastavené otáčky (příp. příkon). Tabulka obsahuje též dopočítanou disipovanou energii pro každý časový krok odebraného vzorku. Dále následují tabulky s určenými hodnotami koeficientu konzistence K a indexu toku n pro všech 6 kroků a každý měřený bod. Po tomto jsou uvedeny grafy s vynesenu závislostí zdánlivé viskozity a disipované energie pro danou smykovou rychlost. Byly vybrány grafy pouze pro kroky 1 a 4 a smykové rychlosti 1,34, 4,47 a 39,28 s⁻¹. V závěru každého měření jsou tabulky, které ukazují procentuální nárůst zdánlivé viskozity vůči viskozitě po homogenizaci pro kroky 1 a 4 při smykové rychlosti 1,34, 4,47 a 39,28 s⁻¹.

V první řadě bych se zde zaměřil na společné rysy všech měření, které jsou pozorovatelné z výsledných hodnot. Všechny vzorky vykazovaly ve všech bodech měření tixotropické chování. Toto chování však bylo nejvíce výrazné v prvním kroku zatěžování. Shodně zde všechny vzorky vykazovaly vyšší hodnoty K a nižší hodnoty n než v ostatních krocích. Předpokládám, že je toto způsobeno pravděpodobně tím, že částice jsou ve vzorku uspořádané chaoticky s různou orientací. Efektem tohoto chaotického uspořádání je vyšší tření ve vzorku, což způsobuje vyšší projev tixotropie a nárůst určovaných parametrů. Další kroky byly již poměrně vyrovnány a hodnoty K a n se od sebe příliš nelišily. Toto mohlo být způsobeno tím, že nanočástice, byly vystaveny dalším smykovým napětím a toku v úzké štěrbině, což mělo za následek změnu orientace částic. Ty se staly orientovány a snížily tak tření ve vzorku. Nejvyšší projev tixotropie je tedy patrný v prvním kroku. Další časové působení již nemá takový vliv.

Všechny výše uvedené výsledky jednoznačně prokazují vliv dispergace na změnu tokových vlastností. Konkrétně, že s úrovní dispergace dochází k nárůstu zdánlivé viskozity. Byly tedy potvrzeny předpoklady uvedeny v kapitole 4 – rozbor souvisejících experimentálních prací. Ve všech měření je též patrné, že s rostoucí smykovou rychlostí dochází ke zmenšování rozdílu zdánlivých viskozit.

Nejprve jsem provedl měření čisté matrice LV EPS 620 bez přídavku nanočástic pro ověření mocninného modelu chování tekutiny, což bylo měřením potvrzeno. Samotná matrice vykazovala poměrně vysokou zdánlivou viskozitu při nízkých smykových rychlostí, ovšem s rostoucí smykovou rychlostí vykazovala rychlý pokles.



Obr. 71: Porovnání zdánlivé viskozity čisté matrice a matrice s nanočásticemi po dispergaci
Na obrázku je porovnání závislosti zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro čistou matrici a pro matrici s přidávkou nanočástic dispergovaných technologií stator-rotor (a).

Z uvedených výsledků vykazovalo měření stator-rotor (a) nejvyšší změny tokových vlastností. Konkrétně v kroku 1 při smykové rychlosti $1,34 \text{ s}^{-1}$ byl nárůst zdánlivé viskozity vůči viskozitě po homogenizaci 95%. V kroku 2 pro smykovou rychlost $1,34 \text{ s}^{-1}$ byl nárůst nižší než v kroku 1 – 63 %. Tento rozdíl je způsoben výše zmíněným tixotropickým chováním. Se zvyšováním smykové rychlosti docházelo ke snižování tohoto procentuálního nárůstu viskozity.

Naproti tomu měření stator-rotor (b) vykazovalo nižší procentuální nárůst viskozity, a to navzdory tomu, že zde byly delší časy dispergace než u měření stator-rotor (a). Maximální nárůst viskozity byl 50 % pro krok 1 a smykovou rychlost $1,34 \text{ s}^{-1}$. Celková vložená energie byla $420\,000 \text{ J/kg}$ a dle rovnice 7, potažmo 9 by měl být nárůst viskozity vyšší. Předpokládám, že zásadní problém, proč tomu tak není, je z důvodu nedostatečného chlazení vzorku. Při delší době dispergace míchadlem stator-rotor docházelo k výraznému lokálnímu přehřívání vzorku. Celý vzorek vykazoval citelný nárůst teploty. Domnívám se, že v oblasti maximální disipace energie (vnitřní objem statoru) docházelo k degradaci organických složek nátěrového systému a docházelo k varu. Toto mělo za následek vznik plynů, které byly okamžitě dispergovány do celého objemu vsádky. Z důvodu vysoké viskozity byly tyto bubliny uzavřeny ve vsádce a vznikla tak směs kapalina-částice-plyn, což pravděpodobně mělo vliv na snížení viskozity vzorku.

V případě dispergace zubovým míchadlem byl maximální nárůst viskozity pro krok 1 a smykovou rychlost $1,34 \text{ s}^{-1}$ ovšem ne pro celkovou disipovanou energii (dispergace 4), nýbrž pro vzorek dispergace 3. Pro krok 4 již nárůst viskozity byl nepatrný a dokonce v některých případech došlo i k poklesu. Jak je tedy vidět, dispergace pomocí zubového míchadla dosahuje značně horších výsledků než dispergace pomocí míchadla stator-rotor. Horší výsledky potvrzuje i fakt, že maximální

míra disipace energie je až čtyřnásobně menší než v případě technologie stator-rotor ($\varepsilon_{max}(ZM) < \varepsilon_{max}(SR)$). Zubovým míchadlem nejsme schopni dispergovat částice na tak malé rozměry jako u míchadla stator-rotor a proto nemůže být tak velký rozdíl ve viskozitě. Jako důvod, proč nedošlo k nejvyššímu nárůstu viskozity pro nejvyšší dodanou energii (dispergace 4) shledávám možnost vzniku směsi kapalina-částice-plyn z toho důvodu, že nastavené otáčky pro dispergaci 4 byly vyšší. Zubové míchadlo způsobovalo rotaci vzorku v nádobě bez narážek a také „kmitání“ hladiny s občasným vznikem vírů, které přisávaly vzduch nad hladinou.

Posledním měřením byla dispergace využívající technologii ultrazvuku. Nejvyšší nárůst viskozity opět vykazuje krok 1 pro smykovou rychlost $1,34 \text{ s}^{-1}$, a to 54 %. Z rešerše (konkrétně z obrázku 1) je však zřejmé, že dispergací ultrazvukem bychom měli dosáhnout nejmenšího rozměru částic a tím pádem i teoreticky nejvyššího nárůstu viskozity. Toto potvrzuje i maximální míra disipace energie $\varepsilon_{max}(ULT)$, která je trojnásobně vyšší než v případě technologie stator-rotor. Důvod, proč k tomu nedošlo, je pravděpodobně způsoben tím, že k dispergaci dochází pouze v úzkém filmu na ultrazvukové sondě. Tudíž došlo ke značné lokální dispergaci, ovšem nebyla zajištěna dostatečná cirkulace vsádky. Domnívám se tedy, že značnou dobu dispergace nedocházelo k rozbíjení shluků, ale pouze k ohřevu vzorku. Ultrazvuk ve velmi krátkém čase provedl maximální dispergaci dosažitelnou touto metodou a po zbývajícím čase pouze tuto oblast ohříval z důvodu nedostatečného odvodu a přívodu další suspenze.

Při porovnání mých výsledků s výsledky Zoubka (2015) je patrné, že došlo k obdobné shodě. Zoubek testoval vliv technologie dispergace na technologické vlastnosti nátěru, především pak abrazi-vzdornost. Stejně jako u Zoubka, kdy nejlepší technologické parametry vykazoval vzorek dispergovaný míchadlem stator-rotor po velmi krátkou dobu (1,5 min), tak i v mém případě vykazoval nejvyšší nárůst viskozity vzorek dispergovaný stejnou technologií pro nejkratší časy.

V tabulkách 49 a 50 je uvedeno shrnutí s vyjádřeným maximálním procentuálním nárůstem zdánlivé viskozity a odpovídající disipované energii. Pokud bychom vycházeli čistě z teorie uvedené v kapitole 3 zabývající se vlivem disipované energie na velikost částic, logicky bychom dospěli k výsledku, že měření stator-rotor (b) by dosáhlo nejvyššího stupně dispergace (nejmenšího rozměru částic) a tím i teoreticky k nejvyššímu nárůstu zdánlivé viskozity. Ve skutečnosti tomu tak však nebylo. Je tedy velmi důležité brát v potaz i značný vliv okrajových podmínek. Mezi tyto okrajové podmínky patří především náchylnost na tvorbu směsi kapalina-částice-plyn vlivem lokálního varu nátěrové hmoty a nedostatečným odvodem tepla. Je patrné, že dispergace je velmi závislá na použité technologii.

Tab. 49: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou metodu dispergace a odpovídající disipované energii (krok1)

Metoda dispergace	Nejvyšší procentuální nárůst [%]	Odpovídající disipovaná energie E [J/kg]	Odpovídající krok	Odpovídající smyková rychlost γ [s^{-1}]
stator-rotor(a)	94,98	125 480	1	1,34
stator-rotor(b)	50,26	420 121	1	1,34
zubové míchadlo	36,07	102 918	1	1,34
ultrazvuk	56,69	160 508	1	1,34

Tab. 50: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou metodu dispergace a odpovídající disipované energii (krok4)

Metoda dispergace	Nejvyšší procentuální nárůst [%]	Odpovídající disipovaná energie E [J/kg]	Odpovídající krok	Odpovídající smyková rychlost γ [s^{-1}]
stator-rotor(a)	64,31	125 480	4	1,34
stator-rotor(b)	22,49	420 121	4	1,34
zubové míchadlo	11,33	171 181	4	1,34
ultrazvuk	19,01	160 508	4	1,34

Z výše uvedených měření a výsledků vyplývá, že nejvhodnější pro dispergaci nátěrového systému LV EPS 620 s přídavkem 1% hm. koncentrace nanočástic je použití míchadla stator-rotor, které vykazovalo nejlepší výsledky. Nutnou podmínkou dispergace je však zaručit dostatečné chlazení v okolí dispergované oblasti.

Výsledky a závěry potvrzují, že předpoklad využití změny tokových vlastností pro hodnocení úrovně dispergace je možné. Nutnou podmínkou je však zamezit vzniku směsi kapalina-částice-plyn. Tudíž doporučuji následující okrajové podmínky.

1. Vhodnou volbu dispergační technologie.
2. Zajištění dostatečné cirkulace vsádky tak, aby co nejvíce disperze prošlo opakovaně přes oblast nejvyšších smykových napětí, tedy oblast nejvyšší lokální disipace energie.
3. Dodržení optimální teploty vsádky a především chlazením oblasti s nejvyšší dispergační energií.

Volbou vhodné dispergační technologie můžeme významně snížit rychlost lokálního přehřívání (př. stator-rotor *versus* ultrazvuk) a tím omezit vznik plynné fáze. Cirkulace vsádky je nutná v případě použití technologie dispergace pomocí ultrazvuku. V případě technologie zubového míchadla nebo stator-rotor míchadla je cirkulace vsádky zajištěna čerpacím účinkem těchto míchadel. Závěrečné doporučení je zajistit udržování teploty tak, aby se zabránilo degradaci nátěrové hmoty, jejímu varu a tím i vzniku plynné fáze.

8. Závěr

Níže jsou bodově uvedeny nejpodstatnější zjištění, ke kterým tato práce dospěla.

1. Byla provedena rešerše zabývající se popisem různých technologií dispergace, závislosti velikosti částic na dodané energii, základní charakteristikou nátěrových systémů a také je zde uvedena základní teorie reologie.
2. Provedená experimentální část jednoznačně prokázala a potvrdila předpoklad, že úroveň dispergace má vliv na tokové vlastnosti nátěrové hmoty LV EPS 620 s přidanými nanočásticemi MWCNT o koncentraci 1 % hm.
3. Nejlepších výsledků dosahovala dispergace míchadlem typu stator-rotor firmy IKA T25 s rotorem SG-25G. Pro krátké doby dispergace (2,5 min, 2,5 min a 5 min) a celkové disipované energie $E = 125\ 480\ \text{J/kg}$ dosahoval nárůst zdánlivé viskozity až 95 % v porovnání se zdánlivou viskozitou po homogenizaci.
4. Nejhorší výsledky vykazovala dispergace pomocí zubového míchadla. Většina bodů zde vykazovala minimální nárůst viskozity a to i při celkové disipované energii $E = 171\ 181\ \text{J/kg}$.
5. Velmi důležitým parametrem při dispergaci je dispergační energie (ε_{max}) v dispergační zóně, která se zásadně liší pro různé technologie. Jinak řečeno, v průběhu procesu je výrazně jiná disipovaná energie v dispergační zóně a zbylý objem je jen zásobníkem sádky. Z tohoto důvodu není úroveň dispergace tolik závislá na celkové dodané energii a například zubové míchadlo vykazuje výrazně horší výsledky i při vyšší celkové dispergované energii než v případě měření stator-rotor (a) a to právě z důvodu $\varepsilon_{max}ZM < \varepsilon_{max}SR$.
6. Z důvodu nevhodného sestavení experimentu dispergace pomocí technologie ultrazvuku, doporučuji provést opakování tohoto experimentu se zajištěním axiálního obtékání sondy. Jako alternativu by bylo možné použít i cirkulační míchadlo. V průmyslovém měřítku se však dispergace pomocí ultrazvuku nepoužívá. Její využití je především pro speciální laboratorní účely.

Tato práce jednoznačně prokázala dostatečně vysoký vliv úrovně dispergace na tokové vlastnosti nátěrové hmoty. Na základě toho by mohla být navržena nová metoda hodnocení dispergace. Musí být však splněn nejdůležitější předpoklad – dostatečné chlazení disperze v oblasti blízké maximální disipované energie z důvodu zamezení degradace nátěrového systému a vzniku směsi kapalina-částice-plyn. V budoucnu by bylo možné navrhnout pro přesně daný typ dispergátoru vztah, který by popisoval úroveň dispergace jako funkci příkonu dispergátoru. Průmyslově by tak bylo možné dle otáček, průměru a typu míchadla určit potřebnou dobu dispergace. Nahradilo by se tím tedy nepřesné, a pro nanočástice nepoužitelné, měření pomocí grindometru.

Použitá literatura a zdroje

- ATIEMO-OBENG, V. A. and CALABRESE, R. V. (2004). Rotor–Stator Mixing Devices, in *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice* (eds PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A. and KRESTA, S. M.), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/0471451452.ch8.
- BARNES, H. A., HUTTON and K. WALTERS. (1989). *An introduction to Rheology*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier science publishers B.V. ISBN 0-444-87140-3.
- HOWARD, A. Barnes. (1994). Rheology of emulsions - a review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 91, Pages 89-95, ISSN 0927-7757, [http://dx.doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)02719-U](http://dx.doi.org/10.1016/0927-7757(93)02719-U).
- HOWARD, A. Barnes. (1997). Thixotropy - a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Volume 70, Issues 1–2, Pages 1-33, ISSN 0377-0257, [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0257\(97\)00004-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0257(97)00004-9).
- BIELEMAN, J. (2000). *Additives for coatings [online]*. Weinheim, Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-61331-1. <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=481930>
- BYK GARDNER [online]. (©2015) [cit. 9. 4. 2015]. *Fineness of Grind Gages*. Dostupné z: http://www.byk.com/fileadmin/byk/support/instruments/technical_information/datasheets/English/Physical%20Test/Dispersion/Dispersion_Technologies.pdf
- ČSN EN ISO 1524 Nátěrové hmoty a tiskové barvy – Stanovení jemnosti stření. Praha: ÚNMZ, září 2013.
- DITL, P., NOVÁK, V., RIEGER, F. (1981). Dispergace v kapalinách s rychloběžnými míchadly. *Chemický průmysl*, Vol. 31/56, No. 1, p. 3-10.
- FAN-LONG, JIN and PARK, Soo-Jin. (2013) [cit. 26. 5. 2015]. *Recent Advances in Carbon-Nanotube-Based Epoxy Composites*. [online]. *Carbon letters*. DOI: 10.5714/CL.2012.14.1.001.
- HIELSHER, T. (2005). Ultrasonic Production of Nano-Size Dispersions and Emulsions. ENS 2005, Paris, France. *TIMA Editions*, p. 138-143.
- HINZE, J. O. (1955). Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE J.*, 1: 289–295. doi: 10.1002/aic.690010303
- IKA® Werke GmbH & Co. [online]. (©2015) [cit. 6. 4. 2015]. Disperse Brochure. Dostupné z: http://www.ika.com/ika/pdf/flyer-catalog/Disperser_Brochure_EN_wop_web_screen.pdf
- IKA WORKS [online]. (©2013) [cit. 6.4.2015]. Process Technology. Dostupné z: http://www.ikausa.com/wp-content/uploads/2013_IKA-Process-Technology.pdf
- JAFARI, S. M., He, Y., BHANDARI, B. (2007). Production of sub-micron emulsions by ultrasound and microfluidization techniques. *Journal of Food Engineering*, Vol. 82, p. 478-488.
- KARBSTEIN, H. and SCHUBERT, H. (1995). Development in continuous mechanical production of oil-in-water macro emulsions. *Chem. Eng. Process.*, Vol. 34, p. 205 – 211.

- KOLMOGOROFF, A. N. (1941a). The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Compt. Rend. Acad. Sci. USSR*, Vol. 30, p. 301–305.
- KOLMOGOROFF, A. N. (1941b). Dissipation of energy in locally isotropic turbulence. *Compt. Rend. Acad. Sci. USSR*, Vol. 32, p. 16–18.
- KONIJN, B. J., SANDERINK, O. B. J. and KRUYT, N. P. (2014). Experimental study of the viscosity of suspensions: Effect of solid fraction, particle size and suspending liquid. *Powder Technology*, Vol 266, p. 61-69, ISSN 0032-5910. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.05.044.
- KOVAŘÍK, M. (2015). *Technologie výroby moderních barviv*. Praha: ČVUT. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta strojní, ústav procesní techniky
- KRAUS, V. (2000). *Povrchy a jejich úpravy*. ZČU Plzeň. 174 stran
- KVÍTEK, L. a PANÁČEK, A. (2007). *Základy koloidní chemie*. Katedra fyzikální chemie, přírodovědecká fakulta univerzity Palackého. Olomouc. Dostupné z: <http://fch.upol.cz/skripta/kol/koch.pdf>
- LAMBOURNE, R. and STRIVENS, T. (1999). *Paint and surface coatings: theory and practice*. 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew Pub., 784 p. ISBN 18-842-0773-1.
- LENG, D. E. and CALABRESE, R. V. (2004). Immiscible Liquid–Liquid Systems, in *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice* (eds PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A. and KRESTA, S. M.), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/0471451452.ch12.
- NGUYEN, C. T., DESGRANGES, F., ROY, et al. (2007). Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, Issue 6, p. 1492-1506, ISSN 0142-727X, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004.
- NOVÁKOVÁ, T., ŠVÁB, M., ŠVÁBOVÁ, M. (2009). Využití nanočástic v dekontaminačních technologiích: současný stav. *Chemické listy*, 200, Vol 103, p. 524-532.
- OLHERO, S. M. and FERREIRA, J. M. F. (2004). Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspensions. *Powder Technology*, Vol. 139, Issue 1, p. 69-75, ISSN 0032-5910, DOI: 10.1016/j.powtec.2003.10.004.
- PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A. and KRESTA, S. M. (2004). *Handbook of industrial mixing: science and practice*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. ISBN 0-471-26919-0.
- RAWLE, A. (2002). The importance of particle sizing to the coatings industry. Part 1: Particle sizing measurement. *Advances in Colour Science and Technology*, Vol. 5, Issue 1, p. 1-12.
- REILLY, M. R. (2007). Carbon Nanotubes: Potential Benefits and Risks of Nanotechnology in Nuclear Medicine. *J Nucl Med*, Vol. 48, no. 7, p. 1039-1042
DOI: 10.2967/jnumed.107.041723.

- RUDYAK, V.Ya. (2013). Viscosity of Nanofluids. Why It Is Not Described by the Classical Theories. *Advances in Nanoparticles*, Vol. 2, p. 266-279. DOI:10.4236/anp.2013.23037.
- RUDYAK, V.Ya. and KRASNOLUTSKII. (2014). Dependence of the viscosity of nanofluids on nanoparticle size and materiál. *Physics Letters A*, Vol. 378, Issues 26–27, p. 1845-1849. ISSN 0375-9601, DOI: 10.1016/j.physleta.2014.04.060.
- TADMOR, Z. and GOGOS, C. G. (2006). *Principles of polymer processing*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. ISBN 0-471-38770-3.
- TIMOFEEVA, E. V., et al. (2010). Particle Size and Interfacial Effects on Thermo-Physical and Heat Transfer Characteristics of Water-Based α -SiC Nanofluids. *Nanotechnology*, Vol. 21, No. 21. DOI: 10.1088/0957-4484/21/21/215703.
- UNIVERZITA PARDUBICE [online]. (2001). *Hodnocení vlastností nátěrových hmot*. Univerzita Pardubice. Dostupné z: www.upce.cz/fcht/uchtml/onhop/studijni-materialy/hodnoc-mech-vlast
- VIERA, M. G. And PERES, A. E. C. (2012). Effect of Reagents on the Rheological Behavior of an Iron Ore Concentrate Slurry. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, Vol. 1, p. 38-42. DOI: 10.5923/j.mining.20120102.03.
- WELTMANN, R. N. and GREEN, H. (1943). Rheological Properties of Colloidal Solutions, Pigment Suspensions, and Oil Mixtures. *Journal of applied physics*, Vol. 14, p. 569-576.
- XIE, L. et. al. (2007). Dispersion of nano-particle clusters using mixed flow and high-shear impellers in stirred tanks. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 85, p. 676-684.
- ZHOU, G. And KRESTA, S. M. (1998). Correlation of mean drop size and minimum drop size with the turbulence energy dissipation and the flow in an agitated tank, *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, Issue 11, p. 2063-2079, ISSN 0009-2509, DOI: 10.1016/S0009-2509(97)00438-7.
- ZOUBEK, M. (2015) [cit. 20. 5. 2015]. Vliv technologie přípravy kompozitních nátěrových hmot s příměsí funkčních plniv na aplikační a funkční vlastnosti. In: *STČ: studentská tvůrčí činnost, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 16. dubna 2015* [online]. Praha: ČVUT v Praze. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5533.pdf?_=1428569359
- ZOUBEK, M. (2013). *Vliv nanočástic na vlastnosti nátěrové hmoty*. Praha: ČVUT. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta strojní, ústav technologie.

Seznam příloh

Přílohy jsou v elektronické verzi vytvořené v programu Microsoft Excel 2013 a připojené na elektronickém nosiči (CD) spolu s diplomovou prací.

Příloha A

- A. 0 – Cista matrice
- A. 1 – SR(a)HOM
- A. 2 – SR(a)DIS1
- A. 3 – SR(a)DIS2
- A. 4 – SR(a)DIS3
- A. 5 – SR(a) vyhodnocení

Příloha B

- B. 1 – SR(b)HOM
- B. 2 – SR(b)DIS1
- B. 3 – SR(b)DIS2
- B. 4 – SR(b)DIS3
- B. 5 – SR(b) vyhodnocení

Příloha C

- C. 1 – ZMHOM
- C. 2 – ZMDIS1
- C. 3 – ZMDIS2
- C. 4 – ZMDIS3
- C. 5 – ZMDIS4
- C. 6 – ZM vyhodnocení

Příloha D

- D. 1 – ULTHOM
- D. 2 – ULTDIS1
- D. 3 – ULT vyhodnocení

Seznam obrázků

Obr. 1: Dosažitelná velikost částic pro danou metodu.....	11
Obr. 2: Poměr adhezních a gravitačních sil v závislosti na velikosti částic v suspenzi.....	12
Obr. 3: Základní typy vysoko-smykových míchadel.....	14
Obr. 4: Zubové míchadlo ekatomizér.....	15
Obr. 5: Postup dispergace v míchadle typu stator-rotor.....	15
Obr. 6: Schématicky znázorněná geometrie koloidního míchadla „stator-rotor“.....	16
Obr. 7: Konfigurace drážkovaného koloidního mlýnu.....	16
Obr. 8: Ilustrační obrázek postupné dispergace v míchadle Ultra-Turrax.....	17
Obr. 9: Detail dispergační hlavice míchadla Ultra-Turrax.....	17
Obr. 10: Provedení statoru radiálního míchadla stator-rotor.....	18
Obr. 11: Stator-rotor firmy Chemineer Greerco – jedno-patrové provedení.....	18
Obr. 12: Stator-rotor firmy Chemineer Greerco – dvou-patrové provedení.....	18
Obr. 13: Vsádkový dispergátor stator-rotor firmy Silverson.....	19
Obr. 14: Průtočný dispergátor firmy Silverson.....	19
Obr. 15: Schéma zařízení využívající ultrazvukové dispergace.....	20
Obr. 16: Grindometr.....	21
Obr. 17: Zobrazení a) SWCNT, b) DWCNT.....	25
Obr. 18: Reogram pro kladný gradient rychlosti.....	27
Obr. 19: Pseudoplastické chování.....	28
Obr. 20: Graf závislosti velikosti částic, viskozity a smykové rychlosti.....	31
Obr. 21: Závislost viskozity na velikosti částic.....	31
Obr. 22: Závislost viskozity na teplotě pro dané velikosti částic křemíku.....	32
Obr. 23: Závislost velikosti částic, objemové koncentrace a viskozity.....	32
Obr. 24: Závislost velikosti částic, objemové koncentrace a viskozity.....	33
Obr. 25: Abrazivní odolnost.....	35
Obr. 26: Pracoviště měření tokových vlastností.....	37
Obr. 27: IKA T25 – SR-25G.....	38
Obr. 28: Zjednodušená geometrie stator-rotor míchadla.....	38
Obr. 29: (vlevo) Rychlostní profil na výstupu ze statoru.....	39
Obr. 30: (vpravo) Rychlostní profil v objemu rotoru.....	39
Obr. 31: (vpravo) Kontury rychlostního pole při pohledu na půdorys („od spodu“) na stator-rotor.....	39
Obr. 32: (vlevo) Kontury rychlostního pole v řezu stator-rotor míchadla.....	39
Obr. 33: (vlevo) Rychlostní profil v řezu kolmém k ose.....	40
Obr. 34: (vpravo) Detail obrázku 33 s viditelným výtokem a přísáváním.....	40
Obr. 35: Detail použitého zubového míchadla.....	40
Obr. 36: Ultrazvukový generátor GM3400.....	41
Obr. 37: Sonda VS200T.....	42
Obr. 38: Uspořádání experimentů.....	42
Obr. 39: Postup měření časově závislého chování.....	43
Obr. 40: Toková křivka pro rozsah smykových napětí od 0,51 s ⁻¹ do 5,71 s ⁻¹	45
Obr. 41: Toková křivka pro rozsah smykových rychlostí od 5,71 s ⁻¹ do 49,98 s ⁻¹	45
Obr. 42: Zdánlivá viskozita funkcí smykové rychlosti.....	47
Obr. 43: Reogram pro měření technologií stator-rotor (a), krok 1.....	47
Obr. 44: Tixotropické chování měřených vzorků.....	48
Obr. 45: Nárůst zdánlivé viskozity.....	48
Obr. 46: Shrnující tabulka příloh.....	49
Obr. 47: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 1, $\gamma=1,34$ s ⁻¹).....	50
Obr. 48: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 4, $\gamma=1,34$ s ⁻¹).....	50
Obr. 49: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 1, $\gamma=4,47$ s ⁻¹).....	51
Obr. 50: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 4, $\gamma=4,47$ s ⁻¹).....	51
Obr. 51: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 1, $\gamma=39,28$ s ⁻¹).....	51
Obr. 52: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (a). (krok 4, $\gamma=39,28$ s ⁻¹).....	51
Obr. 53: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 1, $\gamma=1,34$ s ⁻¹).....	53
Obr. 54: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 4, $\gamma=1,34$ s ⁻¹).....	53
Obr. 55: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 1, $\gamma=4,47$ s ⁻¹).....	53
Obr. 56: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 4, $\gamma=4,47$ s ⁻¹).....	53
Obr. 57: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 1, $\gamma=39,28$ s ⁻¹).....	54

Obr. 58: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – S-R (b), (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	54
Obr. 59: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	56
Obr. 60: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	56
Obr. 61: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	56
Obr. 62: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	56
Obr. 63: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	56
Obr. 64: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	56
Obr. 65: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	58
Obr. 66: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	58
Obr. 67: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	59
Obr. 68: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	59
Obr. 69: (vlevo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	59
Obr. 70: (vpravo) Závislost zdánlivé viskozity (η) na vložené energii (E) – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	59
Obr. 71: Porovnání zdánlivé viskozity čisté matrice a matrice s nanočásticemi po dispergaci.....	62

Seznam tabulek

Tab. 1: Dosažitelná velikost částic pro danou metodu - shrnující tabulka.....	11
Tab. 2: Složky nátěrových hmot a jejich stručná charakteristika.....	22
Tab. 3: Typy filmotvorných složek.....	23
Tab. 4: Označení vzorků pro prováděný experiment.....	34
Tab. 5: Parametry ultrazvukového dispergátoru.....	41
Tab. 6: Parametry dispergace metodou stator-rotor (a).....	50
Tab. 7: (vlevo) Homogenizace – parametry K a n.....	50
Tab. 8: (vpravo) Dispergace 2,5 min – parametry K a n.....	50
Tab. 9: (vlevo) Dispergace 5 min – parametry K a n.....	50
Tab. 10: (vpravo) Dispergace 10 min – parametry K a n.....	50
Tab. 11: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	51
Tab. 12: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	51
Tab. 13: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	52
Tab. 14: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	52
Tab. 15: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	52
Tab. 16: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (a), (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	52
Tab. 17: Parametry dispergace metodou stator-rotor (b).....	52
Tab. 18: (vlevo) Homogenizace – parametry K a n.....	53
Tab. 19: (vpravo) Dispergace 15 min – parametry K a n.....	53
Tab. 20: (vlevo) Dispergace 25 min – parametry K a n.....	53
Tab. 21: (vpravo) Dispergace 32,5 min – parametry K a n.....	53
Tab. 22: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	54
Tab. 23: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	54
Tab. 24: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	54
Tab. 25: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	54
Tab. 26: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	54
Tab. 27: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – S-R (b), (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	55
Tab. 28: Parametry dispergace zubovým míchadlem.....	55
Tab. 29: (vlevo) Homogenizace – parametry K a n.....	55
Tab. 30: (vpravo) Dispergace 5 min – parametry K a n.....	55
Tab. 31: (vlevo) Dispergace 10 min – parametry K a n.....	55
Tab. 32: (vpravo) Dispergace 15 min – parametry K a n.....	55
Tab. 33: Dispergace 25 min – parametry K a n.....	55
Tab. 34: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	57
Tab. 35: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	57
Tab. 36: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	57
Tab. 37: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	57
Tab. 38: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	57
Tab. 39: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – zubové míchadlo (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	57
Tab. 40: Parametry dispergace ultrazvukem.....	58
Tab. 41: Homogenizace – parametry K a n.....	58

Tab. 42: Dispergace 27 min – parametry K a n	58
Tab. 43: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$)	59
Tab. 44: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	59
Tab. 45: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 1, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	60
Tab. 46: (vlevo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=1,34 \text{ s}^{-1}$).....	60
Tab. 47: (vpravo) Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=4,47 \text{ s}^{-1}$).....	60
Tab. 48: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou smykovou rychlost – ultrazvuk (krok 4, $\gamma=39,28 \text{ s}^{-1}$).....	60
Tab. 49: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou metodu dispergace a odpovídající disipované energii (krok1).....	63
Tab. 50: Nárůst zdánlivé viskozity pro danou metodu dispergace a odpovídající disipované energii (krok4).....	64