

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



**DISPERGAČNÍ ZAŘÍZENÍ V TECHNOLOGII VÝROBY
MODERNÍCH NÁTĚROVÝCH SYSTÉMŮ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

RADOMÍR FILIP



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pro: **Radomír Filip**

Program: B2341 Strojírenství

Obor: 2302R042 Energetika a procesní technika

Název tématu: **Dispergační zařízení v technologii výroby moderních nátěrových systémů**

Title: **Dispersing equipment in production technology of mod-ern coating systems**

Zásady pro vypracování:

V rámci práce popište a porovnejte jednotlivé dispergační technologie a zařízení v technologii výroby moderních nátěrových systémů. Zaměřte se zejména na dispergaci v technologii výroby nátěrových systémů tvořených mikro až nano částicemi dispergovanými ve vodou ředitelné matrici. V rámci práce zpracujte následující dílčí cíle:

1. Zpracujte rešerši zaměřenou na dispergační technologie a zařízení.
2. Charakterizujte procesní parametry dispergačních zařízení využitelných v technologii dispergace vodou ředitelných nátěrových disperzí.
3. Proveďte základní experimentální porovnání několika zvolených dispergačních technologií a zařízení.

Rozsah grafických prací: dle potřeby.

Rozsah průvodní zprávy: dle doporučení vedoucího práce

Seznam odborné literatury: dle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše.

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

Konzultant bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: 25. dubna 2016


Termín odevzdání bakalářské práce: 10. června 2016

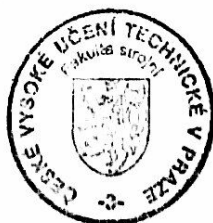
Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student/ka řádně neomluvil/a nebo omluva nebyla děkanem uznána,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

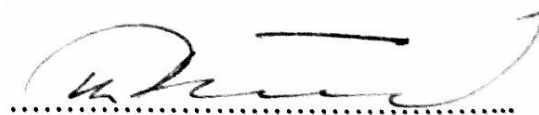
Posluchač bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne 21. 4. 2016




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




.....
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 19. dubna 2016

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne: 16. 6. 2016

Radan Filip
Jméno a Příjmení

Poděkování

Děkuju prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce a za poskytnuté konzultace. Dále chci poděkovat Ing. Jiřímu Moravcovi, Ph.D. za pomoc při experimentech. Také děkuji společnosti SCHÄFER-SUDEX s.r.o., jmenovitě Ing. Jiřímu Polášovi za zapůjčení sady míchadel Visco-jet.

Anotační list

Jméno autora: Radomír

Příjmení autora: Filip

Název práce česky: Dispergační zařízení v technologii výroby moderních nátěrových systémů

Název práce anglicky: Dispersing equipment in production technology of modern coating systems

Rozsah práce: počet stran: 52
počet obrázků: 26
počet tabulek: 14
počet příloh: 2

Akademický rok: 2015/2016

Jazyk práce: Český

Ústav: Procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Strojírenství

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Jirout

Oponent:

Konzultant práce:

Zadavatel: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Anotace česky:

Tato práce se zabývá dispergačními technologiemi a jejich aplikacemi pro dispergaci vodou ředitelných nátěrových disperzí. První část práce se zabývá teoretickou rešerší, v níž je obsažena závislost velikosti částic na dodané energii, popis jednotlivých dispergačních metod a základní charakteristika nátěrových systémů. V další části práce proběhla řada experimentů pro technologie: Stator-rotor, Visco-jet a zubové míchadlo a byla sledována disipovaná energie předána do dispergované vsádky. Závěr práce je věnován posouzení vlivu dispergace na technologických vlastnostech nátěru, zejména elektrické vodivosti a lesku (viz tabulka 14).

Anotace anglicky:

This paper deals with dispersion technologies and their applications for dispersing of water-borne coating dispersions. The first part deals with theoretical research, which is contained dependency of particle size on the delivered energy, description of dispersing methods and basic characteristics of coating systems. In the second part were made series of experiments for technologies: Stator-rotor, Visco-jet and saw-tooth agitator and observed the dissipated energy delivered to the dispersed batch. The conclusion of work deals with assessing the impact of dispersion on the technological properties of the coating, particularly electrical conductivity and gloss (see Table 14).

Klíčová slova:

dispergace, vodou ředitelné nátěrové disperze, stator-rotor, Visco-jet, zubové míchadlo

Využití:

Určení optimální technologie pro aplikaci výroby vodou ředitelných disperzí.

Obsah

1	Úvod	6
2	Teoretické uvedení do problematiky – rešerše	7
2.1	Teorie dispergace	7
2.2	Metody dispergace	9
2.2.1	Statické směšovače [2]	10
2.2.2	High-shear míchadla.....	11
2.2.3	Míchadla Visco-jet.....	13
2.2.4	Stator-rotor míchadla.....	15
2.2.5	Perlové mlýny [2].....	19
2.2.6	Dispergace ultrazvukem	20
2.3	Nátěrové systémy	22
2.4	Nanomateriály	22
2.5	Závěr z rešerše	24
3	Popis experimentu	25
3.1	Měření hustoty	25
3.2	Příkonová charakteristika míchadla Visco-jet	26
3.2.1	Postup experimentu:.....	26
3.2.2	Kalibrace	28
3.2.3	Vyhodnocení $P_o = f(Re)$	30
3.3	Vlastnosti systému.....	31
3.3.1	Postup měření:	32
4	Dispergace.....	34
4.1	Stator-rotor.....	34
4.1.1	Postup měření:	34
4.2	Visco-jet	35
4.2.1	Postup měření:	36
4.3	Zubového míchadla	37
4.3.1	Postup měření:	38
5	Vyhodnocení experimentu.....	38
5.1	Dispergace pomocí stator-rotor míchadla	38

5.2	Dispergace pomocí míchadla Visco-jet.....	41
5.3	Dispergace pomocí zubového míchadla.....	42
6	Diskuze	44
6.1	Porovnání dodané energie a technologických vlastností.....	44
6.2	Vnitřní odpor	45
6.3	Lesk	45
6.4	Disipovaná energie	45
7	Závěr.....	46
8	Seznam použité literatury	47
9	Seznam použitých symbolů.....	49
10	Seznam obrázků	50
11	Seznam tabulek	51
12	Seznam příloh	51

1 Úvod

Pojem moderní nátěrové systémy se rozumí nátěrové hmoty, které pomocí vhodně zvolené matrice, pigmentů a aditiv získají lepší funkční vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří například zvýšená odolnost proti korozi, vyšší abrazivní odolnost, elektrická vodivost, odolnost proti louhům a kyselinám, antibakteriální schopnosti, ale i estetický efekt.

Klíčovým procesem při výrobě takovýchto nátěrových systému je optimálně provedená dispergace částic pigmentu v matrici, kde částice uvažujeme jako shluky, které je potřeba rozptýlit na menší částice v řádech μm – nm . Pro dosažení takto provedené dispergace je nutné do systému vložit určité množství energie, aby vykompenzovala povrchové síly, které vzrostou vlivem nárůstu ploch rozptýlených částic.

Cílem této práce je popsat a porovnat jednotlivé dispergační technologie a zařízení a charakterizovat jejich procesní parametry pro aplikaci dispergace vodou ředitelných disperzí. V rámci práce je prováděna řada experimentů pro technologie: stator-rotor, míchadla Visco-jet a zubového míchadla zaměřených na určení disipované energie zařízení do systému a jejich následné porovnání.

2 Teoretické uvedení do problematiky – řešerše

2.1 Teorie dispergace

Dispergace je rovnoměrné rozptýlení pevné nebo kapalně látky zejména v kapalném prostředí. Účelem dispergace v oboru výroby nátěrových hmot je napojit pigmenty a plniva na kapalnou fázi. Získáme disperzi, která obsahuje částice, které jsou jemné a dostatečně malé.

Rozpad shluků částic na menší rozměry může být způsobeno dvěma mechanismy: působením setrvačných nebo dynamických tlakových sil turbulentních pulsací, anebo viskózními silami způsobenými rychlostním gradientem v okolí kontinuální fáze. Rozpad částice má za následek vznik většího množství částic o celkově větším povrchu při stejné hmotnostní koncentraci. To znamená, že k rozpadu částice může dojít pouze tehdy, pokud částice získá dostatek energie pro kompenzaci povrchových sil, které vzrostou vlivem nárůstu plochy. [3]

Pro dispergaci v turbulentním proudění můžeme z Kolmogorovy teorie [4] vyjádřit velikost napětí, které způsobuje rozpad částice:

$$\tau_C \approx \rho_C \cdot \varepsilon^{\frac{2}{3}} \cdot d_k^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Kde ρ_C je hustota kontinuální fáze, ε je lokální míra disipace energie a d_k je rozměr kapky. Povrchové síly jsou vyjádřeny následujícím vztahem:

$$\tau_S \approx \frac{\sigma}{d_k} \quad (2)$$

Dále dle [5] ještě musíme uvažovat i viskózní napětí uvnitř kapky:

$$\tau_d \approx \mu_d \frac{(\tau_C / \rho_d)^{\frac{1}{2}}}{d_k} \quad (4)$$

Pokud budeme uvažovat rovnováhu napětí:

$$\tau_c = \tau_s + \tau_d \quad (5)$$

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

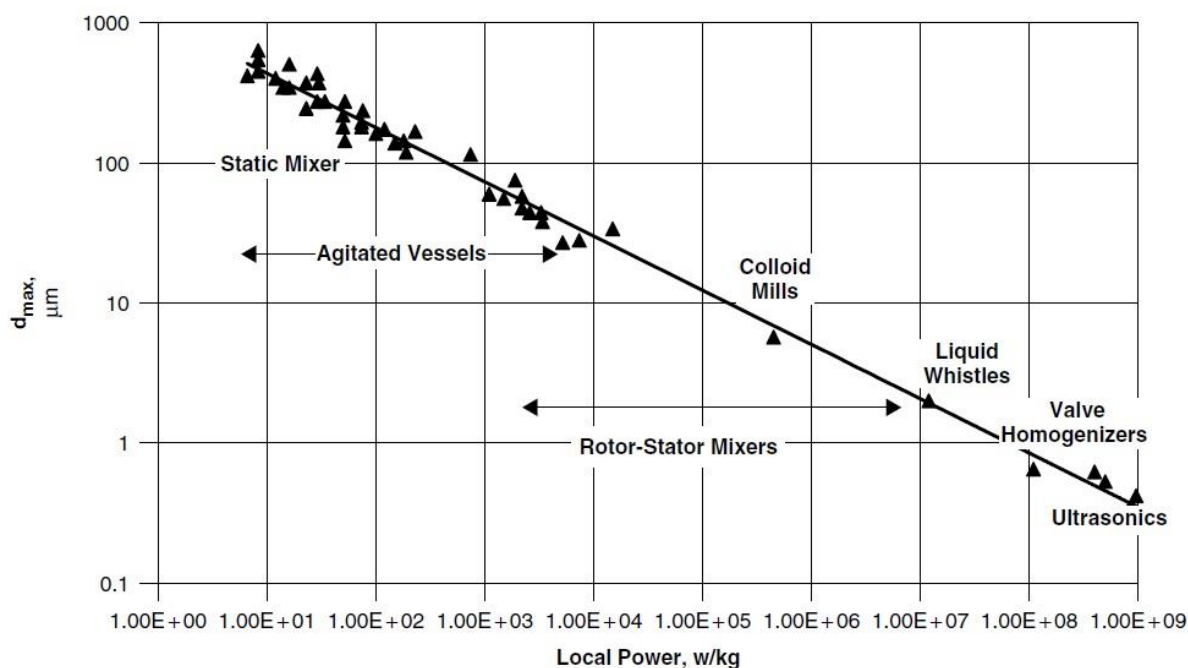
Pro nízko-viskózní dispergovanou fázi můžeme zanedbat vliv viskózní síly na stabilitu velikosti kapky a platí následující vztah:

$$d_{max} = C_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{\frac{3}{5}} \varepsilon_{max}^{-\frac{5}{2}} \quad (6)$$

Kde konstanta C_1 musí být stanovena empiricky a je funkcí typu dispergátoru a geometrie nádoby. Veličina d_{max} nám říká, jakého rozměru jsme schopni dosáhnout pro dané fyzikální vlastnosti a danou maximální disipovanou energii ε_{max} .

2.2 Metody dispergace

Pro dispergaci se nabízí celá řada metod, které jsou uvedeny níže na obrázku 1. Zde je vidět jaké velikosti částic jsme schopni dosáhnout určitou metodou v závislosti na dodaném disipovaném příkonu do soustavy.



Obrázek 1: Dosažitelná velikost částic pro danou metodu [1]

Graf zobrazuje dosažitelnou velikost částic v závislosti na dodané energii do systému.

Typ zařízení	Disipovaný příkon (W/kg)	Rozsah velikosti částic (μm)
Statické směšovače	10-1000	50-1000
Míchané nádoby	0,1-100	20-500
Vysokorychlostní Sator-rotor	1000-100000	0,5-100
Homogenizátory	$\sim 10^8$	0,5-1
Ultrazvuk	$\sim 10^9$	0,2-0,5

Tabulka 1: Dosažitelné velikosti částic pro danou metodu – shrnující tabulka [1]

V tabulce 1 je shrnutí z Obr. 1, kde jsou uvedené rozsahy disipovaných příkonů a velikosti částic pro danou metodu.

2.2.1 Statické směšovače [2]

Statické směšovače jsou trubkovité zařízení, kde pomocí vnitřních nehybných elementů dochází k turbulentnímu proudění a tím požadovaným směšovacím a dispergačním účinků. Je možné dosáhnout větší úrovně turbulentního proudění a to bez změny průřezu nebo proudění, ale za to s větší tlakovou ztrátou. Statické směšovače jsou obvykle používány k intezifikaci přestupu tepla a některé typy i k přípravě suspenzí, emulzí a disperzí.

Statické směšovače mají tyto výhody:

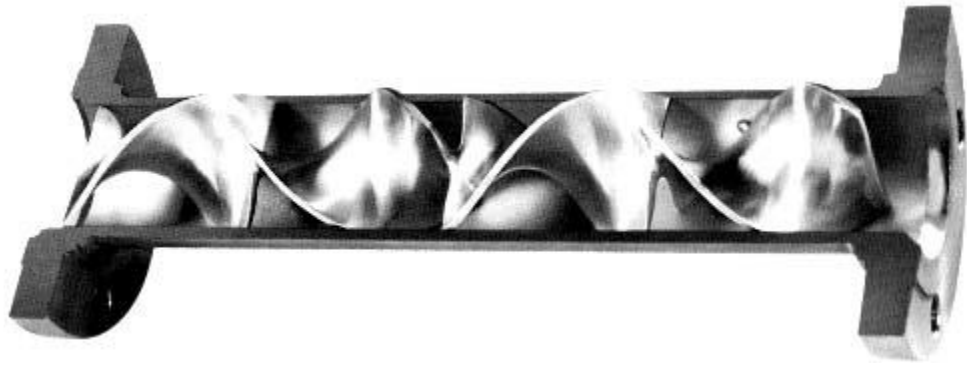
- Je možné je zabudovat do již existujícího potrubí, čímž se výrazně sníží zastavený prostor ve srovnání s použitím klasické nádoby s rotačním míchadlem.
- Nemají žádné rotující části, hřídel, ložiska, ucpávky ani poháněcí motor, což snižuje investiční náklady.
- Při správné aplikaci mají menší spotřebu energie ve srovnání s rotačními míchadly.
- Jsou bezhlučné, nevyžadují přívod elektrické energie, a jsou tedy vhodné pro práci ve výbušném prostředí.

Nevýhody statických směšovačů:

- Krátká doba zdržení míchané směsi.
- Dodržování konstantního poměru směšovacích složek, proto je nutné použít dávkovací čerpadla.
- Energie potřebná ke směšování se projeví ve formě tlakové ztráty.

Zhodnocení:

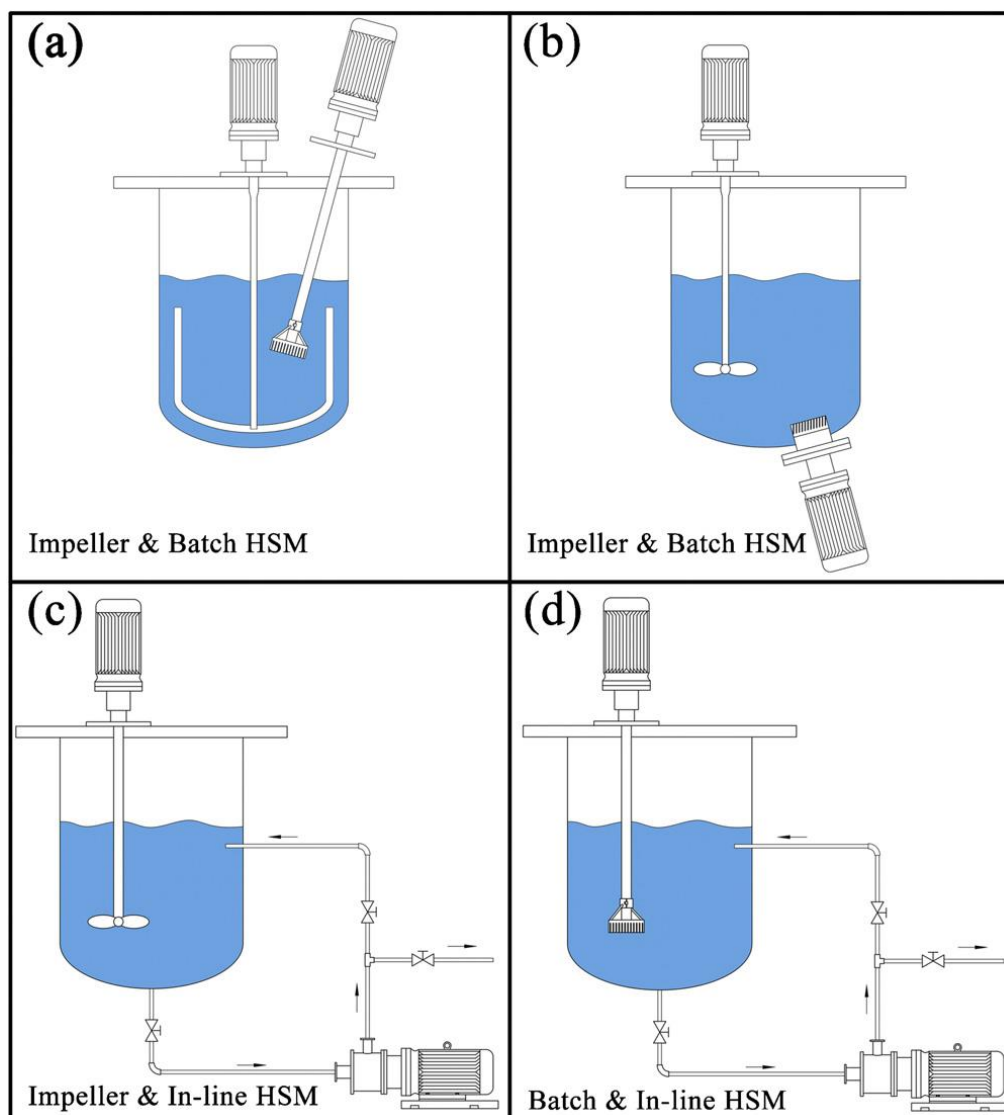
Statické směšovače se používají pro kontinuální míchání a nejsou příliš vhodné pro dispergaci pigmentů v barvách z důvodů krátkého zdržení, velkých tlakových ztrát. Z těchto důvodů se nehodí k provádění experimentů, kterým se věnuje tato práce.



Obrázek 2: Spirálový statický směšovač [1]

2.2.2 High-shear míchadla

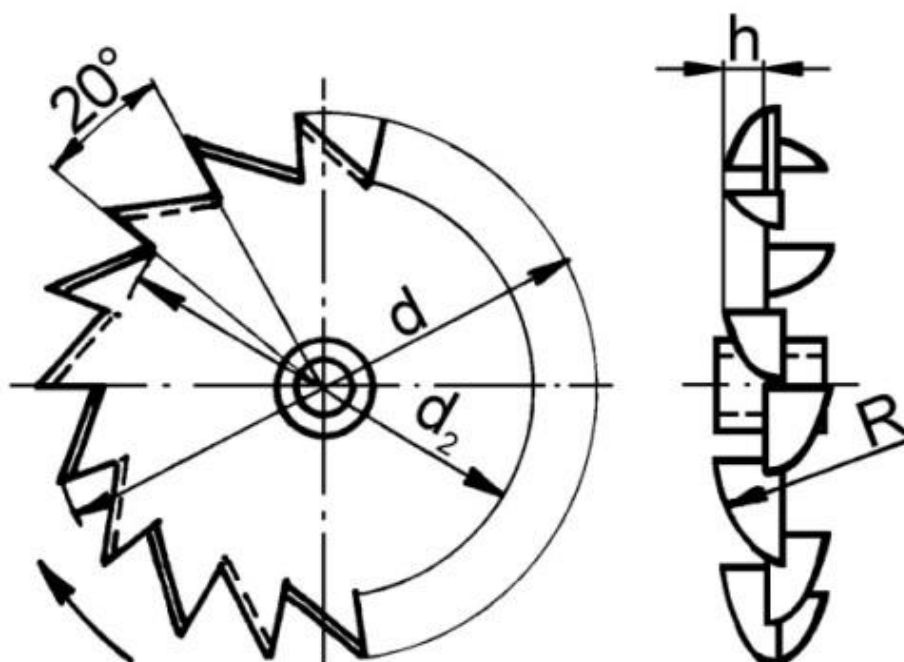
High-shear neboli vysoko smyková míchadla jsou charakteristická malým průměrem 10 až 20% průměru míchané nádoby a pracují za velkých obvodových rychlostí, typicky až 20 m/s. Aby mohli pracovat při velikých rychlostech a zároveň bez nadměrné využívané energie, jsou míchadla vybaveny malými lopatkami na tenkém disku. Tyto míchadla mají malý čerpací účinek, proto se často používají s axiálními míchadly nebo průtočnými systémy pro dosažení homogenní distribuce částic viz obrázek 3. [1]



Obrázek 3: Možné uspořádání stator-rotor míchadel – a,b) vsádkové, c,d) průtočné [6]

2.2.2.1 Zubové míchadla

Zubová míchadla také spadají do kategorie high-shear míchadel. Jedná se o rotující disk na konci 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. [2]



Obrázek 4: Zubové míchadlo CVS 69 1038.2 [2]

$$h / d = 0,075 ; d_2 / d_1 = 0,85 ;$$

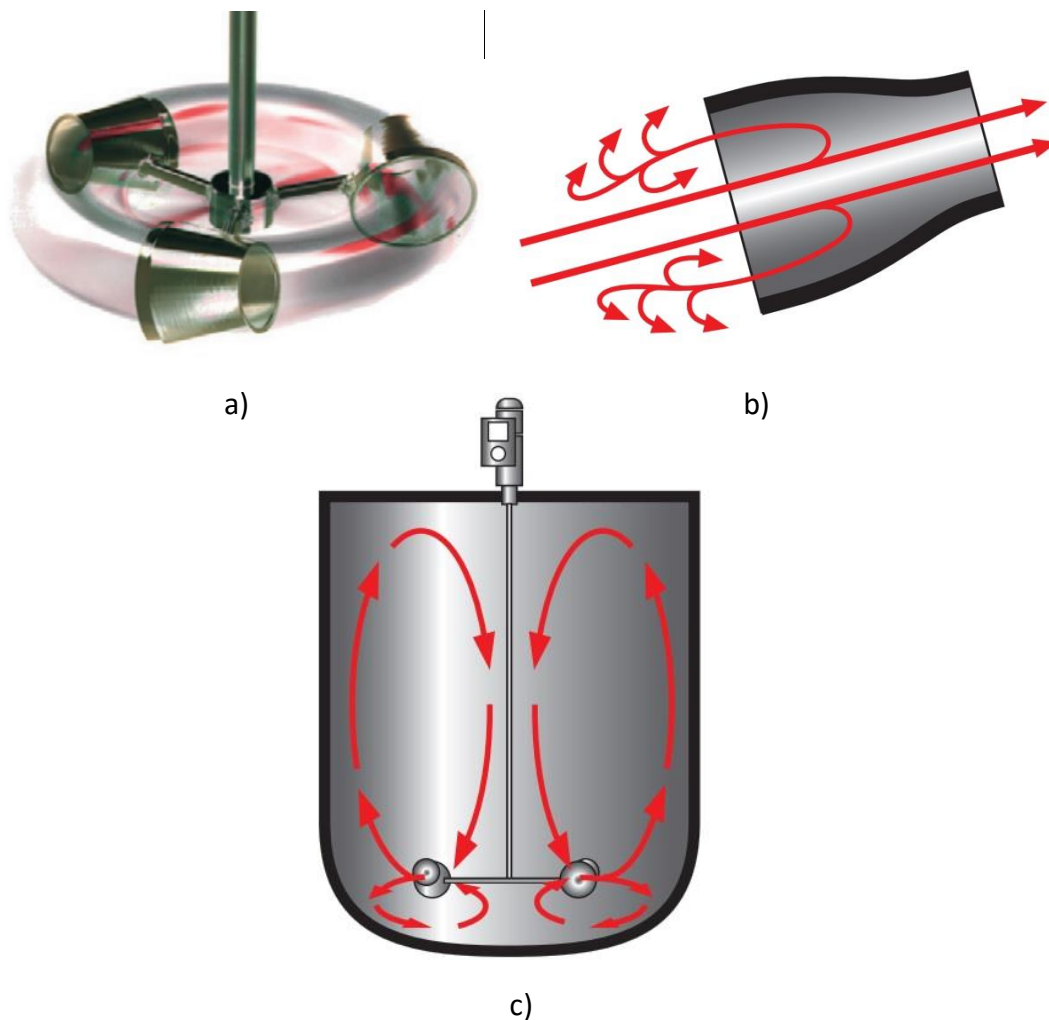
2.2.3 Míchadla Visco-jet

Visco-jet míchadla jsou relativně nový druh míchadel založený na principu protékání přes otevřené konce kužele. Rotací kuželů se produkují tlakové vlny v přední části, nad a pod rovinou otáčení, vytváří silné proudy cirkulující nad a pod směšovací hlavou. Zrychlené laminární toky na výstupu kužele a reverzní turbulence vytvoří dynamický tlak u vstupu kužele. To minimalizuje vliv smykových sil, takže tento systém je ideální pro homogenizaci základních produktů a mísení složek. Tyto míchadla se využívají v celé řadě odvětví jako například výroba barev, papíru a potravinářském průmyslu.

Výhody míchadel Vicso-jet:

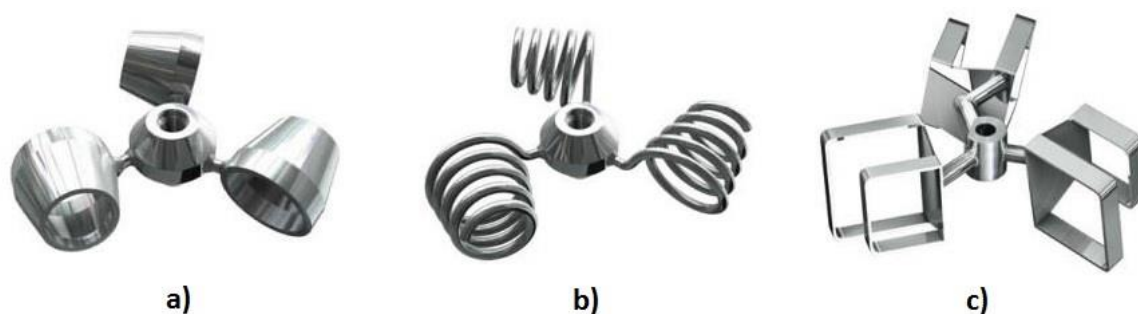
- Vysoce účinný míchací proces a krátké míchací časy
- Žádné vtahování vzduchu, žádné zahřívání, žádná tvorba pěny
- Malý požadovaný výkon motoru, úspora energie
- Snadná sanitace

Jako nevýhodu bych uvedl, že ačkoliv při značně velkém použití této metody vyšlo jen velmi málo publikací týkajících se míchacích a příkonových charakteristik z důvodu patentové ochrany. [4]



Obrázek 5: Míchací systém Visco-jet [7]

Na obrázku 5 je schematicky zobrazena funkce míchacího systému Visco-jet: a) Rotací kuželů se produkt urychluje, b) Schéma obtékání kužele, c) Čerpací účinek míchadla.



Obrázek 6: Varianty míchadel Visco-jet: a) kužel s otevřenými konci; b) otevřená spirála; c) Visco jet Crack

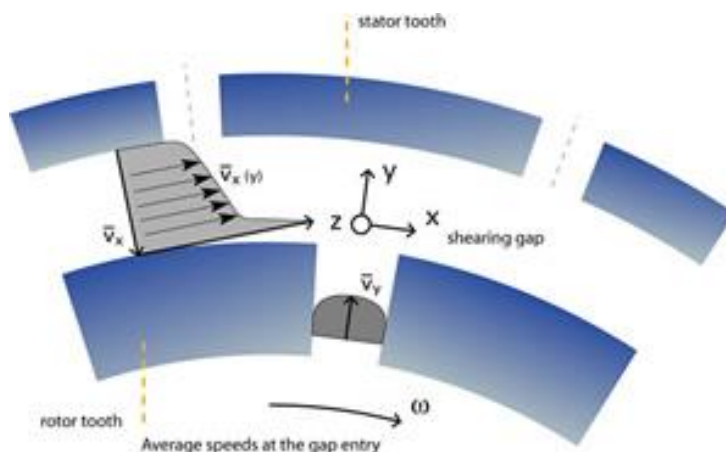
Obr. 6a) typ kužel s otevřenými konci – vhodný pro homogenizaci. Obr. 6b) typ otevřená spirála – vhodný pro disperzi pigmentů. Obr. 6c) typ Visco-jet Crack – vhodný pro disperzi vysoce viskózních látek. Obrázky 5 a 6 převzaty z firemních podkladů firmy IBC CONTAINERS, dostupné z: <http://www.ibccontainers.co.uk/#!viscojet-technology/c247e>

2.2.4 Stator-rotor míchadla

Rozpoznávací vlastností stator-rotor míchadel je rotor otáčející se vysokými otáčkami v těsné blízkosti statoru. Typické obvodové rychlosti rotoru jsou v rozmezí 10 až 50 m/s, což vytváří vysokou smykovou rychlost v mezeře mezi státorem a rotorem v rozsahu 20000 až 100000 s⁻¹. Množství disipované energie může být až o 3 řády výše než v konvenčně míchaných nádobách. Hlavními charakteristikami pro stator-rotor míchadla jsou vysoké otáčky rotoru, velká smyková napětí a vysoký příkon. Mají široké uplatnění v chemickém, biochemickém, zemědělském, kosmetickém a potravinářském průmyslu. Hlavně se využívají k disperzi látek s viskozitou menší než 150 Pa · s. [1]

Míchadla stator rotor se dále dělí dle geometrie na:

- Koloidní mlýny
- Radiální míchadla
- Axiální míchadla

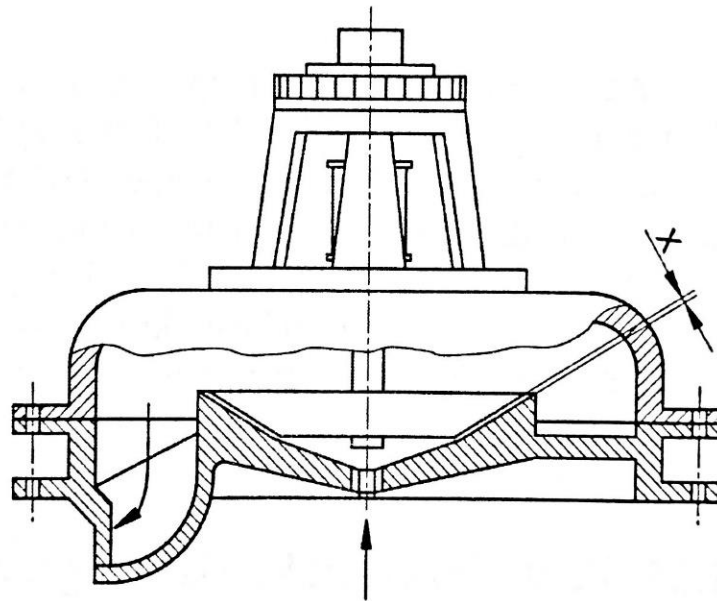


Obrázek 7: Schématické znázornění principu mýchadla stator-rotor

V mezeře mezi statorem a rotorem vznikají velké tečné síly, které nasáté medium rozptýlí a vyloučí ho skrz mezery do okolí. Obrázek dostupný z:
<http://www.yjcorp.co.kr/ref/general/dispersion.php>

2.2.4.1 Koloidní mlýny

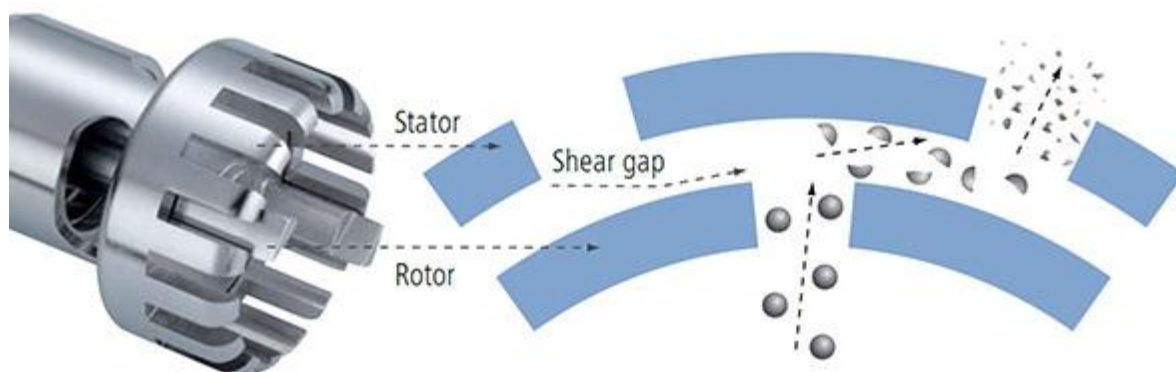
Charakteristickým rysem koloidních mlýnů je stator-rotor konstrukce, kde rotor rotuje s vysokou obvodovou rychlostí (25 až $125 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) v těsné blízkosti statoru. Mezera mezi statorem a rotorem je minimální ($\approx 25 \text{ }\mu\text{m}$) a je nastavitelná. Princip rozpojování částic v koloidních mlýnech spočívá v účinku působení smykových sil v kapalině s vysokým rychlostním gradientem. Tento účinek může být kombinován s rázovým rozpojováním. Pomocí koloidních mlýnů je možné dosáhnout velikost částic až 10 nm . [2]



Obrázek 8: Princip koloidního mlýnu s kuželovým rotorem [2]

2.2.4.2 Radiální míchadla

Rotor funguje jako radiální míchadlo, které se otáčí uvnitř stacionárního statoru s otvory. Vlivem otáčení rotoru a odstředivých sil dochází k nasávání suspenze. K rozbíjení částic dochází v mezeře mezi statorem a rotorem. Poté jsou zbytky částic vystaveny vysokým smykovým silám, když prochází skrz otvory statoru a tím dochází k dalšímu rozpadu částic. Tyto míchadla mají malý čerpací účinek, proto se často používají s axiálními míchadly nebo průtočnými systémy pro dosažení homogenní distribuce částic viz obrázek 3. [1]

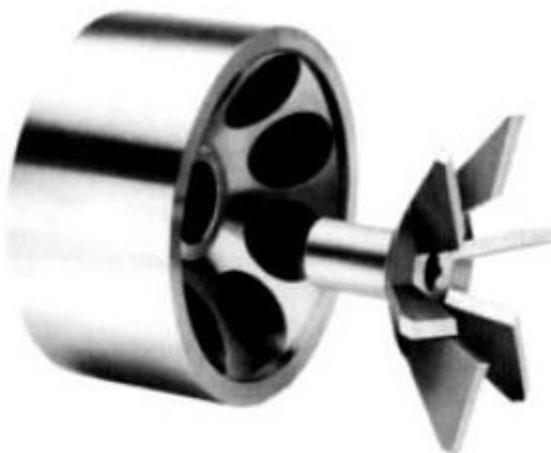


Obrázek 9: Princip rozpadu částic v radiálním míchadle stator-rotor

Obrázek dostupný z: <https://www.laboratory-equipment.com/dispersers/t-18-digital-ultra-turrax-disperser-ika.php>

2.2.4.3 Axiální míchadla

Firma Chemineer Greeco nabízí odlišnou geometrii míchadel typu stator-rotor a zaměřila se na axiální míchadla. Používá stator s otvory, přes které je suspenze axiálně nasávána díky axiálnímu rotoru. Firma používá i dvoustupňovou verzi, která se skládá s primárního stupně s většími otvory ve statoru a ze sekundárního stupně s menšími otvory. Dalším významným rysem konstrukčního provedení je, že šířka mezery mezi statorem a rotorem je nastavitelná pomocí podložek nebo pouzder. [1]



Obrázek 10: Stator-rotor firmy Chemineer Greeco – jednostupňové provedení [1]



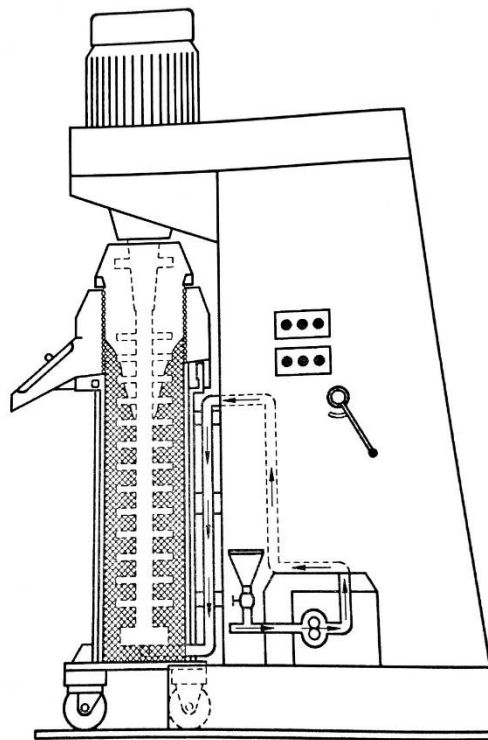
Obrázek 11: Stator-rotor firmy Chemineer Greco – dvoustupňové provedení [1]

2.2.5 Perlové mlýny [2]

Kuličkové mlýny mají tvar vertikální válcové nádoby, kterou prochází rotující hřídel, na kterém jsou upevněny vhodné tvarové elementy (disky, lopatky apod.), které udělají mlecím tělíškům – kuličkám o průměru 1 až 10mm potřebný pohyb, který je potřebný pro rozpojování. Zařízení se používá pro suché, ale nejčastěji pro mokré mletí, kdy částice jsou přiváděny do zařízení formou suspenze. Perlové mlýny mohou pracovat vsádkově i kontinuálně. S ohledem na značnou disipaci energie bývají mokré perličkové mlýny opatřeny chladičím pláštěm, aby nedocházelo k ohřevu vsádky.

Perlové mlýny mají trojí hlavní využití:

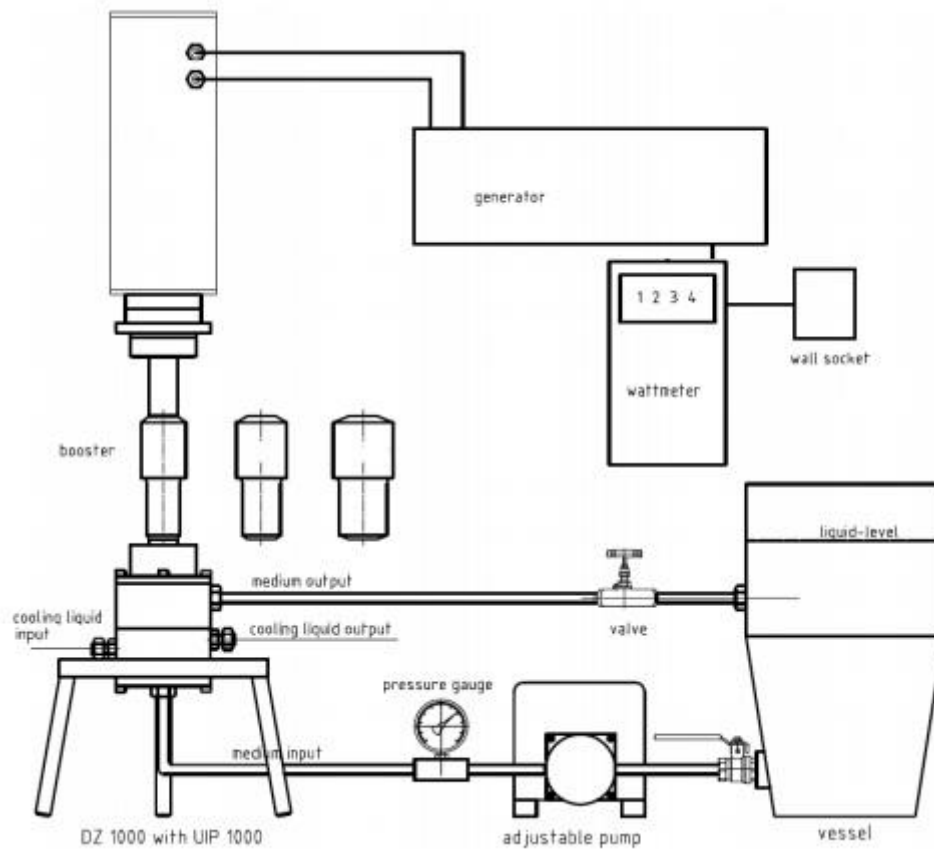
- Mikro mletí do velikosti částic 3 – 5 μm , příkladem je mletí nerozpustných nebo špatně rozpustných suspenzí barviv.
- Dispergace pevných látek v kapalinách, příkladem výroba barev a laků
- Dezintegrace buněk mikroorganismů



Obrázek 12: Otevřený perličkový mlýn s více diskovým míchadlem [2]

2.2.6 Dispergace ultrazvukem

Dispergace ultrazvukem je důsledkem mikroturbulencí způsobených kolísáním tlaku a kavitace. Výhodou ultrazvuku ve srovnání s ostatními technologiemi, jako například rotor-stator nebo koloidní mlýny je, že dokáže rozpojovat částice a shluky částic velikostí v řádech nanometrů. Částice urychlené ultrazvukovou kavitací do sebe navzájem narážejí o rychlostech až 1000km/h, a tím překonávají Van der Waalovy síly. Následkem toho částice podléhají erozi povrchu příčinou kavitačního kolapsu v okolí kapaliny nebo snížení velikosti v důsledku štěpení přes mezičásticové kolize nebo zhroucení kavitační bubliny vytvořené na povrchu. [7]



Obrázek 13: Schéma zařízení pro ultrazvukovou dispergaci [7]

Schéma se skládá z ultrazvukové sondy, generátoru, zásobníku suspenze a čerpadla. Suspenze je čerpána ze zásobníku do okolí sondy, kde probíhá dispergace, okolí sondy je chlazeno.

2.3 Nátěrové systémy

Použití barev a nátěrových systémů může mít dvojí důvod, a to estetický a funkční, popřípadě kombinace obou. Jako příklad lze uvést barvu motorového vozidla, kdy se očekává zlepšení vzhledu vozidla – barva a lesk a zároveň musí poskytnout ochranu proti korozi a nepříznivým vlivům počasí. 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 životnost. [8]

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

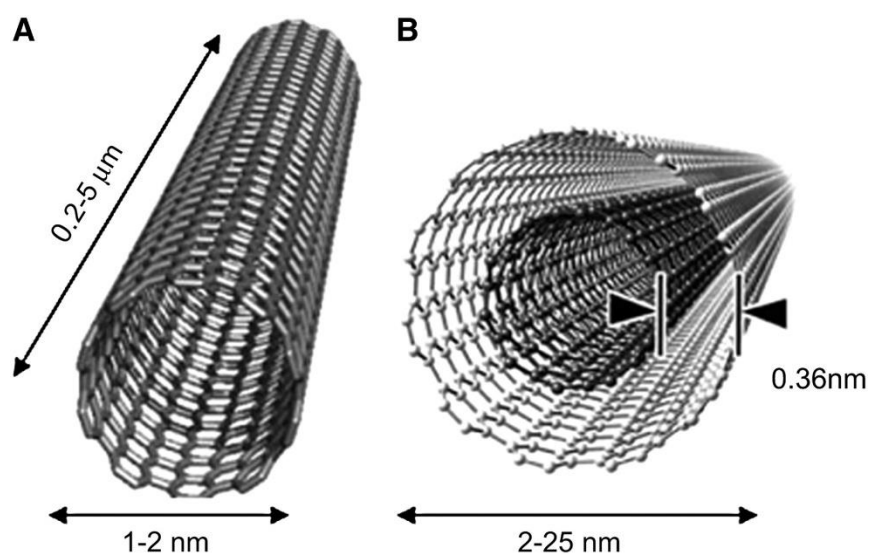
Složka barvy	Charakteristická vlastnost
Filmotvorné složky	Určují většinu hlavních vlastností nátěru, jakými jsou např. mechanické vlastnosti, odolnost vůči prostředí a životnost.
Pigmenty	Pigmenty určují stupeň krytí, barvu a další vizuální efekty. Mohou mít i antikorozi vlastnosti.
Ředidla a rozpouštědla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

Tabulka 2: Složky nátěrových hmot a jejich stručná charakteristika [8]

2.4 Nanomateriály

Některé pigmenty, které se používají v nátěrových systémech, spadají až do oblasti nanomateriálů. Nanomateriály jsou takové částice, kdy alespoň jeden ze tří rozměrů je v rozmezí od 1 do 100nm (nanorubice, nanovlákna, tenké vrstvy). Mezi takové spadají například uhlíkové nanotuby CNT (Carbon Nano Tube). O něco větší jsou ještě saze o rozměrech 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 .

Uhlíkové nanotuby CNT jsou nanočástice, které vzniknou lineárním stočením grafémového listu do válcové trubice. Podle počtu stěn trubice můžeme tyto nanotuby dělit na jednostěnné SWCNT (Single Wall Carbon Nano Tubes), dvojstěnné DWCNT (Dual Wall Carbon Nano Tubes) a víceštěnné MWCNT (Multi Wall Carbon Nano Tubes). Uhlíkové nanotuby se vyznačují extrémní pevností v tahu, mechanickou poddajností a vysokou tepenou a elektrickou vodivostí. [9]



Obrázek 14: Znárodnění nanotub A) SWCNT B) DWCNT [9]

2.5 Závěr z rešerše

Cílem rešerše bylo popsat jednotlivé dispergační technologie a zařízení a charakterizovat jejich procesní parametry pro aplikaci výroby vodou ředitelných nátěrových disperzí. Na základě rešerše jsem zvolil několik dispergačních zařízení, které experimentálně porovnám. Kritéria pro volbu těchto zařízení byla: Použitelnost pro dispergaci nátěrových systémů, snadná realizace experimentu v laboratořích a jejich dostupnost.

Pro experiment byla zvolena na základě výše uvedených kritérií následující zařízení:

- Stator-rotor
- Visco-jet
- Zubové míchadlo

Dále byly pro experiment dodány vzorky nátěrové hmoty s vodou ředitelnou matricí, do níž byl přidán nanomateriál MWCNT (Multi Wall Carbon Nanotubes) – více stěnné uhlíkové nanotuby o hmotnostních koncentracích 0,5%; 1%; 2,5%. Dále byl měřen vzorek s přídavkem grafitu o hmotnostní koncentraci 8%. Přehled vzorků a jejich značení je uveden v tabulce 3.

Název vzorku	Značení vzorku
Multi Wall Carbon Nanotubes 0,5% hm.	MWCNT 0,5%
Multi Wall Carbon Nanotubes 1% hm.	MWCNT 1%
Multi Wall Carbon Nanotubes 2,5% hm.	MWCNT 2,5%
Grafit 8% hm.	G 8%

Tabulka 3: Přehled použitých vzorků a jejich značení

3 Popis experimentu

V rámci této práce probíhala řada experimentů, jejímž cílem bylo zjistit množství disipované energie vložené do systému pro jednotlivé dispergační zařízení viz kapitola 2.5.

K vyhodnocení experimentů bylo dále potřeba provést pomocná měření a to:

- Měření hustoty vzorků
- Příkonová charakteristika míchadla Visco-jet
- Vlastnosti systému

3.1 Měření hustoty

Hustota byla měřena pro vzorek MWCNT 0,5% a MWCNT 2,5%. Prázdná injekční stříkačka byla zvážena, poté jí odebrán z každého vzorku objem 10ml a znovu zvážena. Pro měření hmotnosti byla použita digitální váha KERN EW6200 s citlivostí 0,01g. Hustota byla poté stanovena pomocí vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

Změřené hodnoty a vypočtená hustota jsou uvedeny v tabulce 4.

MWCNT 0,5				
V(ml)	m0 (g)	m1 (g)	m (g)	ρ (kg/m ³)
10	6,6	18,9	12,3	1230
MWCNT 2,5				
V(ml)	m0 (g)	m1 (g)	m (g)	ρ (kg/m ³)
10	6,6	19	12,4	1240

Tabulka 4: Měření hustoty vzorků

Pro další výpočty uvažuji pro všechny vzorky průměrnou hustotu:

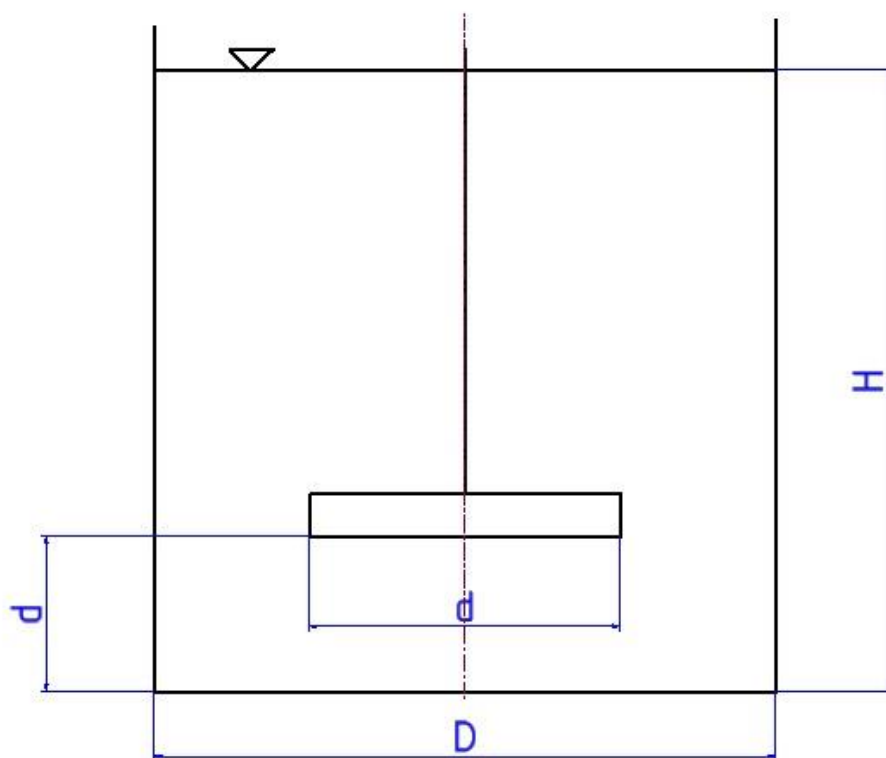
$$\rho = 1235 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

3.2 Příkonová charakteristika míchadla Visco-jet

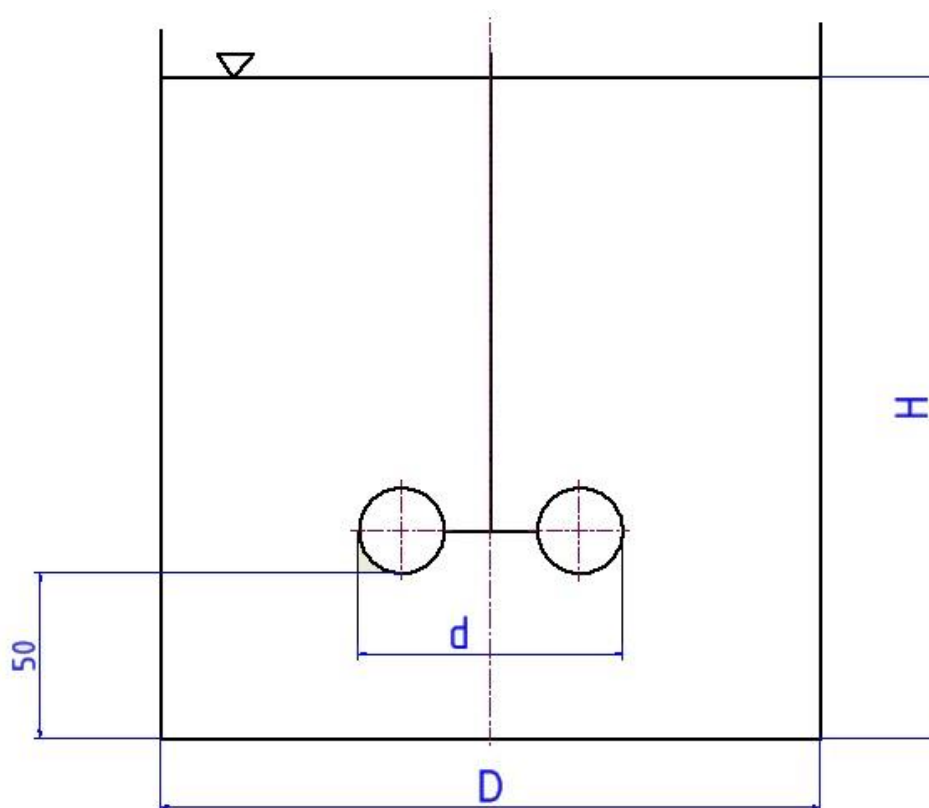
Pro vyhodnocení disipované energie je nutné znát příkonovou charakteristiku míchadla Visco-jet, jelikož je zařízení patentově chráněno tak je požadovaná charakteristika průmyslovým tajemstvím, a proto je třeba ji změřit. Princip mnou použité metody spočívá v porovnání již známé příkonové charakteristiky míchadla 6SL s míchadlem Visco-jet, kde mícháním systému o známých parametrech vyhodnotím kalibrační křivku, podle které jsem schopen dopočítat příkonovou charakteristiku pro míchadlo Visco-jet.

3.2.1 Postup experimentu:

Nádoba s narážkami o průměru $D = 200\text{mm}$ je míchána míchadlem 6SL CVS 691020 o průměru $d = 100\text{mm}$. Míchaným médiem je směs glycerinu a vody o výšce $H = 200\text{mm}$, teplotě $t = 25^\circ\text{C}$, hustotě $\rho = 1197,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a dynamické viskozitě $\mu = 0,34414 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Konfigurace pro měření míchadlem 6SL je zobrazena na obrázku 15. Během experimentu jsou nastavovány otáčky míchadla a odečítá se hodnota měřeného napětí od tenzometrického snímače kroutícího momentu. Poté je systém míchán za stejných podmínek míchadlem Visco-jet (typ obr. 6a) o průměru $d = 80\text{mm}$. Konfigurace pro měření míchadlem Visco-jet je zobrazena na obrázku 16. Naměřené hodnoty napětí a kroutících momentů jsou uvedeny v tabulce 5.



Obrázek 15: Konfigurace pro měření míchadlem 6SL CVS 691020



Obrázek 16: Konfigurace pro měření míchadlem Visco-jet

6SL		Visco-Jet	
n (min ⁻¹)	U (V)	n (min ⁻¹)	U (V)
151	4,01E-05	151	2,47E-05
191	5,2E-05	190	2,97E-05
231	6,38E-05	231	3,35E-05
270	7,8E-05	270	3,78E-05
310	9,54E-05	310	4,12E-05
350	0,000114	350	4,46E-05
390	0,000131	390	4,85E-05
430	0,000151	430	5,04E-05
470	0,000175	470	5,48E-05
510	0,000203	510	5,84E-05
		540	6E-05
		580	6,31E-05
		620	6,84E-05

Tabulka 5: Naměřená data pro vyhodnocení příkonové charakteristiky Visco-jet, kde n jsou otáčky, U je napětí a M_k je kroučící moment.

3.2.2 Kalibrace

Pro danou konfiguraci je hodnota příkonového čísla pro míchadlo 6SL CVS 691020 $Po = 1,4$ za předpokladu že míchání probíhá v turbulentní oblasti.[10]

Kroučící moment pak určím ze vztahu:

$$M_k = \frac{Po \cdot \rho \cdot n^2 \cdot d^5}{2\pi} \quad (8)$$

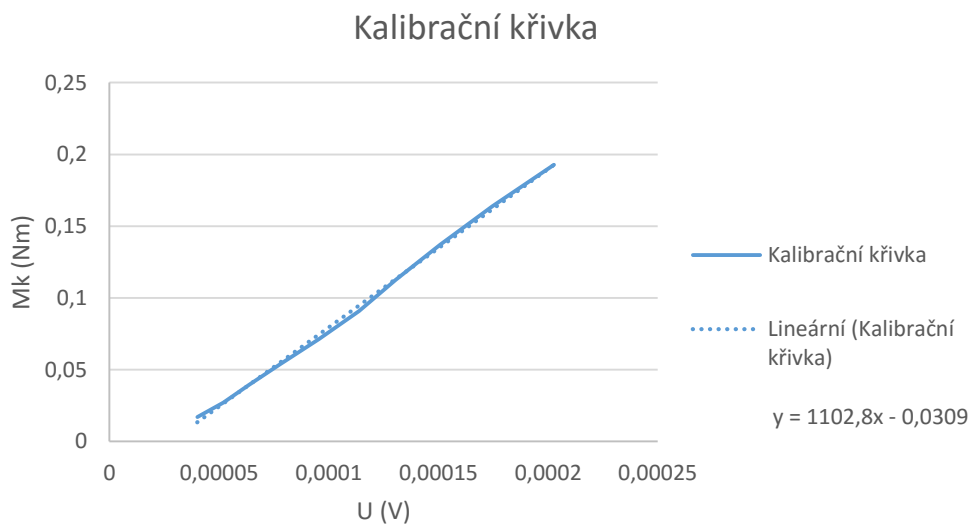
Kde Po je známé příkonové číslo, ρ je hustota vsádky, d průměr míchadla a n jsou otáčky míchadla. Hodnoty kroučících momentů jsou uvedeny v tabulce 6.

n (min ⁻¹)	Mk (Nm)	U (V)
151	0,016905	4,01E-05
191	0,027048	5,2E-05
231	0,039563	6,38E-05
270	0,05405	7,8E-05
310	0,071251	9,54E-05
350	0,090824	0,000114
390	0,11277	0,000131
430	0,137089	0,000151
470	0,16378	0,000175
510	0,192844	0,000203

Tabulka 6: Naměřená a dopočtená data míchadla 6SL

Z dat z tabulky 6 byla vyhodnocena kalibrační křivka (obr. 17) pro přepočet kroučícího momentu míchadla Visco-jet ve tvaru:

$$Mk = 1102,8 \cdot U - 0,0309 \quad (9)$$



Obrázek 17: Kalibrační křivka

3.2.3 Vyhodnocení $Po = f(Re)$

Nyní mohu dle vztahu (9) dopočítat kroutící moment míchadla Visco-jet. Dále pro vyhodnocení příkonového čísla vypočítám výkon míchadla ze vztahu:

$$P = Mk \cdot 2\pi \cdot n \quad (10)$$

Hodnotu Reynoldsova čísla ze vztahu:

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu} \quad (11)$$

Kde μ je dynamická viskozita. Dále vypočítám příkonové číslo ze vztahu:

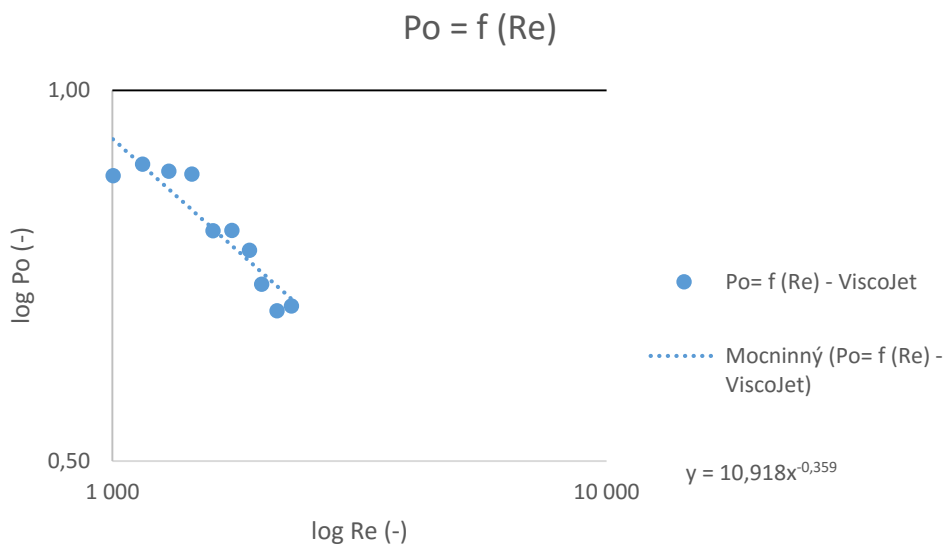
$$Po = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} \quad (12)$$

Ze vztahů (8; 9; 10; 11) byly dopočteny data uvedené v tabulce 7 a vyhodnocená data jsou uvedena na obrázku 18.

n (s ⁻¹)	U (V)	Mk (Nm)	P (W)	Po (-)	Re (-)
4,5	3,78E-05	0,010783	0,305	0,85	1 002
5,166667	4,12E-05	0,014528	0,472	0,87	1 151
5,833333	4,46E-05	0,018275	0,670	0,86	1 300
6,5	4,85E-05	0,022574	0,922	0,86	1 448
7,166667	5,04E-05	0,024679	1,111	0,77	1 597
7,833333	5,48E-05	0,029502	1,452	0,77	1 745
8,5	5,84E-05	0,033481	1,788	0,74	1 894
9	6E-05	0,035225	1,992	0,70	2 005
9,666667	6,31E-05	0,038678	2,349	0,66	2 153
10,333333	6,84E-05	0,04457	2,894	0,67	2 302

Tabulka 7: Experimentální data příkonové charakteristiky míchadla Visco-jet

Z dat z tabulky 7 byla vyhodnocena závislost $Po = f(Re)$, (Graf 2) pro míchadlo Visco-jet (typ obr. 6a) ve tvaru:



Obrázek 18: Závislost příkonového čísla na Reynoldsově čísle

$$Po = 10,918 \cdot Re^{-0,359} \quad (13)$$

Z obrázku 18 je patrné, že hodnota příkonového čísla není konstantní, a proto lze konstatovat, že režim proudění se nachází v přechodové oblasti.

3.3 Vlastnosti systému

Jelikož dle prof. Jirouta nátěr s vodou ředitelnou matricí se se zvýšenou teplotou degraduje, bylo nutné změřit, za jak dlouho se při daném režimu vzorek zahřeje nad mezní teplotu, která je dána stavem vytvrzování matrice. Mezní teplota byla stanovena na $t_{\max} = 35^{\circ}\text{C}$. Vzorkem byla vodou ředitelná barva bez příměsí. Největší ohřev vzorku se očekával u metody dispergace stator-rotor, proto jsem provedl měření právě pro zmíněnou metodu. Měření probíhalo pro následující režimy otáček:

- 10000 min^{-1}
- 15000 min^{-1}
- 15000 min^{-1} + chlazení
- 20000 min^{-1} + chlazení

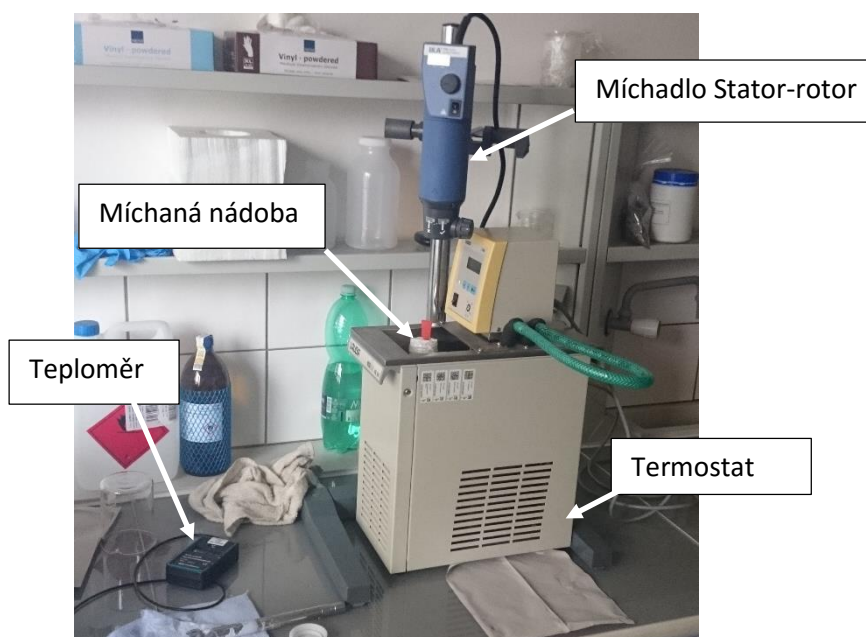
3.3.1 Postup měření:

Nejprve jsem změřil teplotu vzorku digitálním teploměrem GHT 175/Pt, a poté byl vzorek dispergován v plastové nádobě o průměru 80mm za použití stator-rotor míchadla typ IKA S 25 N – 25 G, které mělo průměr rotoru 17mm s počtem zubů 2, průměr statoru 25mm s počtem zubů 12 a mezera mezi státorem a rotorem byla 0,5mm. Otáčky jsem nastavil dle daného režimu a během dispergace měřil teplotu vzorku v závislosti na čase. V režimu chlazení jsem použil pro chlazení vzorku termostat LAUDA ecoline RE106, chladičí teplota byla nastavena na $t_{chl}=15^{\circ}\text{C}$. Uspořádání experimentu je na obrázku 20 a naměřená data jsou uvedeny v tabulce 8 a následně shrnuty na obrázku 21.



Obrázek 19: Míchadlo stator-rotor typ IKA S 25 N – 25G

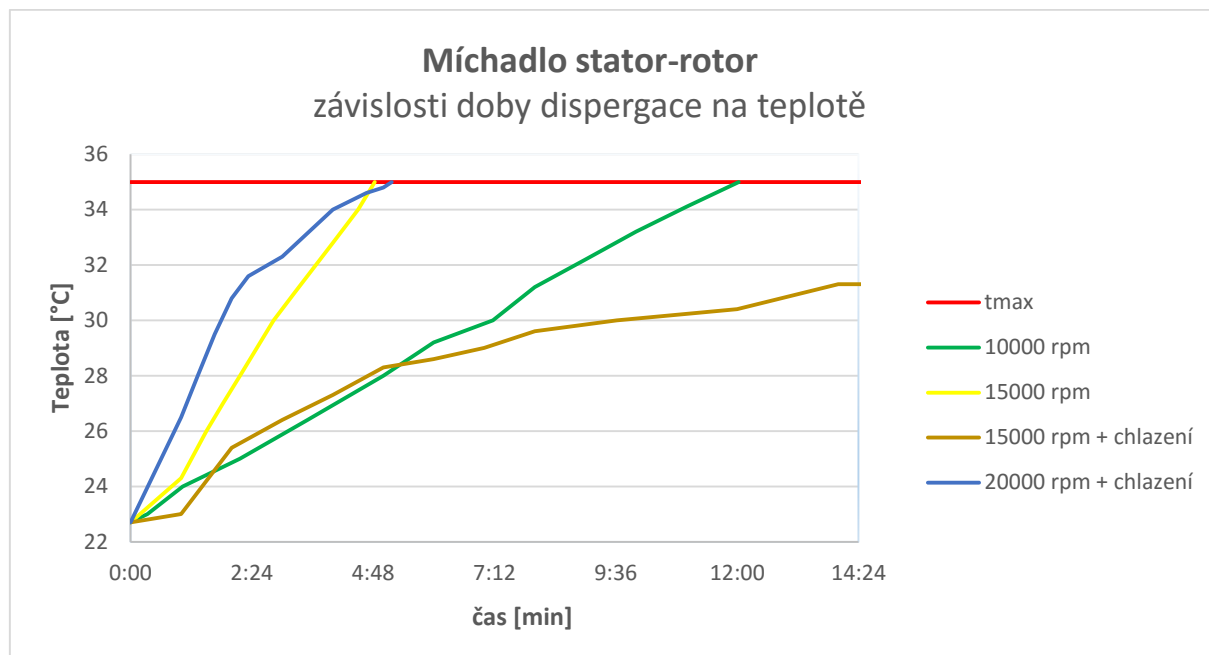
Obrázek převzatý z katalogu firmy IKA, dostupný z:
http://www.ika.com/owa/ika/catalog.product_detail?iProduct=1713300



Obrázek 20: Uspořádání experimentu stator-rotor

10000 (min ⁻¹)		15000 (min ⁻¹)		15000 (min ⁻¹) + chlazení		20000 (min ⁻¹) + chlazení	
teplota (°C)	čas (min)	teplota (°C)	čas (min)	teplota (°C)	čas (min)	teplota (°C)	čas (min)
22,7	0:00	22,7	0:00	22,7	0:00	22,7	0:00
23	0:20	24,3	1:00	23	1:00	26,5	1:00
24	1:02	26	1:30	25,4	2:00	28	1:20
25	2:10	27	1:50	26,4	3:00	29,5	1:40
26,4	3:30	28	2:10	27,3	4:00	30,8	2:00
28	5:00	30	2:50	28,3	5:00	31,6	2:20
29,2	6:00	31	3:15	28,6	6:00	32,3	3:00
30	7:10	32,8	4:00	29	7:00	34	4:00
31,2	8:00	34	4:30	29,6	8:00	34,6	4:40
32,2	9:00	35	4:50	30	9:37	34,8	5:00
33,2	10:00			30,4	12:00	35	5:10
34,1	11:00			31,3	14:00		
35	12:02			31,3	15:00		

Tabulka 8: Naměřená data pro měření vlastnosti systému



Obrázek 21: Shrnutí naměřených dat z tabulky 8

Na základě dat z obrázku 21 jsem vyhodnotil optimální režim měření pro dispergaci stator-rotor v rozmezí otáček 10000-15000 min^{-1} za použití chlazení, kde teplota v dispergované oblasti nepřesáhne mezní teplotu $t_{\text{max}}=35^\circ\text{C}$, a tudíž nedojde k degradaci nátěrové hmoty.

4 Dispergace

4.1 Stator-rotor

Dispergováno bylo v plastové nádobě o průměru 80mm za použití stator-rotor míchadla typ IKA S 25 N – 25 G, které mělo průměr rotoru 17mm s počtem zubů 2, průměr statoru 25mm s počtem zubů 12 a mezera mezi statorem a rotorem byla 0,5mm (obr. 19). Dispergovány byly vzorky: MWCNT 0,5%; MWCNT 1%; MWCNT 2,5% a G 8%. Uspořádání experimentu je uvedeno na obr. 20.

4.1.1 Postup měření:

Nejprve jsem zvážil každou nádobu se vzorkem a poté dispergoval v rozmezí otáček 10000-15000 min^{-1} , tak aby vsádka byla čerpána a docházelo k cirkulaci v celém objemu. Chlazení bylo termostatem LAUDA ecoline RE106, chladicí teplota byla nastavena na $t_{\text{chl}}=15^\circ\text{C}$. Doba dispergace jsem sledoval pomocí stopky. Souhrn naměřených dat je uveden v tabulce 9.

Stator-rotor									
Vzorek	n1 (min ⁻¹)	t1 (min)	n2 (min ⁻¹)	t2 (min)	n3 (min ⁻¹)	t3 (min)	m1 (g)	m0 (g)	m (g)
MWCNT 0,5%	15000	0,5	10000	5			535,4	44,8	490,6
MWCNT 1%	15000	6					535,4	44,8	490,6
MWCNT 2,5%	15000	0,5	10000	5			470,7	44,8	425,9
G 8%	15000	0,5	10000	3	15000	2	465,1	44,8	420,3

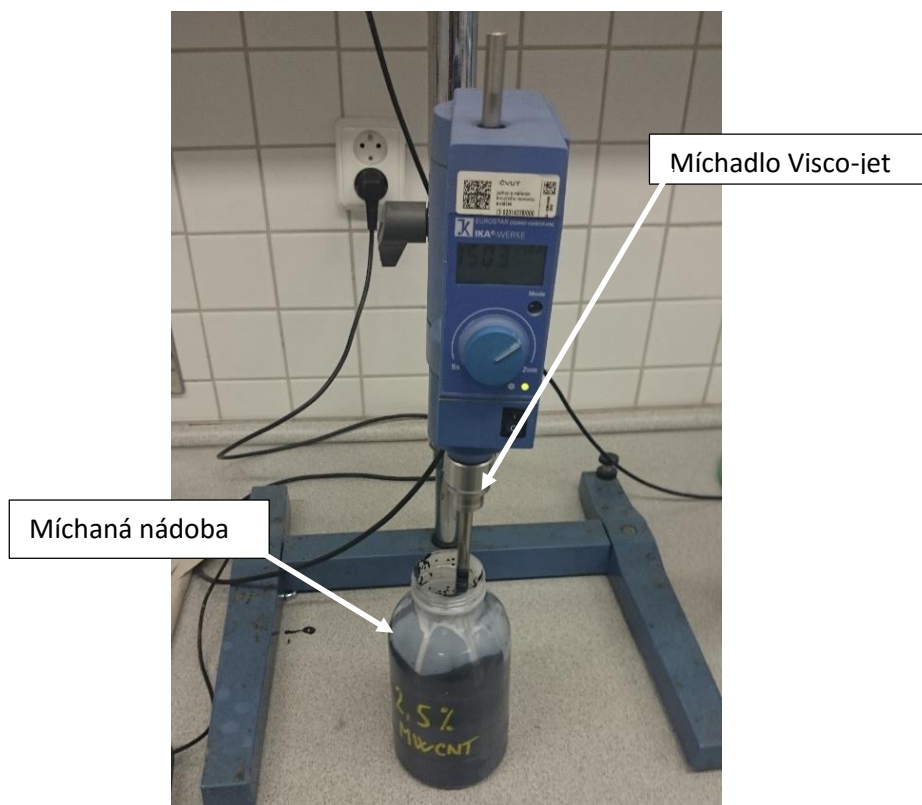
Tabulka 9: Souhrn naměřených dat dispergace míchadlem stator-rotor, kde n jsou otáčky, t je doba dispergace, m_1 je hmotnost nádoby s nátěrem, m_0 je hmotnost prázdné nádoby, m je rozdíl m_1 a m_0 .

4.2 Visco-jet

Dispergováno bylo v plastové nádobě o průměru 100mm za použití 2 pohárkového míchadla Visco-jet o průměru 50mm (obr. 22). Dispergovány byly vzorky: MWCNT 0,5%; MWCNT 2,5% a G 8%. Uspořádání experimentu je uvedeno na obr. 23.



Obrázek 22: Míchadlo Visco-jet – typ: dva kužele s otevřenými konci



Obrázek 23: Uspořádání experimentu míchadla Visco-jet

4.2.1 Postup měření:

Nejprve jsem zvážil každou nádobu se vzorkem a poté dispergoval v rozmezí otáček 1400-1500 min^{-1} , tak aby vsádka byla čerpána a docházelo k cirkulaci v celém objemu. Dobu dispergace jsem sledoval pomocí stopek. Vsádku nebylo potřeba chladit, jelikož vlivem dispergace nedocházelo k velkým teplotním rozdílům. Souhrn naměřených dat je uveden v tabulce 10.

Visco-jet					
Vzorek	n (min^{-1})	t (min)	m1 (g)	m0 (g)	m (g)
MWCNT 0,5%	1400	6	1125,1	68,4	1056,7
MWCNT 2,5%	1500	6	1036,3	68,4	967,9
G 8%	1500	6	1046,8	68,4	978,4

Tabulka 10: Souhrn naměřených dat dispergace míchadlem Visco-jet, kde n jsou otáčky, t je doba dispergace, m1 je hmotnost nádoby s nátěrem, m0 je hmotnost prázdné nádoby, m je rozdíl m1 a m0

4.3 Zubového míchadla

Dispergováno bylo v plastové nádobě o průměru 100mm za použití zubového míchadla CVS 69 1038.2 o průměru 50mm, výšce zubů 5,35mm a počtu zubů 18 (Obr. 4). Dispergovány byly vzorky: MWCNT 0,5%; MWCNT 2,5% a G 8%. Uspořádání experimentu je uvedeno na obr. 21.



Obrázek 24: Uspořádání experimentu zubového míchadla

4.3.1 Postup měření:

Nejprve jsem zvážil každou nádobu se vzorkem a poté dispergoval v rozmezí otáček 3000-3600 min^{-1} , tak aby vsádka byla čerpána a docházelo k cirkulaci v celém objemu. Vsádku nebylo potřeba chladit, jelikož vlivem dispergace nedocházelo k velkým teplotním rozdílům. Dobu dispergace jsem sledoval pomocí stopkek. Souhrn naměřených dat je uveden v tabulce 11.

Zubové míchadlo					
Vzorek	n (min^{-1})	t (min)	m1 (g)	m0 (g)	m (g)
MWCNT 0,5%	3000	6	1129,3	68,4	1060,9
MWCNT 2,5%	3600	6	1063,7	68,4	995,3
G 8%	3600	6	1032,1	68,4	963,7

Tabulka 11: Souhrn naměřených dat dispergace zubovým míchadlem, kde n jsou otáčky, t je doba dispergace, $m1$ je hmotnost nádoby s nátěrem, $m0$ je hmotnost prázdné nádoby, m je rozdíl $m1$ a $m0$.

5 Vyhodnocení experimentu

5.1 Dispergace pomocí stator-rotor míchadla

Sledována byla dodaná energie do vsádky pomocí míchadla. Pro určení příkonu míchadla jsem použil korelaci získanou od kolegy Kovaříka [12], který prováděl experiment pro určení příkonové charakteristiky použitého míchadla – IKA S25N – 25G (Obr. 19). Příkon stanovil z měření rozdílu teplot před a po dispergaci po danou dobu dle následujícího vztahu:

$$P = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T}{t} \quad (14)$$

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

$$P = 2,0846 \cdot 10^{-10} \cdot n^{2,7595} \quad (15)$$

Kde n jsou otáčky za minutu. Tento vztah platí pouze pro oblasti turbulentního proudění [12].

Z takto vypočteného příkonu byl dopočten měrný disipovaný příkon vložený do vsádky pomocí míchadla:

$$\varepsilon = \frac{P}{m} \quad (16)$$

Kde m je hmotnost vsádky a z příkonu byla dále dopočítána disipovaná energie:

$$E = P \cdot t \quad (17)$$

Kde t je doba dispergace.

Dále byla vypočítána obvodová rychlost ze vztahu:

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (18)$$

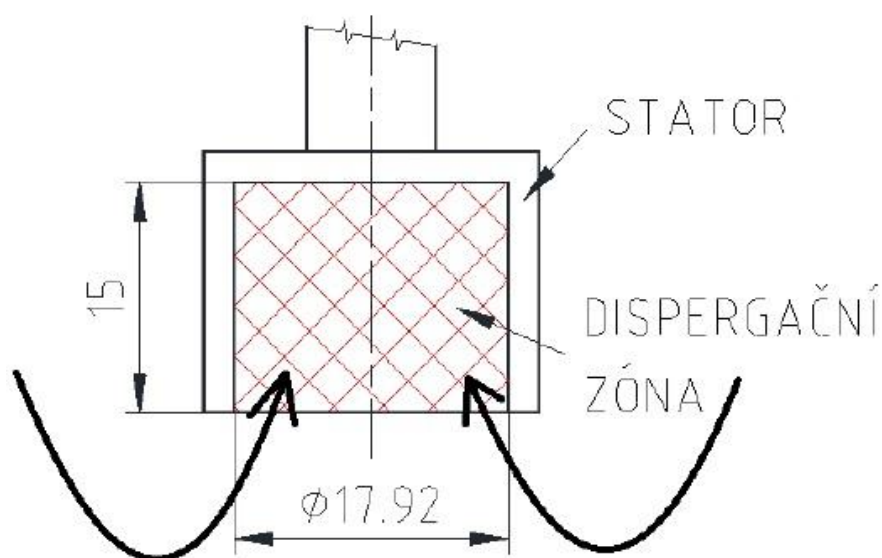
S ohledem na to, že k dispergaci dochází pouze v těsném okolí míchadla a zbytek nádoby je pouze zásobník, byl dopočten měrný disipovaný příkon v dispergační zóně míchadla (viz. Obr. 25) [12].

$$\varepsilon_{disp} = \frac{P}{m_{disp}} \quad (19)$$

Kde m_{disp} je hmotnost látky v okolí míchadla, která se vypočítá ze vztahu:

$$m_{disp} = \frac{\pi \cdot d_{DZ}}{4} \cdot h_{DZ} \cdot \rho \quad (20)$$

Kde d_{DZ} je průměr dispergační zóny, h_{DZ} je výška dispergační zóny a ρ je hustota vzorku.



Obrázek 25: Dispergovaná oblast pro míchadlo stator-rotor [12]

Vzorek	n1 (min ⁻¹)	t1 (min)	n2 (min ⁻¹)	t2 (min)	n3 (min ⁻¹)	t3 (min)	m1 (g)	m0 (g)	m (g)	v1 (m/s)
MWCNT 0,5%	15000	0,5	10000	5	/	/	535,4	44,8	490,6	19,63
MWCNT 1%	15000	6	/	/	/	/	535,4	44,8	490,6	19,63
MWCNT 2,5%	15000	0,5	10000	5	/	/	470,7	44,8	425,9	19,63
G 8%	15000	0,5	10000	3	15000	2	465,1	44,8	420,3	19,63
	v2 (m/s)	v3 (m/s)	P1 (W)	P2 (W)	P3 (W)	P (W)	ε (W/kg)	E (J/kg)	m _{disp} (kg)	ε _{disp} (W/kg)
	13,09	/	69,65	22,75	/	27,02	55,1	18172	0,004205	6425
	/	/	69,65	/	/	69,65	142,0	51112	0,004205	16565
	13,09	/	69,65	22,75	/	27,02	63,4	20933	0,004205	6425
	13,09	19,63	69,65	22,75	69,65	44,07	104,9	34603	0,004205	10481

Tabulka 12: Vyhodnocená data experimentu dispergace stator-rotor

Z tabulky 12 je vidět, že disperovaný příkon se pohybuje řádově $10^3 - 10^4$, což jde dle obr. 1 charakteristická oblast pro rotor stator. Z toho lze usoudit, že vyhodnocení disperovaného příkonu proběhlo správně.

5.2 Dispergace pomocí míchadla Visco-jet

Předmětem experimentu bylo vyhodnotit dodanou energii do vsádky. To však nebylo možné, protože není známá příkonová charakteristika míchadla Visco-jet. V rámci experimentu proběhl pokus o změření zmíněné charakteristiky, který je vyhodnocen v kapitole 3.2.

Zdůvodnění:

Z grafu 2 jde vidět, že $Po = f(Re)$, potom Reynoldsovo číslo vypočítáme ze vztahu:

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu_{ef}} \quad (21)$$

Kde μ_{ef} je efektivní viskozita a je dána poměrem efektivních smykových napětí a efektivních smykových rychlostí:

$$\mu_{ef} = \frac{\tau_{ef}}{\gamma_{ef}} \quad (22)$$

Potom efektivní smyková rychlost je dána vztahem:

$$\gamma_{ef} = k \cdot n \quad (23)$$

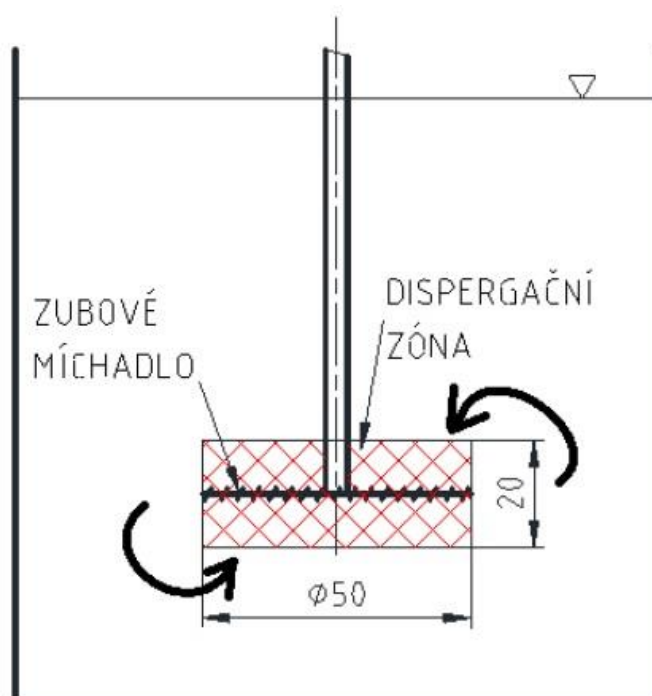
Kde k je součinitel, který závisí na typu míchadla a geometrickém uspořádání systému a n jsou otáčky míchadla. Pro míchadla Visco-jet nejsou hodnoty součinitele k známy, proto jsem nebyl schopen vyhodnotit tento experiment.

5.3 Dispergace pomocí zubového míchadla

Sledována byla také dodaná energie do vsádky pomocí míchadla. Lze předpokládat, že když experiment probíhal za otáček míchadla v rozmezí 3000-3600 min⁻¹, tak bylo dosaženo turbulentního režimu proudění. Díky tomuto poznatku lze vypočítat příkon zubového míchadla z příkonové charakteristiky, kdy $P_o = \text{konst.}$, potom se příkon stanoví ze vztahu:

$$P = P_o \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (24)$$

Kde P_o je známé příkonové číslo zubového míchadla, jehož hodnota je $P_o = 0,37$ a byla stanovena z [2], ρ je hustota vsádky, d je průměr míchadla a n jsou otáčky míchadla. Disipovaný měrný příkon ϵ a disipovaná energie E byly vypočteny ze vztahu (16) respektive (17). Dále byla dopočtena obvodová rychlost ze vztahu (18) a měrný disipovaný příkon v disipované oblasti míchadla dle vztahu (19). Disipovaná oblast je zobrazena na Obr. 26.



Obrázek 26: Dispergovaná oblast pro zubové míchadlo [12]

Vzorek	n (min ⁻¹)	t (min)	P ₀	m1 (g)	m0 (g)	m (g)	v (m/s)	P (W)	ε (W/kg)
MWCNT 0,5%	3000	6	0,37	1129,3	68,4	1060,9	7,85	17,85	16,8
MWCNT 2,5%	3600	6	0,37	1063,7	68,4	995,3	9,42	30,84	31,0
G 8%	3600	6	0,37	1032,1	68,4	963,7	9,42	30,84	32,0
	E (J/kg)	m _{disp} (kg)	ε _{disp} (W/kg)						
	6057	0,004205	4245						
	11156	0,004205	7335						
	11522	0,004205	7335						

Tabulka 13: Vyhodnocená data experimentu dispergace zubovým míchadlem

6 Diskuze

6.1 Porovnání dodané energie a technologických vlastností

Dispergované vzorky byly dodány týmu technologů pod vedením ing. Zoubka, který prováděl technologické zkoušky nátěrů. Jako nejzajímavější zkoušky s ohledem na vliv dispergace zde uvádím zkoušku stanovení vnitřního elektrického odporu povlaku a zkoušku stanovení zrcadlového lesku pod úhlem 60°. Obdržená data jsou pro porovnání uvedena v tabulce 14.

System	Disipovaný příkon	Disipovaná energie	Obvodová rychlost	Vnitřní odpor (Ω)	Lesk (GU)
Stator-rotor	ϵ_{disp} (W/kg)	E (J/kg)	v (m/s)		
MWCNT 0,5%	6425,02	18172,18	13,09; 19,63	1,56E+08	8,57E+00
MWCNT 1%	16565,35	51111,84	19,63	2,53E+05	7,93E+00
MWCNT 2,5%	6425,02	20932,78	13,09; 19,63	1,58E+05	3,07E+00
G 8%	10481,15	34607,67	13,09; 19,63	4,11+07	4,6
Zubové míchadlo					
MWCNT 0,5%	4245,05	6056,99	7,85	7,58+09	8,57
MWCNT 2,5%	7335,45	11156,32	9,42	2,08E+05	
G 8%	7336,45	11522,14	9,42	1,30E+07	4,55E+00
Visco-jet					
MWCNT 0,5%			3,67	3,38E+10	1,13E+01
MWCNT 2,5%			3,93	2,38E+05	2,87E+00
G 8%			3,93	3,28E+06	4,30E+00

Tabulka 14: Souhrn porovnání dodané energie a technologických vlastností

6.2 Vnitřní odpor

Jedním z požadavků na nátěrové systémy je, aby byly antistatické, to je schopnost odvádět elektrický náboj z povrchu součástí. Tohoto jevu je docíleno změnou měrného elektrického odporu povlaku na hodnotu $\leq 1 \cdot 10^6$. Nejlepší vodivosti dosahuje povlak s obsahem 2,5 hm. % MWCNT, který byl připravený metodou stator-rotor a následně byla nátěrová hmota nanášena pomocí natahovacího pravítka, viz tabulka 14. Pro grafit se z hlediska použité metody dispergace nejlépe jeví dispergace pomocí míchadla Visco-jet.

6.3 Lesk

Ke stanovení lesku nátěru dle normy ČSN ISO 2813 bylo použito zařízení TQC SOLOGloss. Zařízení měří lesk povrchu v jednotkách lesku [GU]. Za vysoký lesk je pod úhlem dopadu osvětlovacího paprsku 60° považována hodnota > 70 GU. Zrcadlový lesk černého skla s refrakčním indexem 1,567 má hodnotu 100 GU. Cílem bylo porovnat, které plnivo a jaká koncentrace vede ke zvýšení lesku, nebo naopak k jeho snížení. Při vyhodnocení této zkoušky bylo větší zmatnění bráno jako lepší a je patrné, že nižších hodnot tzn. většího zmatnění bylo dosaženo s použitím větší hmotnostní koncentrace MWCNT. K nejmatnějšímu povlaku při použití plniva MWCNT dochází u obsahu 2,5 hm. %, kdy dispergace byla provedena pomocí míchadla Visco-jet. Stejně jako u MWCNT, tak i u grafitu došlo k nejmatnějšímu povlaku použitím míchadla Visco-jet, viz tabulka 14.

6.4 Disipovaná energie

Největší hodnota disipované energie u porovnávaných technologií se očekávala za použití míchadla stator-rotor, kde i tento předpoklad byl splněn, viz tabulka 14. Z tabulky je patrné, že za stejných režimů míchaní, hodnota disipované energie roste, čím vzorek obsahuje vyšší množství koncentraci částic. Pro míchadlo Visco-jet se disipovaná energie nezdařila vyhodnotit, ale lze předpokládat, že bude řádově menší v porovnání s míchadlem stator-rotor. V případě vzorku MWCNT 2,5% je hodnota vnitřního odporu a lesku řádově stejná, proto postačí nízká hodnota disipované energie, vzhledem k tomu, že master batch u všech vzorků byl už předdispergován pomocí ultrazvuku.

7 Závěr

- Byla provedena rešerše zabývající se popisem různých dispergačních technologií, závislostí velikosti částic na dodané energii a základní charakteristikou nátěrových systémů.
- Byla provedena řada experimentů zabývajících se dispergací nátěrových systémů s vodou ředitelnou matricí. Dispergováno bylo míchadlem rotor-stator, zubovým míchadlem a míchadlem Visco-jet. Tyto technologie byly navzájem porovnány z hlediska disipované energie do systému a výsledných technologických vlastností nátěrů viz tabulka 14.
- Byl proveden experiment pro zjištění příkonové charakteristiky míchadla Visco-jet viz kapitola 3.2, ale pro nedostatek dat nemohl být úspěšně vyhodnocen, proto navrhuji zabývat se jím samostatně.
- Dispergace míchadlem stator-rotor měla prokazatelně příznivý vliv na elektrickou vodivost nátěru.
- Bylo odzkoušeno míchadlo Visco-jet a změřena jeho příkonová charakteristika, ale pro nedostatek dat jí nebylo možné použít pro vyhodnocení disipované energie do vsádky. Míchadlo Visco-jet prokázalo velmi dobré homogenizační vlastnosti.
- Vzhledem k tomu, že master batch u všech vzorků byl už předdispergovaný ultrazvukem, není zcela možné vyhodnotit vliv dispergace jednotlivých technologií, které spíše jenom homogenizovali směs. Z tohoto důvodu bych doporučil míchadlo Visco-jet, které nejlépe z porovnávaných technologií homogenizovalo.
- Nabízí se otázka, jakých výsledků bychom dosáhly v případě, že master batch by nebyl předdispergovaný, a proto doporučuji se tímto tématem zabývat i nadále.

8 Seznam použité literatury

- [1] 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.
- [2] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, 167 s. ISBN 80-01-03302-3.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] HINZE, J. O. (1955). Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE J.*, 1: 289–295. doi: 10.1002/aic.690010303
- [6] ZHANG, Jinli, Shuangqing XU a Wei LI. High shear mixers: A review of typical applications and studies on power draw, flow pattern, energy dissipation and transfer properties. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2012, 57-58: 25-41 [cit. 2015-06-10]. DOI: 10.1016/j.cep.2012.04.004.
- [7] Thomas Hielscher. *Ultrasonic Production of Nano-Size Dispersions and Emulsions*. ENS 2005, Dec 2005, Paris, France. TIMA Editions, pp.138-143. <hal-00166996>
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Medek, J. Power characteristics of agitators with flat incline blades. *Int. Eng. Chem.* 1980; 20: 664–672

- [11] UNADKAT, H., RIELLY, C.D. and NAGY, Z.K., 2011. PIV study of the flow field generated by a sawtooth impeller. *Chemical Engineering Science*, 66 (21), pp. 5374-5387.
- [12] KOVAŘÍK, M. (2015). *Dispergace v technologii výroby čisticových nanokompozitů*. Praha: ČVUT. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta strojní, ústav procesní techniky.
- [13] *Korean J. Chem. Eng.*, (2011). Experimental and computational fluid dynamics modeling of mixing by Visco-jet impellers, 1372-1379
DOI: 10.1007/s11814-010-0522-y
- [14] Zajíček, P. (2015). Vliv dispergace na tokové vlastnosti disperzí nátěrových hmot. Praha: ČVUT. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta strojní, ústav procesní techniky.
- [15] ZOUBEK, M. (2013). *Vliv nanočástic na vlastnosti nátěrové hmoty*. Praha: ČVUT. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta strojní, ústav technologie.

9 Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
τ_C	[Pa]	Napětí způsobující rozpad kapky
τ_S	[Pa]	Povrchové napětí
τ_D	[Pa]	Viskózní napětí
τ_{ef}	[Pa]	Efektivní smykové napětí
ρ_C	[kg/m ³]	Hustota kontinuální fáze
ρ_D	[kg/m ³]	Hustota dispergované fáze
ρ	[kg/m ³]	Hustota vsádky
ε	[W/kg]	Disipovaný měrný příkon
ε_{max}	[W/kg]	Maximální disipovaný měrný příkon
ε_{disp}	[W/kg]	Disipovaný měrný příkon v dispergované oblasti
σ	[N/m]	Povrchové napětí
d_k	[m]	Průměr kapky
d_{DZ}	[m]	Průměr dispergované oblasti
d	[m]	Průměr míchadla
H	[m]	Výška nádoby
h_{DZ}	[m]	Výška dispergované oblasti
C_1	[1]	Empirická konstanta
μ_d	[Pa.s]	Dynamická viskozita
μ	[Pa.s]	Dynamická viskozita
μ_{ef}	[Pa.s]	Efektivní dynamická viskozita
m	[kg]	hmotnost
m_{disp}	[kg]	Hmotnost dispergované oblasti
V	[m ³]	Objem
P	[W]	Příkon
k	[1]	Součinitel geometrického uspořádání míchadla
γ_{ef}	[s ⁻¹]	Efektivní smyková rychlost

10 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Dosažitelná velikost částic pro danou metodu [1]</i>	9
<i>Obrázek 2: Spirálový statický směšovač [1]</i>	11
<i>Obrázek 3: Možné uspořádání stator-rotor míchadel – a,b) vsádkové, c,d) průtočné [6]</i>	12
<i>Obrázek 4: Zubové míchadlo CVS 69 1038.2 [2]</i>	13
<i>Obrázek 5: Míchací systém Visco-jet [7]</i>	14
<i>Obrázek 6: Varianty míchadel Visco-jet: a) kužel s otevřenými konci; b) otevřená spirála; c) Visco jet Crack</i>	15
<i>Obrázek 7: Schématické znázornění principu míchadla stator-rotor</i>	16
<i>Obrázek 8: Princip koloidního mlýnu s kuželovým rotorem [2]</i>	17
<i>Obrázek 9: Princip rozpadu částic v radiálním míchadle stator-rotor</i>	18
<i>Obrázek 10: Stator-rotor firmy Chemineer Greco – jednostupňové provedení [1]</i>	18
<i>Obrázek 11: Stator-rotor firmy Chemineer Greco – dvoustupňové provedení [1]</i>	19
<i>Obrázek 12: Otevřený perličkový mlýn s více diskovým míchadlem [2]</i>	20
<i>Obrázek 13: Schéma zařízení pro ultrazvukovou dispergaci [7]</i>	21
<i>Obrázek 14: Znázornění nanotub A) SWCNT B) DWCNT [9]</i>	23
<i>Obrázek 15: Konfigurace pro měření míchadlem 6SL CVS 691020</i>	27
<i>Obrázek 16: Konfigurace pro měření míchadlem Visco-jet</i>	27
<i>Obrázek 17: Kalibrační křivka</i>	29
<i>Obrázek 18: Závislost příkonového čísla na Reynoldsově čísle</i>	31
<i>Obrázek 19: Míchadlo stator-rotor typ IKA S 25 N – 25G</i>	32
<i>Obrázek 20: Uspořádání experimentu stator-rotor</i>	33
<i>Obrázek 21: Shrnutí naměřených dat z tabulky 8</i>	34
<i>Obrázek 22: Míchadlo Visco-jet – typ: dva kužele s otevřenými konci</i>	35
<i>Obrázek 23: Uspořádání experimentu míchadla Visco-jet</i>	36
<i>Obrázek 24: Uspořádání experimentu zubového míchadla</i>	37
<i>Obrázek 25: Dispergovaná oblast pro míchadlo stator-rotor [12]</i>	40
<i>Obrázek 26: Dispergovaná oblast pro zubové míchadlo [12]</i>	42

11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Dosažitelné velikosti částic pro danou metodu – shrnující tabulka [1].....	9
Tabulka 2: Složky nátěrových hmot a jejich stručná charakteristika [8]	22
Tabulka 3: Přehled použitých vzorků a jejich značení	24
Tabulka 4: Měření hustoty vzorků.....	25
Tabulka 5: Naměřená data pro vyhodnocení příkonové charakteristiky Visco-jet, kde n jsou otáčky, U je napětí a M_k je kroutící moment.	28
Tabulka 6: Naměřená a dopočtená data míchadla 6SL	29
Tabulka 7: Experimentální data příkonové charakteristiky míchadla Visco-jet	30
Tabulka 8: Naměřená data pro měření vlastnosti systému	33
Tabulka 9: Souhrn naměřených dat dispergace míchadlem stator-rotor, kde n jsou otáčky, t je doba dispergace, m_1 je hmotnost nádoby s nátěrem, m_0 je hmotnost prázdné nádoby, m je rozdíl m_1 a m_0	35
Tabulka 10: Souhrn naměřených dat dispergace míchadlem Visco-jet, kde n jsou otáčky, t je doba dispergace, m_1 je hmotnost nádoby s nátěrem, m_0 je hmotnost prázdné nádoby, m je rozdíl m_1 a m_0	36
Tabulka 11: Souhrn naměřených dat dispergace zubovým míchadlem, kde n jsou otáčky, t je doba dispergace, m_1 je hmotnost nádoby s nátěrem, m_0 je hmotnost prázdné nádoby, m je rozdíl m_1 a m_0	38
Tabulka 12: Vyhodnocená data experimentu dispergace stator-rotor.....	40
Tabulka 13: Vyhodnocená data experimentu dispergace zubovým míchadlem	43
Tabulka 14: Souhrn porovnání dodané energie a technologických vlastností.....	44

12 Seznam příloh

Přílohy dispergace-výpočty.xls a příkon-Visco jet.xls jsou vloženy na CD a připojené spolu s bakalářskou prací.