

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELKÉ TECHNIKY

**ZAŘÍZENÍ V TECHNOLOGII VÝROBY
MIKRO A NANOČÁSTICOVÝCH
DISPERZÍ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vysoká škola:
Ústav:

ČVUT v Praze
12118

Fakulta:
Akademický rok:

strojní
2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro

Jakub Tauer

program

B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

obor

2301R000 bezoborový

název česky: **Zařízení v technologii výroby mikro a nanočásticových disperzí**

název anglicky:

Equipment for production of micro and nanoparticles dispersions

Zásady pro vypracování

Zadání:

Vypracujte literární, patentovou resp. průmyslovou rešerši zaměřenou na zařízení pro přípravu mikro a nanočásticových disperzí v technologiích výroby částicových kompozitů. Při zpracování bakalářské práce se zaměřte zejména na:

- zpracujte přehled dispergačních technologií a zařízení vhodných pro přípravu mikro až nanočásticových disperzí,
- podrobně se zaměřte na popis principu dispergace a dispergačních zařízení s rychloběžnými rotačními míchadly v konfiguraci stator-rotor,
- uveďte příklady využití dispergačních zařízení stator-rotor pro konkrétní aplikace ve vsádkové (cirkulační) a in-line konfiguraci.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: cca 20 stran, obsah dle bodů v zadání práce

Seznam odborné literatury: dle doporučení vedoucího práce a vlastní řešerše

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

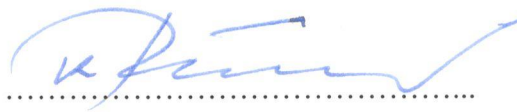
Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 22. dubna 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 26. června 2015



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



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

V Praze dne 22. 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 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 24.4.2015



.....
Jakub Tauer

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Tomáše Jirouta, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

V Praze dne

.....

Jakub Tauer

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D. za jeho podporu, ochotu a za udělené rady k této bakalářské práci a také své rodině za jejich trpělivost a podporu při jejím psaní.

Anotační list

Jméno autora: Jakub
Příjmení autora: Tauer
Název práce česky: Zařízení v technologii výroby mikro a nanočásticových disperzí
Název práce anglicky: Equipment for production of micro and nanoparticles dispersions

Rozsah práce:

počet stran:	41
počet obrázků:	28
počet tabulek:	4
počet příloh:	0

Akademický rok: 2014/2015
Jazyk práce: český
Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky (U12118)
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství (B2342)
Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Oponent:

Zadavatel: Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Fakulta strojní ČVUT v Praze

Anotace: Tato práce se zabývá zařízeními v technologii výroby mikro a nanočásticových disperzí, zejména se zaměřuje na zařízení v konfiguraci stator-rotor. Práce zahrnuje výsledky tří experimentů pro disperze kapalina-kapalina a prášek-kapalina ve vsádkové a průtočné konfiguraci.

Klíčová slova: Dispergační zařízení, Rotor-Stator míchací zařízení, disperze kapalina kapalina, disperze prášek kapalina

Abstract: This work is focused on equipment for production of micro and nanoparticles dispersions, especially on stator-rotor devices. Thesis includes results of three experiments for liquid-liquid and powder-liquid dispersions in batch and in-line stator-rotor devices.

Key words: Dispersion equipment, Rotor-Stator mixing devices, liquid to liquid dispersion, powder to liquid dispersion

Využití: Parametry zařízení pro výrobu mikro a nanočásticových disperzí

Obsah

Poděkování	2
Anotační list	3
Úvod	6
1 Přehled dispergačních technologií	7
2 Rotor-stator míchací zařízení	12
2.1 Geometrie	12
2.2 Shrnutí dosavadních znalostí	14
2.2.1 Příkon	14
2.2.2 Čerpací výkon	14
2.2.3 Rychlostní pole	15
2.3 Kritéria pro návrh zařízení	16
2.4 Disperze a emulze kapalin	16
2.5 Disperze pevných látek a prášků	17
3 Vliv parametrů zařízení a pracovních podmínek na disperzi kapalin u průtočných zařízení	19
3.1 Teoretický úvod	19
3.2 Popis experimentu	20
3.3 Výsledky	21
3.3.1 Příkon	21
3.3.2 Jednoprůchodová operace	22
3.3.3 Víceprůchodová operace	22
3.4 Shrnutí	23
4 Vliv parametrů zařízení a pracovních podmínek na disperzi kapalin u vsádkových zařízení	24
4.1 Teoretický úvod	24
4.2 Popis experimentu	25
4.3 Výsledky	27
4.4 Shrnutí	29
5 Vliv parametrů zařízení a pracovních podmínek na disperzi prášků do kapalin v in-line konfiguraci 30	
5.1 Teoretický úvod	30
5.2 Popis experimentu	31
5.3 Výsledky	33
5.3.1 Průtok a spotřeba energie	33
5.3.2 Velikost shluků částic	34
5.4 Shrnutí	35

Závěrečné shrnutí práce.....	36
Seznam veličin.....	38
Seznam použité literatury.....	39

Úvod

V dnešní době jsou mikro a nanočásticové látky často využívány. Jsou kladeny stále vyšší nároky na jejich složení a velikost dispergovaných částic. Cílem této práce je zaměřit se na dispergační technologie a uvést příklady zařízení vhodných pro přípravu mikro až nanočásticových disperzí.

Z mnoha různých technologií se práce zaměřuje zejména na zařízení s rychloběžnými míchadly v konfiguraci stator-rotor. Cílem je popsat, jak tato míchadla fungují, jak je lze využít, čím lze měnit jejich pracovní parametry, podrobně popsat děje, ke kterým v hlavě zařízení dochází, a shrnout dosavadní znalosti v oblasti stator-rotor ve vsádkových a průtočných konfiguracích.

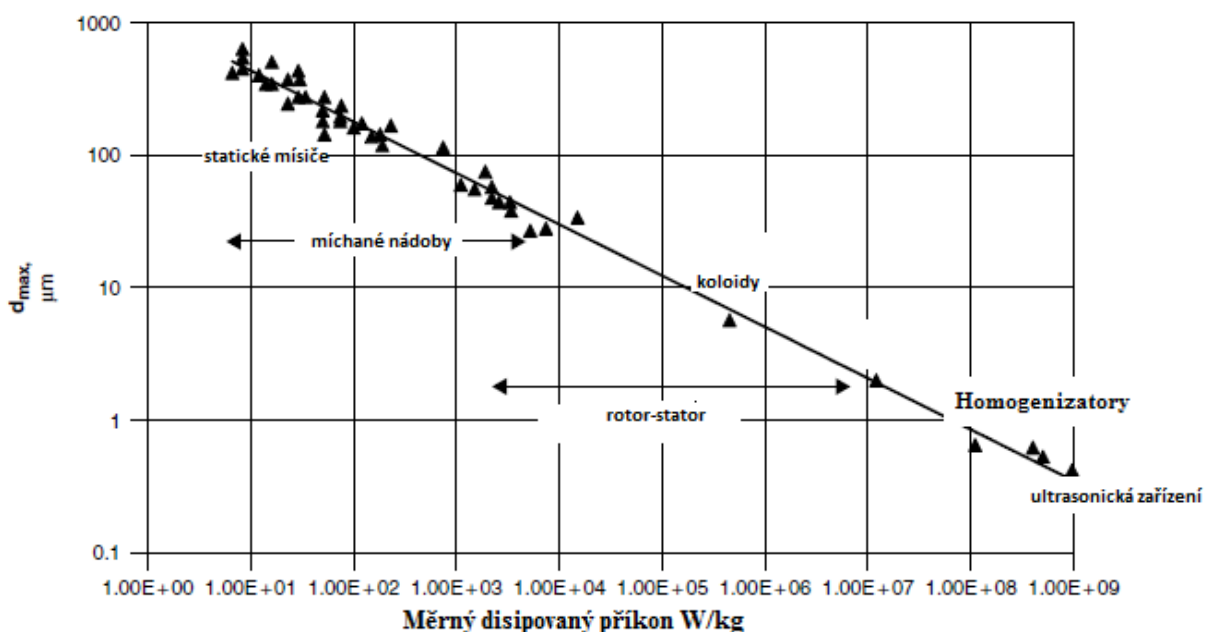
Konkrétně se práce zabývá třemi experimenty provedenými na průtočných a vsádkových zařízeních stator-rotor pro disperze kapalina-kapalina a prášek-kapalina, kde je cílem zhodnotit jejich energetickou náročnost, zjistit jaké parametry ovlivňují příkon zařízení, zjistit závislosti velikostí dispergovaných částic a vhodnou korelační veličinu.

1 Přehled dispergačních technologií

Disperzi si lze představit jako rozptýlení jedné látky do látky druhé. Disperzi lze nazvat jakoukoliv soustavu, která obsahuje dva druhy hmoty, přičemž jeden je rozptýlen ve druhém ve formě částic. Základní látka se nazývá disperzní prostředí a rozptýlená látka se nazývá disperzní podíl. V mé práci se budu zabývat kapalinou jako disperzním prostředím a práškem a kapalinou jako disperzním podílem.²

Rozptýlení určité látky do látky druhé není vždy samovolně možné, proto je nutné využívat speciální zařízení, pomocí kterých lze disperze docílit. Tato zařízení musejí dosahovat vysokých hodnot smykového napětí a velmi důležité jsou hodnoty disipované energie a měrného disipovaného příkonu. Čím vyšších hodnot měrný disipovaný příkon nabývá, tím menších částic disperzního podílu jsme schopni dosáhnout. Hodnota disipovaného příkonu je hlavním parametrem při výběru disperzního zařízení.

Zařízení pro disperzi nanočástic a mikročástic lze rozdělit podle mnoha kritérií, nejdůležitějším ale je velikost částic dispergované látky. V následujícím grafu je možné vidět závislost maximální velikosti kapek na hodnotě měrného disipovaného příkonu, sloužící k výběru zařízení pro disperzi kapalina kapalinou, konkrétně oleje do vody.



Obrázek 1 - Závislost velikosti kapek na hodnotě měrného disipovaného příkonu¹

Tuto závislost lze odvodit s pomocí napětí, které je potřeba k deformaci kapky :

$$\tau_c = \rho_c \cdot v'(d)^2 = \rho_c \int_{\frac{1}{d}}^{\infty} E(k) dk \quad (1)$$

kde ρ_c značí hustotu disperzního prostředí, $v'(d)$ rozdíl rychlostí podél průměru kapky d a $E(k)$ je funkcí spektrální hustoty energie. Ta je podle Kolgomolova stanovena :

$$E(k) = \beta_k \cdot \varepsilon^{\frac{2}{3}} \cdot k^{-\frac{5}{3}} \quad (2)$$

β_k je Kolgomolova konstanta, která odpovídá hodnotě asi 3/2, ε značí množství měrného disipovaného příkonu a k je převrácená hodnota průměru $1/d$. Pokud spojíme vztahy (1) a (2), dostáváme vztah pro τ_c :

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

Kohezní napětí v kapce lze vyjádřit pomocí povrchového napětí δ :

$$\tau_s \sim \frac{\delta}{d} \quad (4)$$

Dále pro viskózní napětí v kapce platí :

$$\tau_d \sim \mu_d \frac{(\frac{\tau_c}{\rho_d})^{0,5}}{d} \quad (5)$$

kde ρ_d je hustota disperzního podílu a μ_d jeho viskozita. Pro maximální velikost kapky $d=d_{max}$ platí :

$$\tau_c = \tau_s + \tau_d \quad (6)$$

Spojením vztahů (3), (4), (5) a (6) a jejich vzájemným dosazením dostáváme vztah pro výpočet maximální velikosti kapek :

$$d_{max} = C_1 \cdot \left(\frac{\delta}{\rho_c}\right)^{0,6} \cdot \varepsilon_{max}^{-0,4} \quad (7)$$

Pro nízkoviskózní disperzní podíl je τ_d zanedbatelné, tudíž kapku drží pohromadě jen povrchové síly. C_1 je konstanta, kterou je nutno empiricky určit a závisí na typu a geometrii konkrétního zařízení.

Nemůže být dosaženo maximální stabilní velikosti kapek, pokud veškerá látka neprojde oblastí maximální disipace energie, proto je měrný disipovaný příkon ε nahrazen ve vztahu (7) maximálním měrným disipovaným příkonem ε_{max} .

Při předpokladu, že disperzní prostředí a disperzní podíl nejsou během procesu zaměněny za jiné látky, můžeme pro korelaci velikosti kapek ze vztahu (7) zanedbat povrchové napětí δ a hustotu ρ_c , protože jsou konstantní.

Velikost kapek tedy lze korelovat měrným disipovaným příkonem a vztah, který nám vyjadřuje směrnicí grafem proložené přímkou na obrázku 1 :

$$D_K \sim \varepsilon^{-0,4} \quad (8)$$

je jedním z nejdůležitějších vztahů pro výběr disperzního zařízení.¹

Typ zařízení	Hodnota disipované energie (W/kg)	Rozhraní velikosti kapek (μm)
Statické směšovače	10–1000	50–1000
Míchané nádoby	0.1–100	20–500
Vysokorychlostní rotor-stator	1000–100 000	0.5–100
Homogenizátory	~10 ⁸	0.5–1
Ultrasonická zařízení	~10 ⁹	0.2–0.5

Tabulka 1- přehled zařízení a dosahovaných velikostí kapek¹

V tabulce 1 můžeme vidět přehled jednotlivých dispergačních zařízení vhodných pro přípravu mikro a nanočásticových disperzí.

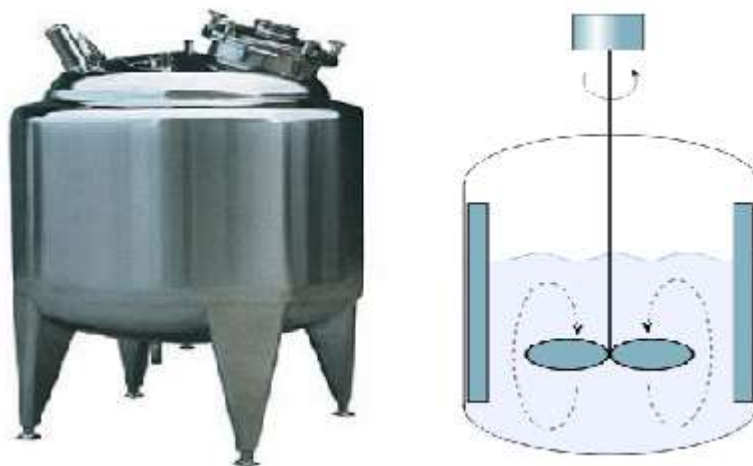
Statické směšovače se používají zejména v in-line průtočné konfiguraci pro smíchání dvou kapalných látek. Látky se promíchávají pouze průtokem přes statickou část směšovače. Dochází zde k velmi malé přeměně energie, a proto jsou dispergované kapky poměrně velké. Často nahrazovány dynamickým směšovačem.⁷



Obrázek 2 – Příklad statického směšovače⁷

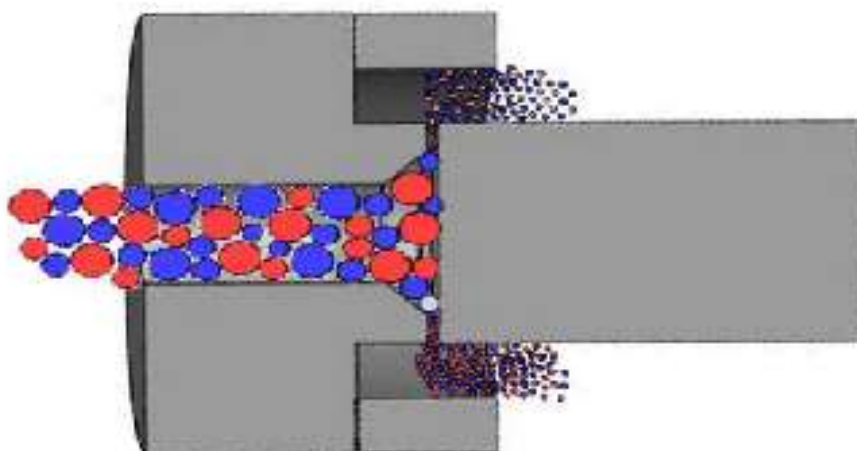
Míchané nádoby využívají ke smíšení dvou látek mechanicky poháněného míchadla. Množství disipované energie, a tedy i velikost částic závisí na rychlosti a tvaru míchadla. Míchané nádoby neobsahují žádný stator. Existují speciální typy zubových míchadel, která

jsou vhodná pro disperzi, ale nedosahují tak vysokých hodnot smykového napětí jako zařízení stator-rotor.¹



Obrázek 3 – Příklad míchané nádoby

Homogenizátory jsou zařízení, ve kterých je dosahováno velmi vysokého smykového napětí, je u nich však nutné, aby pracovaly za vysokého tlaku. Často využívají rotor-stator jako pomocné zařízení a jsou vhodné pro disperze kapalin i prášků. Homogenizací se vyrábí krémy, masti nebo farmaceutické suspenze.⁸



Obrázek 4 - Schéma jednoduchého homogenizátoru⁸

Ultrasonická zařízení využívají ultrazvukových vln k roztržení shluků částic a kapek k vytvoření disperzí. Pomocí ultrazvuků se vyrábí barviva, inkousty nebo šampony. Objevují se průtočná i vsádková zařízení o objemu až 2000 l. Využívají se zejména k disperzi prášků.⁹



Obrázek 5 - Ukázka ultrazvukového zařízení⁹

2 Rotor-stator míchací zařízení

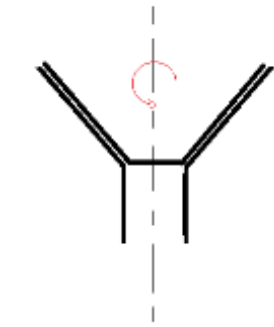
Zařízení se skládají z vysokorychlostního rotoru (10-50m/s) a nepohyblivého statoru. Díky vysoké rychlosti a výkonu dosahují daleko vyšších hodnot stříhu (smyková rychlost), než klasická mechanicky míchaná zařízení. Rotor a stator společně vytváří míchací energii, vznikají dutiny a tahová napětí.

Slouží k homogenizaci, disperzi, emulzifikaci, mletí, rozpouštění, srážení nebo i rozpadu buněk. Často se využívají k produkci latexů, adheziv a čistících prostředků. Zařízení existují jak malá laboratorní, tak i velká o průtoku až 3500 l/min. Bohužel v současné době nedokážeme plně porozumět všem dějům, ke kterým v Rotor/Stator zařízeních dochází.¹

2.1 Geometrie

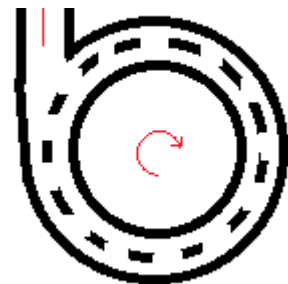
- Koloidní mlýn

- Rotor a Stator ve tvaru kužele
- Často se přidávají zuby
- Sloty (škvíry) na rotoru i statoru



- Radiální vytlačovací

- Rotuje uvnitř stabilního pouzdra se sloty
- Rotor vytlačuje látku radiálně přes sloty statoru
- Sloty mohou mít mnoho tvarů a velikostí



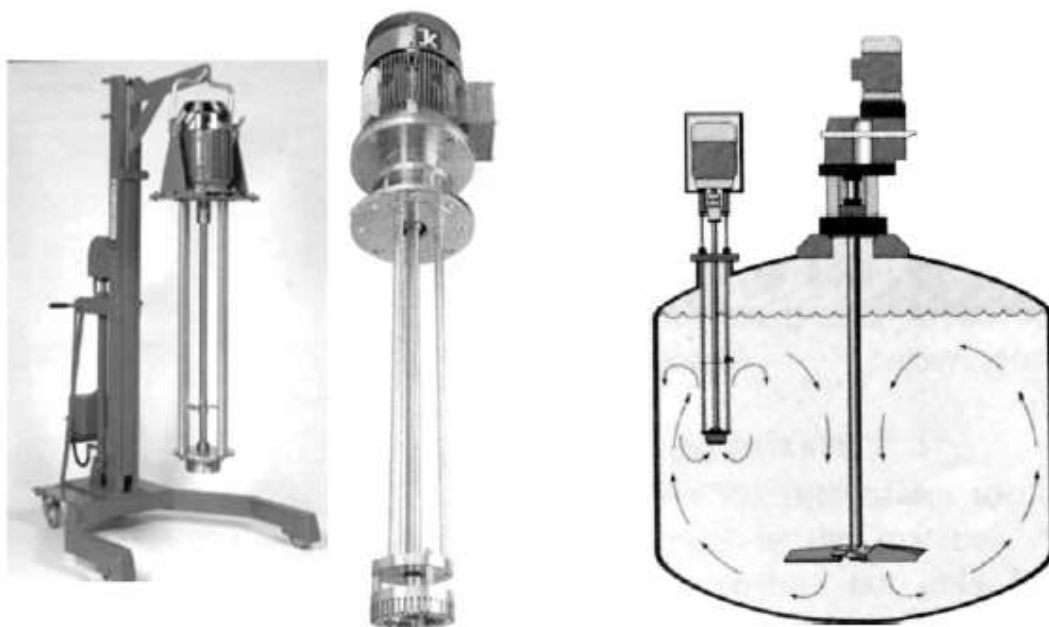
- Axiální vytlačovací

- Rotor látku vytlačuje ve směru osy přes sloty statoru
- Vzniká zde tangenciální smykový proud – přidáváme tandemový trubkový mixer
- Mezera mezi rotorem a státorem může být upravena pomocí podložek

Hlavy bývají často umístovány mimo osu, aby bylo zaručeno dobré promíchání. Tok látky v míchacím zařízení může být řízen deflektorem (můžeme si ho představit jako desku, od které se látka odráží a vzniká tak jiný směr toku).

Podle druhu operací dělíme zařízení na vsádková, polo-vsádková a průtočná.

U vsádkových zařízení je míchací hlava většinou připevněna k dlouhým hnacím hřídelím a k pomocným tyčím. Pro malé hlavy se navíc přidává pomocné míchadlo, protože hlava samotná si nedokáže vytvořit dostatečný cirkulační proud k dobrému promíchání celé směsi.



Obrázek 6 - Míchací zařízení vsádkové. Vlevo míchací hlava na poháněcí hřídeli. Vpravo nádoba s mimo osu umístěnou míchací hlavou a s pomocným míchadlem¹

Průtočná zařízení mají míchací hlavu uvnitř pláště. Vstupní potrubí pro látku bývá umístěno v centru (oku) rotoru. Výstupní potrubí axiálně nebo radiálně.



Obrázek 7 - Průtočná míchací zařízení. Vpravo naznačeny cirkulační proudy¹

Bohužel toho zatím o Rotor/Stator zařízeních víme málo (příkon, čerpací výkon, rychlostní pole) a většinou je nutné si zařízení pro danou aplikaci vždy vyzkoušet. V poslední době se však výzkum začíná tímto odvětvím zabývat. U dávkovacích mixérů bez zubů jsou už známé parametry, jako je průměr hlavy nebo mezera mezi statorem a rotorem.

2.2 Shrnutí dosavadních znalostí

2.2.1 Příkon

Pro turbulentní proudění je příkonové číslo (bezrozměrný příkon) konstantní. Pro plíživé proudění (malé Re) závisí příkon na Reynoldsově čísle Re . Na příkon mají velký vliv deflektory, protože při nízké rychlosti rotace a spodním čerpání nemůže mixér čerpat energii pro nízkoviskozní materiály - vzniká velká přechodová oblast. Deflektory nad a pod míchací hlavou způsobují, že se proudění široce mění. Začátek turbulentního proudění závisí tedy i na viskozitě. Příkon je ovlivněn také šířkou mezery mezi statorem a rotorem.¹

2.2.2 Čerpací výkon

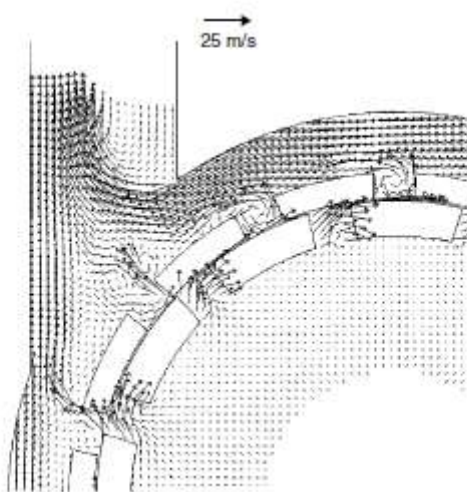
Abychom mohli zjistit více o čerpacím výkonu u vsádkových zařízení, musíme znát rychlostní pole, jehož zjištění je ale velmi náročné. Proto se většinou spoléháme na informace od výrobce nebo na metodu pokus omyl. Čerpací výkon je ovlivněn pozicí míchací hlavy a případnou přítomností pomocného míchadla (to nám zaručí dostatečnou cirkulaci látky ve vsádkovém zařízení).

Daleko snazší je měření čerpacího výkonu u průtočných zařízení, zde se spoléháme na daleko přesnější údaje výrobců. U zařízení, která mají v řadě více rotorů a statorů, je čerpací výkon spíše okrajový. Může však způsobit pokles tlaku.¹

2.2.3 Rychlostní pole

Ze studia rychlostního a deformačního pole se můžeme hodně dozvědět o dispergaci a emulzifikaci v rotor-stator míchacích zařízeních. Používáme pokročilé výpočty dynamiky tekutin (většinou se používá voda – stále turbulentní i v úzkých mezerách a slotech) nebo laserovou Dopplerovu anemometrii (dále LDA). V poslední době byl v této oblasti učiněn pokrok, což zlepšilo naše vnímání Rotor/Stator zařízení. Byla provedena LDA pro zařízení s mezerou 0,5mm a 4mm a bylo zjištěno, že pokud je mezera příliš široká, tekutina v ní zůstává a není dostatečně rychle vytlačována k výpusti. Je tedy důležité mít mezi rotorem a státorem úzkou mezeru, i když nejsou příliš velké nároky na smyk jako např. u disperzního procesu.¹

V blízkosti výtoku vzniká vířivý proud ve směru rotoru. Na opačném konci hlavy volí kapalina cestu nejnižšího odporu, a to i proti směru pohybu rotoru. K největšímu hmotnostnímu toku dochází přes sloty nejbližší výpusti, naopak k nejnižšímu nejdále od ní. K největšímu toku ale paradoxně dochází už přes sloty napůl překryté zubem rotoru. Turbulentní kinetická energie je nejnižší, když je slot otevřen. Nejvyšších hodnot dosahuje, když je slot plně překryt a pak pozvolně klesá.¹



Obrázek 8 - Naznačení rychlostního pole látky, zjištěné pomocí LDA na IKA prototypu míchacího zařízení¹

2.3 Kritéria pro návrh zařízení

Pro návrh míchacího zařízení je nutné vzít v potaz mnoho věcí :

- Hustota míchané látky
- Koalescentní chování
- Reakce materiálu míchadla s míchanou látkou
- Nutnost předemletí
- Počet vstupních proudů
- Teplota operace a případná nutnost ohřevu nebo chlazení (látko může být ohřívána velkou rychlostí rotace rotoru a množstvím jeho energie)
- Efekt stříhu na látku
- Druh míchadla a jeho design – přidání pomocného míchadla nebo deflektorů
- Rychlost rotoru
- Mezera mezi rotorem a statorem
- Průměr hlav rotoru a statoru

Pro průtočná zařízení je navíc třeba určit :

- Požadovaný průtok
- Čerpací výkon nebo užití externího čerpadla – většinou jsou preferovány externí pumpy, protože je pak možné měnit rychlost rotoru, aniž by se měnil průtok
- Operační tlak
- Místo vstupu látky do míchací hlavy

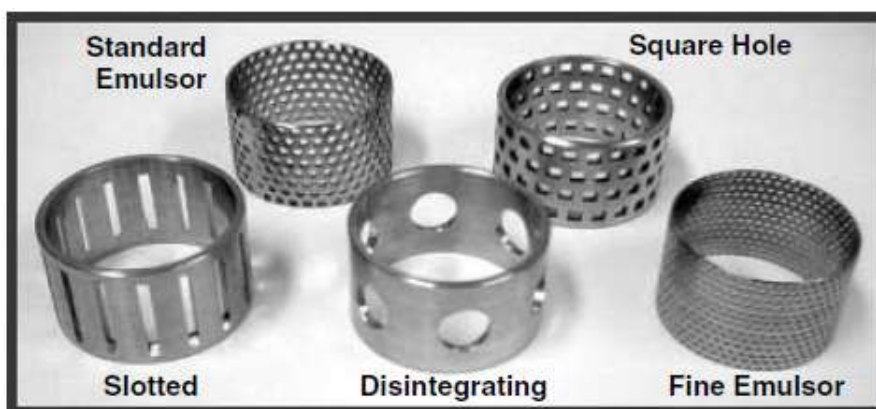
2.4 Disperze a emulze kapalin

V této oblasti se studie omezuje spíše jen na vsádková míchací zařízení, protože experimenty jsou velice náročné. U vsádkových zařízení můžeme snadněji zjistit velikost kapky a korelovat (spojovat veličiny mezi sebou) výsledky.¹

Hodnoty výkonu dosahují podobných hodnot jako u mechanicky poháněných oběžných kol, ale hodnota výkonu na jednotku objemu je mnohem vyšší k velké rychlosti otáčení. Disperze a emulze jsou obvykle rozptýlené různé objemové fáze. Z toho důvodu musí být v zařízení přítomna povrchově aktivní látka nebo jiný stabilizátor, aby bylo zabráněno

shlukování. Bohužel je zatím těžké pochopit, jaký vliv na maximální velikost kapky mají povrchové a mechanické síly.¹

Bylo zjištěno, že pokud zvětšíme mezeru mezi rotorem a státorem při konstantních otáčkách, jsme schopni vyrábět menší kapky i přesto, že nominální hodnota stříhu se snížila. Menší kapky byla také schopna produkovat hlava statoru s velkým počtem menších slotů (se stejným výkonem) jako hlava s velkými kruhovými sloty (na obrázku jako disintegrating).¹



Obrázek 9 - Ukázka velikostí a pozic slotů na statorové hlavě¹

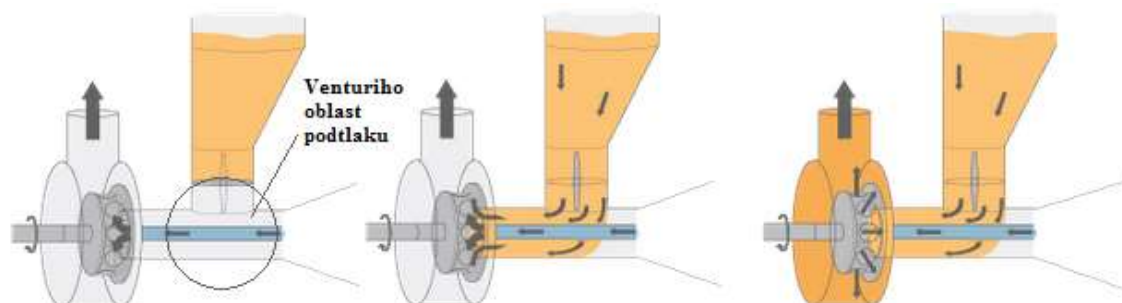
Hlava s více sloty soustředí lépe energii a dochází zde k vyšší produkci turbulentní kinetické energie. Obecně platí, že čím vyšší bude vstupní energie, tím budeme dosahovat menší velikosti kapek. Nic ale nezaručuje, že disperze bude stabilní a mimo zařízení nebude docházet ke srůstání, proto je třeba používat povrchově aktivní látky.¹

2.5 Disperze pevných látek a prášků

Rotor/Stator míchací zařízení se často mohou použít pro tzv. mokré míchání a disperzi prášků rozpustných v tekutinách. Nacházejí využití při výrobě zahušťovadel, stabilizátorů, mouky, škrobů, sušeného mléka nebo jíů. Existuje mnoho zařízení pro tyto operace, ale v zásadě mají stejné základní komponenty : In-line průtočný rotor-stator mixér, vysokotlaké odstředivé čerpadlo, násypku pro prášek a Venturiho trubici.¹

Odstředivé čerpadlo čerpá kapalinu přes Venturiho trubici na dopravník prášku. Nízký tlak, který vzniká ve Venturiho trubici způsobí, že je prášek nasáván do proudící tekutiny, která téměř ihned vstupuje do rotor/stator zařízení. To intenzivní a rychlou rotací

rozptyluje prášek do kapaliny ve směšovací hlavě. Zařízení jsou považována za energeticky náročná, ale v určitých specifických úkolech mohou být výhodnější.¹



Obrázek 10 - Využití Venturiho trubice při průtočné dispergaci prášku do kapaliny v zařízení Silverson. Dochází k vytvoření podtlaku a poté k otevření zásobníku prášku, který je nasávám do proudící kapaliny, kde ihned vstupuje do hlavy zařízení, ve které dochází ke smíšení.¹⁰

3 Vliv parametrů zařízení a pracovních podmínek na disperzi kapalin u průtočných zařízení

Vliv parametrů a pracovních podmínek na příkon a velikost kapek je značný až klíčový. Bylo zjištěno, že výsledky jsou ovlivňovány rychlostí rotoru, hodnotou průtoku, viskozitou dispergované látky i velikostí pracovního prostoru (hlavy zařízení) a slotů. Příkon lze korelovat pomocí dvou příkonových konstant, které lze určit experimentálně pro různé druhy zařízení. Konstanta průtoku k_1 a konstanta výkonu při nulovém průtoku P_{oz} .³

3.1 Teoretický úvod

Rozdíl mezi vsádkovými a průtočnými zařízeními je v rychlosti rotoru, která nepřetržitě řídí množství průtoku u průtočných zařízení. Proto lze příkon s touto rychlostí přímo srovnávat. Celkový příkon můžeme spočítat jako součet příkonu rotoru P_r , příkonu vznikajícího z toku P_t a ztrátového příkonu P_z .

$$P = P_r + P_t + P_z \quad (9)$$

P_t a P_z není možné zcela eliminovat, ale je obecně žádoucí jejich vliv minimalizovat, protože pouze P_r vede k tvorbě kapek a míšení.

Výrobci udávané údaje pro zařízení jsou většinou množství disipované energie, měrný disipovaný příkon ε nebo obvodová rychlost rotoru U_T .

$$\varepsilon = \frac{P}{\rho V_H} \quad (10)$$

$$U_T = \pi ND \quad (11)$$

Veličina V_H určuje objem, ve kterém dochází k disipaci energie, tedy objem hlavy rotoru. Jak měrným disipovaným příkonem, tak obvodovou rychlostí rotoru může být korelována velikost kapek.

$$d_k \sim \varepsilon^b \quad d_k \sim U_T^b \quad (12)$$

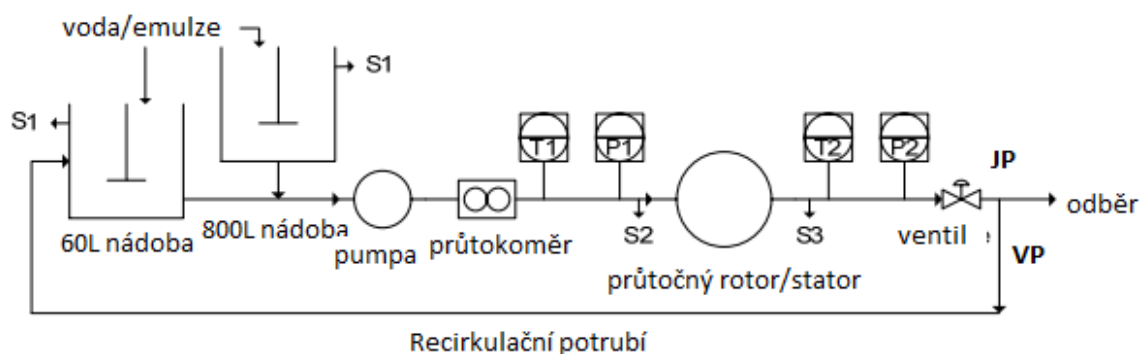
Maximální velikost kapek souvisí s maximální hodnotou disipované energie a měrného disipovaného příkonu. Pokud jsou všechny kapky menší, než je maximální velikost kapek, dosahujeme stavu rovnováhy (equilibria). Podle Kolmogorova je maximální velikost kapky stanovena vztahem :

$$d_{max} = 1010 \varepsilon^{-0,384} \quad (13)$$

U průtočných zařízení máme na rozdíl od vsádkových na dosažení rovnováhy jen pár sekund nebo desítek sekund. Navíc každá kapka prochází hlavou rotoru jen jednou, než mixér opustí. Z toho důvodu u průtočných zařízení většinou equilibria nedosahujeme. Velikost kapek lze měřit pomocí fázové doplerovy anemometrie (PDA).³

3.2 Popis experimentu

Experiment byl proveden v roce 2012 na třech průtočných rotor/stator zařízeních Silverson pro jednorůchodovou nebo víceřůchodovou operaci. Průtok byl měřen Corioliosovým měřičem průtoku, který je velmi přesný a jeho měření nezávisí na ostatních vlastnostech kapaliny. Mezera ve všech zařízeních byla 0,25mm a velikost slotů 1,6mm².



Obrázek 11 - Schéma experimentu pro jednorůchodové (JP) a víceřůchodové (VP) operace³

Při experimentu docházelo k emulzifikaci dvou různých olejů o viskozitách 9,4 mPa.s a 339 mPa.s do vody za stálé teploty 25⁰C. Příkon byl v každém zařízení měřen kalorimetry a výkon spočítán ze zákona zachování energie.³

$$P = mC_p\Delta T \quad (14)$$

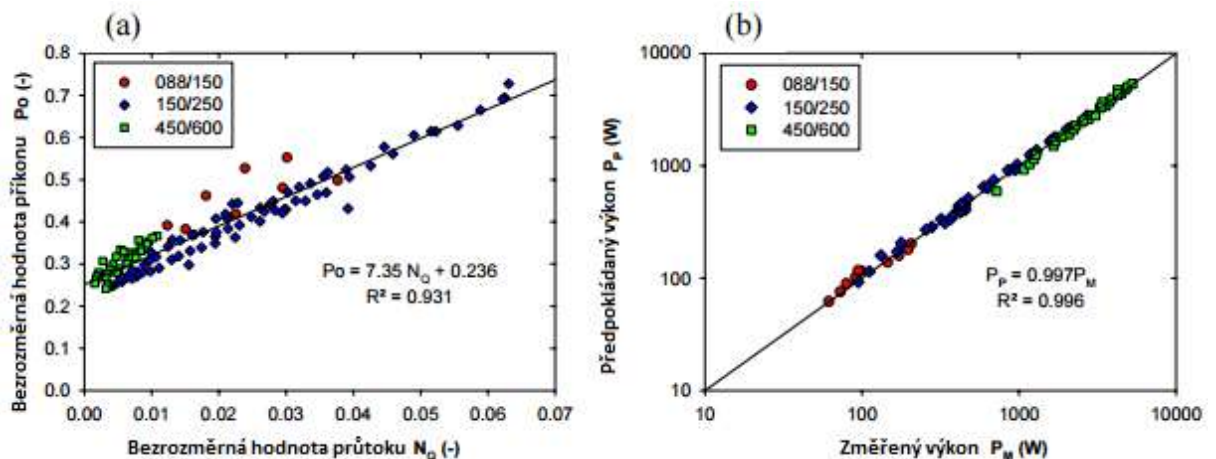


Laboratorní zařízení 088/150 UHS	Poloprovozní zařízení 150/250 MS	Průmyslové zařízení 450/600 UHS
Vnitřní rotor 22.4 mm průměr	Vnitřní rotor 38.1 mm průměr	Vnitřní rotor 114.3 mm průměr
Vnější rotor 38.1 mm průměr	Vnější rotor 63.5 mm průměr	Vnější rotor 152.4 mm průměr
Vnitřní stator 180 slotů	Vnitřní stator 300 slotů	Vnitřní stator 2016 slotů
Vnější stator 240 slotů	Vnější stator 560 slotů	Vnější stator 2496 slotů
Rychlost 4,000-10,000 rpm	Rychlost 3,000-11,000 rpm	Rychlost 1,200-3,600 rpm

Obrázek 12 - Popis zařízení zařízení použitých při experimentu ³

3.3 Výsledky

3.3.1 Příkon



Obrázek 13 - (a) Závislost příkonu jako funkce průtoku a (b) změřený výkon oproti výkonu předpokládanému ³

Po provedení experimentu bylo možné z grafů vypočítat příkonové konstanty. Zjistili jsme, že výkon při nulovém průtoku se pro různá zařízení nemění a je roven přibližně $P_{oz} = 0,24$. Konstanta průtoku k_1 se mění pro různá zařízení od hodnoty 7,5 do hodnoty 11,8. Z grafů plyne, že vztah

(15)

$$P = P_r + P_t + P_z$$

$$P = P_{oz}\rho_c N^3 D^5 + k_1 m N^2 D^2 + P_z \quad (16)$$

může být celkem přesně použit pro předvídání příkonu. ³

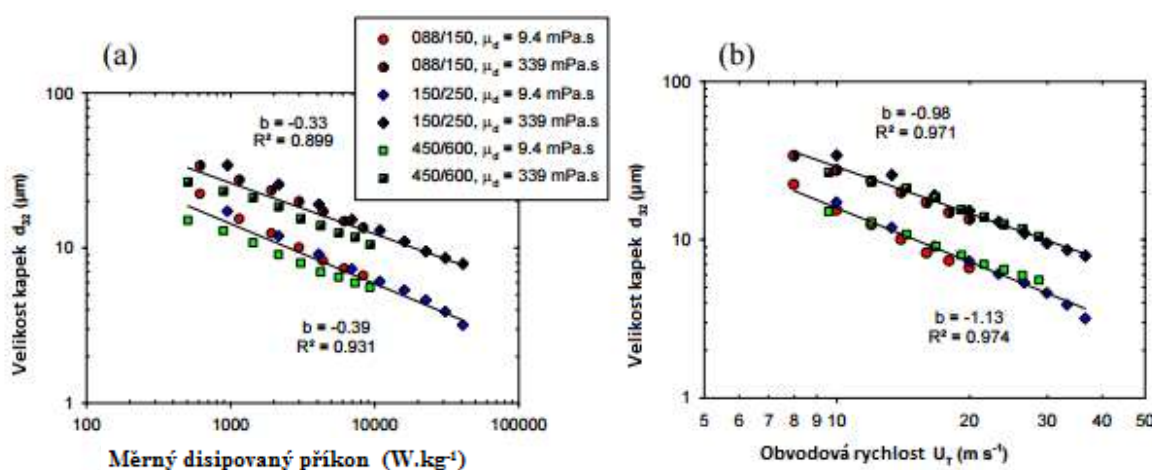
Příkonová konstanta	088/150	150/250	450/600
Výkon při nulovém průtoku	0,254	0,229	0,231
Konstanta průtoku k_1	9,59	7,46	11,80

Tabulka 2 - hodnoty výkonových konstant vypočtené z grafu na obrázku 13 ³

3.3.2 Jednoprůchodová operace

Velikost kapek lze korelovat pomocí hodnoty měrného disipovaného příkonu a obvodové rychlosti rotoru. V grafech na obrázku č. 4 můžeme vidět, že velikost kapek se pro různé viskozity vždy pohybuje kolem jedné přímky. Z grafů je poté možné odečíst hodnoty gradientů b , které jsou použity při korelaci.

Při srovnávání velikosti kapek s obvodovou rychlostí dosahujeme hodnot koeficientů determinace R^2 téměř ideálních $\rightarrow R^2$ se blíží k jedné. Tudíž můžeme říct, že obvodová rychlost U_T je lepším korelačním parametrem než hodnota měrného disipovaného příkonu ε .



Obrázek 14 - (a) Velikost kapek jako funkce měrného disipovaného příkonu a (b) velikost kapek jako funkce obvodové rychlosti pro emulze o viskozitách 9,4 mPa.s a 339 mPa.s ve třech různých zařízeních pro průchodový čas $t=0,45 \text{ s}$. ³

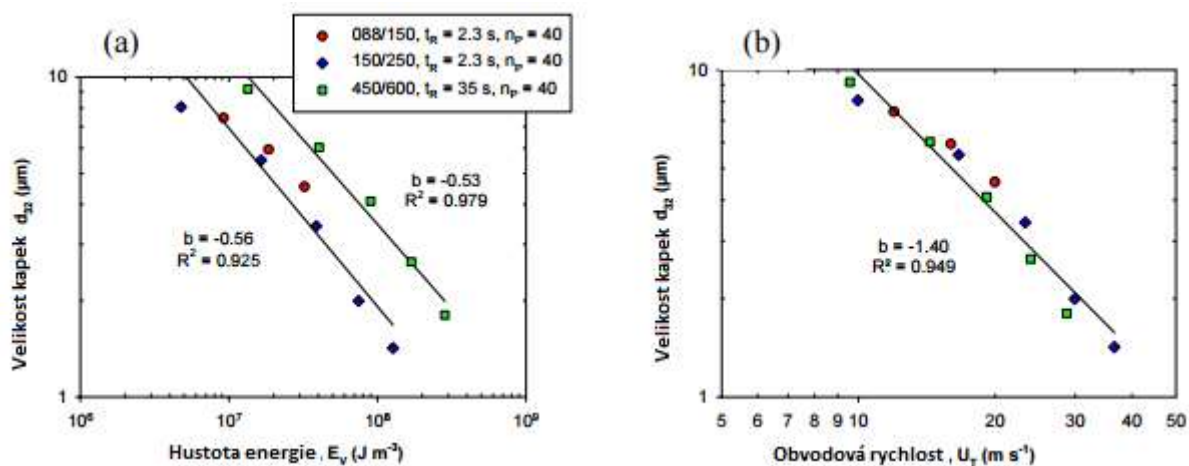
3.3.3 Víceprůchodová operace

Pro víceprůchodové operace se místo hodnoty disipovaného příkonu ke korelaci používá veličina hustota energie E_v ($d_{32} \sim E_v^b$), kterou lze spočítat jako součin disipovaného příkonu s průchodovým časem :

$$E_v = \varepsilon \cdot t \quad (17)$$

Na obrázku č.5 můžeme vidět závislost velikosti kapek po 40 průchodech zařízení na hustotě energie a obvodové rychlosti. Z grafu (a) vyplývá, že ačkoli byl průchodový čas pro průmyslové

zařízení více jak 10x vyšší, velikost kapek se téměř nezměnila. Můžeme tedy říci, že vliv průchodového času na velikost kapek je minimální. Obvodová rychlost se opět jeví jako vhodnější parametr pro korelování velikosti kapek a tudíž je jedním z nejdůležitějších parametrů pro výběr zařízení jak pro jednorůchodové či víceřůchodové zařízení.



Obrázek 15 - závislost velikosti kapek na (a) hustotě energie a (b) obvodové rychlosti při viskozitě látky 9,4mPa.s pro 40 průchodů zařízením³

3.4 Shrnutí

Měření příkonových konstant pro tři průtočná rotor/stator zařízení ukázala, že konstanta výkonu při nulovém průtoku je na parametrech zařízení poměrně nezávislá, zatímco konstanta průtoku je pro různá zařízení rozdílná. Pro korelaci střední velikosti kapek d_{32} se jako nejvhodnější parametr hodí obvodová rychlost rotoru. Průchodový čas se na střední velikosti kapek téměř vůbec neprojevuje.

4 Vliv parametrů zařízení a pracovních podmínek na disperzi kapalin u vsádkových zařízení

U vsádkových rotor-stator zařízení je nejdůležitějším parametrem čas, po který budou obě látky v dispergační nádobě. Cílem u vsádkové disperze je dosáhnout tzv. equilibria, tedy stavu, kdy už se velikost dispergovaných kapek s časem nezmenšuje. Rychlost dosažení equilibria lze ovlivnit změnou počtu otáček rotoru, použitím povrchově aktivních látek nebo zaručením dostatečného cirkulačního proudu. Cirkulační proud vytvořený otáčením rotoru nemusí vždy stačit k tomu, aby veškerá látka v nádobě prošla hlavou zařízení. Z toho důvodu jsou přidávána pomocná míchadla.

4.1 Teoretický úvod

Při turbulentním proudění je třeba analyzovat a zjistit závislost rozpadu shluků kapek. Na každou kapku působí kohezní napětí, které se snaží udržet shluky pohromadě :

$$\tau_S \sim \frac{\delta}{d} \quad (18)$$

kde δ značí povrchové napětí kapky a d její průměr. Pro stanovení závislosti velikosti kapek jsou také důležité Reynoldsovo a Weberovo číslo :

$$We = \frac{\rho_c \cdot N^2 \cdot D^3}{\delta} \quad (19)$$

$$Re = \frac{\rho_c \cdot N \cdot D^2}{\mu_c} \quad (20)$$

kde ρ_c vyjadřuje hustotu směsi, μ_c její viskozitu, N počet otáček rotoru a D je vnější průměr rotoru. K doplnění teorie je ještě nutné zavést Kolgomolovu délku turbulentních vírů :

$$\eta_k = \left(\frac{v_c^3}{\varepsilon}\right)^{0,25} \quad (21)$$

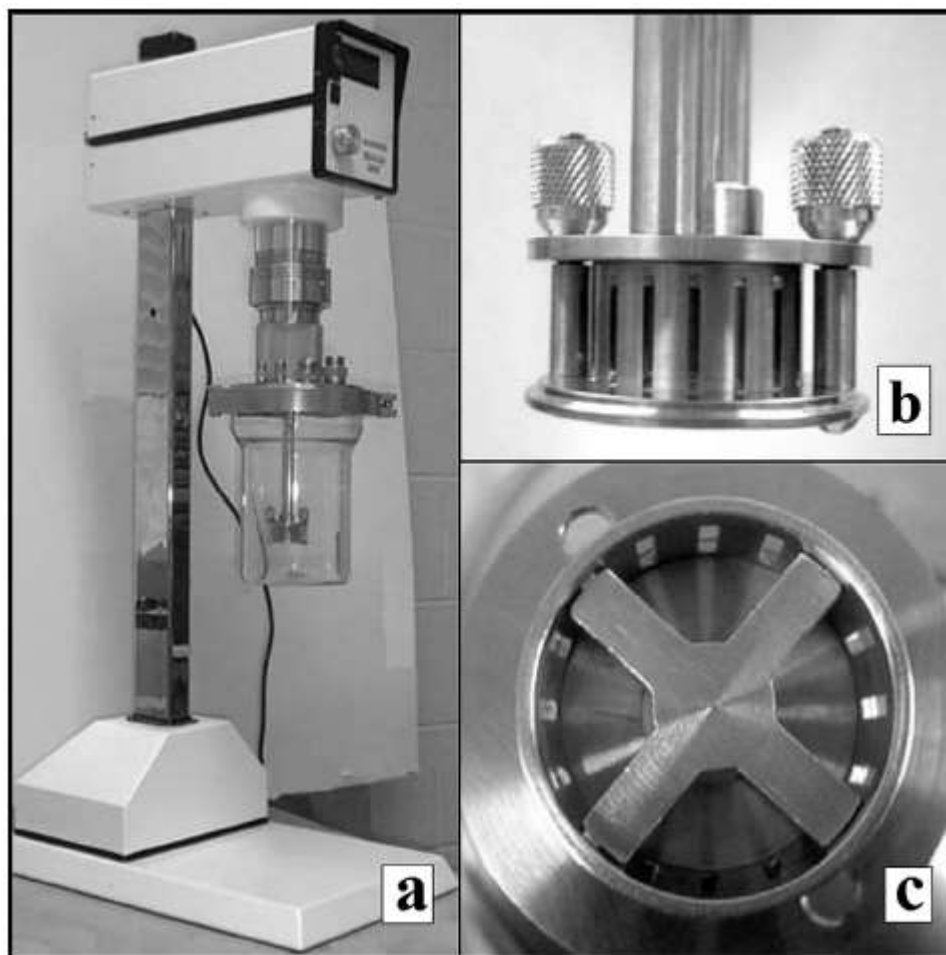
v_c značí kinematickou viskozitu směsi a ε vyjadřuje míru disipované energie. Můžeme opět říci, že velikost kapek je závislá na míře disipované energie, protože do vztahů pro výpočet Re a We můžeme dosadit disipovanou energii ve tvaru $\varepsilon \sim N^3 \cdot D^2$.

Nejnovějším experimentálně zjištěným vztahem pro korelaci maximální velikosti kapek ve vsádkovém zařízení s turbulentním proudem, který platí po dosažení equilibria pro $d_{max} \ll \eta k$, je vztah podle Boxalla (2012) :

$$\frac{d_{max}}{D} \sim We^{-\frac{1}{7}} \cdot Re^{-\frac{4}{7}} \quad (22)$$

Povrchově aktivní látky nám umožní rychlejší dosažení equilibria při menších velikostech kapek, protože snižují jejich povrchové napětí a snadněji dochází k jejich rozpadu. Zároveň zabráňují zpětnému shlukování a jsme schopni díky nim tvořit kvalitnější disperze.⁴

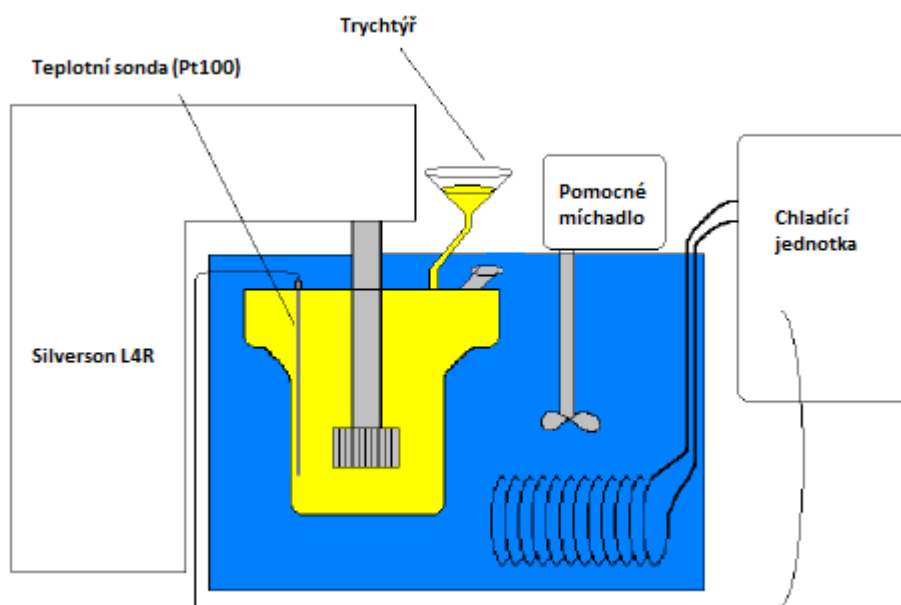
4.2 Popis experimentu



Obrázek 16 - a) celkový pohled na zařízení Silverson L4R, b) detail na rotor-stator hlavu, c) spodní pohled na hlavu zařízení⁵

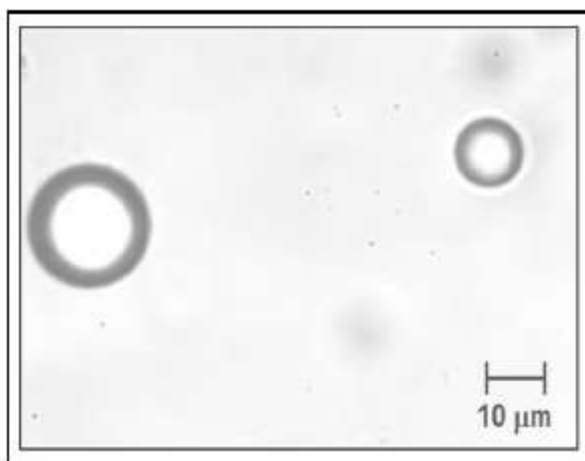
Pro stanovení závislosti velikosti kapek po dosažení equilibria bylo použito rotor-stator zařízení Silverson L4R ve vsádkové konfiguraci. Hlava zařízení byla umístěna ve skleněné míchací nádobě.⁴

Zařízení bylo vybaveno regulací otáček s digitálním displejem. Z důvodu velkého množství tepla, které je generováno v rotor-stator hlavě, je nutné celý systém chladit, aby experiment probíhal za konstantních podmínek. Uzavřená míchací nádoba je proto ponořena do vodní lázně. Teplota vody byla regulována velkou chladicí jednotkou HAAKE Pheonix II P2 a lázeň byla vybavena pomocným míchadlem pro dostatečnou cirkulaci. Teplota v míchací nádobě byla měřena termoelektrickým článkem Pt100.⁴



Obrázek 17 - Schéma kompletního zařízení⁵

Při experimentu byla dispergována voda do oleje. Nejprve se celá nádoba naplnila olejem, tak, aby v ní nezůstal žádný vzduch, uzavřela se a poté došlo k přidání malého množství vody přes trychtýř. Došlo k zapnutí zařízení, které běželo přibližně 2,5 hodiny a po dokončení byla zkoumána velikost kapek pomocí mikroskopu. Poté se zařízení opět spustilo při vyšších otáčkách a celý proces se opakoval.⁴

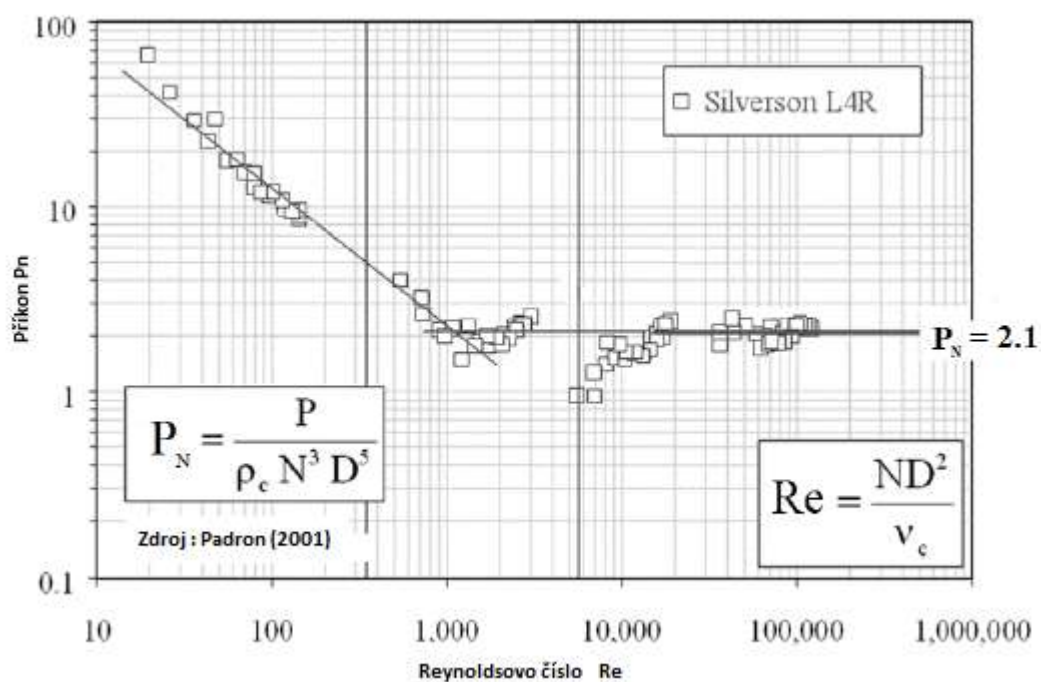


Obrázek 18 - Ukázka zkoumání velikosti kapek z mikroskopu při 60x zvětšení⁵

Problémem u vsádkových zařízení je ulpívání kapek na stěnách a víku míchací nádoby. Z toho důvodu musejí být veškerá zařízení důkladně čištěna. U experimentu se zařízením Silverson L4R byly pro čištění využity toluen a aceton.⁴

4.3 Výsledky

Pro zařízení Silverson L4R byla stanovena závislost příkonu P_N na Reynoldsově čísle Re už v roce 2001 :



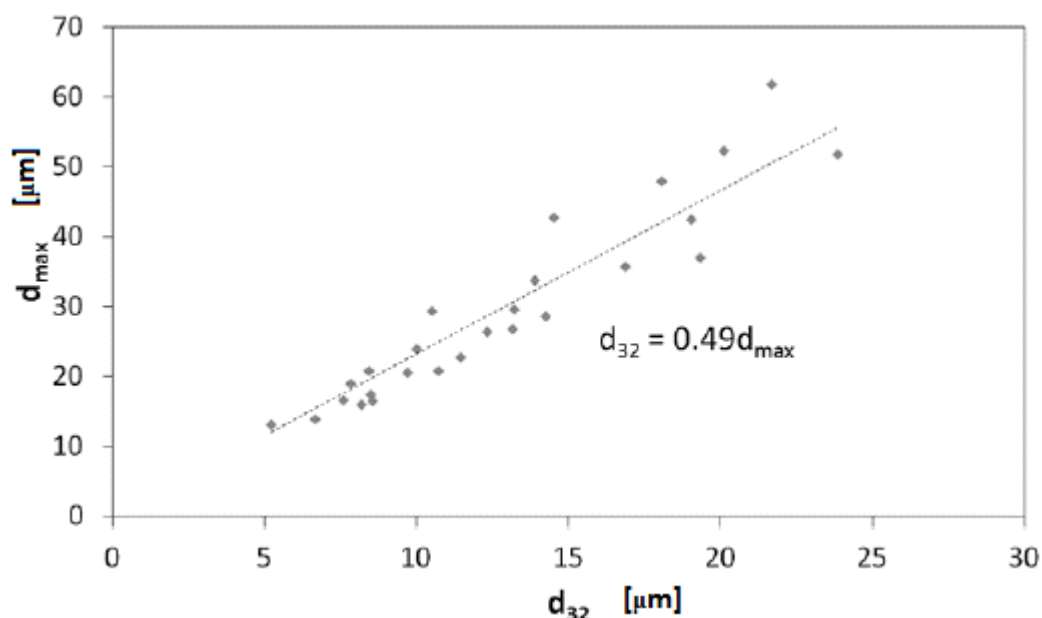
Obrázek 19 - Logaritmičká závislost bezrozměrného příkonu na Reynoldsově čísle pro vsádkové zařízení Silverson L4R⁵

Z grafu je patrné, že pro vyšší Reynoldsova čísla už se příkon nemění. Tudiž můžeme říci, že po dosažení turbulentního toku už je příkon v závislosti na Reynoldsově číse téměř konstantní.

Pro stanovení závislosti velikosti kapek byla zavedena jejich střední velikost d_{32} (Sauterův střední průměr kapky), která se vypočítala z výsledků naměřených mikroskopem :

$$d_{32} = \frac{\sum n_i \cdot d_i^3}{\sum n_i \cdot d_i^2} \quad (23)$$

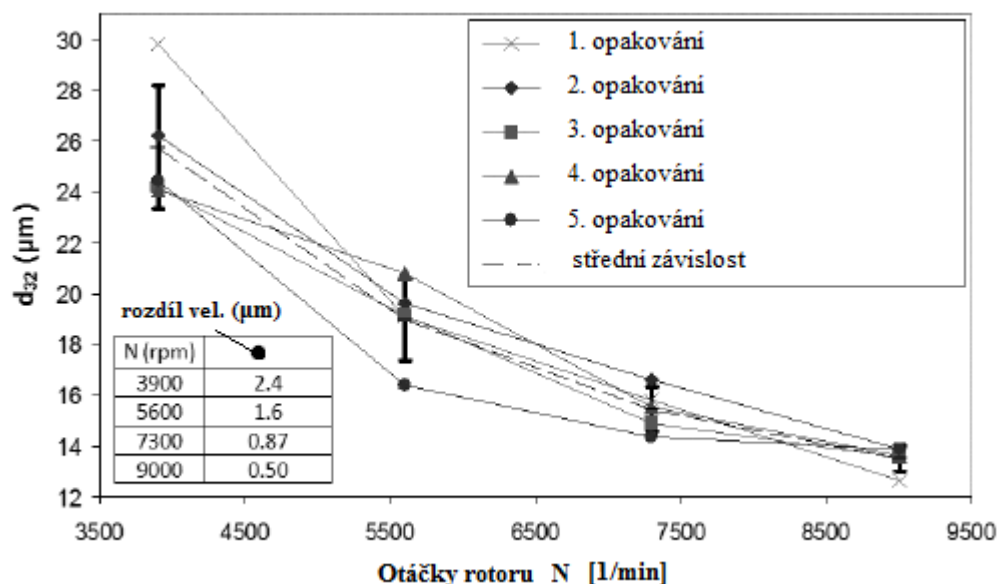
kde n_i značí počet kapek stejné velikosti a d_i jejich průměr. Aby bylo stanoveno, jak dokonalé disperzi dochází, byla do grafu vynesena závislost mezi střední velikostí kapek d_{32} a maximální velikostí kapek d_{max} :



Obrázek 20 - závislost maximální velikosti kapek na střední velikosti kapek⁵

Ze závislosti plyne, že $d_{32} = 0,49d_{max}$, tudíž střední velikosti kapek jsou oproti maximálním asi poloviční.

Celý experiment pro měření velikosti kapek s různými otáčkami rotoru byl 5x opakován. Pracovní teplota $T = 43 \text{ }^\circ\text{C}$, viskozita $\mu_c = 93,2 \text{ cP}$. Byla zjištěna následující závislost velikosti kapek na otáčkách rotoru :



Obrázek 21 - závislost středního průměru kapek na rychlosti otáčení rotoru po dosažení stavu equilibria v čase $t = 2,5h^5$

Ze závislosti je patrné, že při vyšších otáčkách rotoru je dosahováno menších průměrů kapek. Při vyšších rychlostech otáčení také dosahujeme stabilnějších výsledků a lze tedy přesněji dosáhnout požadované velikosti kapek.

4.4 Shrnutí

Příkon pro plíživé proudění ve vsádkové nádobě lineárně roste, jakmile je ale dosahováno vyšších hodnot Reynoldsova čísla a turbulentního proudění, příkon zůstává konstantní. Jelikož není dosahováno naprosto rovnoměrných velikostí kapek, je jejich střední velikost rovna zhruba polovině velikosti maximální. Po dosažení equilibria při vyšších otáčkách získáváme menší velikosti kapek s větší přesností pro více opakování. Závislost velikosti kapek na Weberově a Reynoldsově čísla byla pro vsádkové zařízení Silverson L4R stanovena experimentálně jako $\frac{d_{32}}{D} \sim 0,115 \cdot (We \cdot Re)^{-\frac{1}{3}}$.

5 Vliv parametrů zařízení a pracovních podmínek na disperzi prášků do kapalin v in-line konfiguraci

In-line rotor-stator zařízení se v dnešní době často používají pro dispergaci prášků do kapalin, přesto neexistuje žádný přesný návod na navržení správně fungujícího zařízení. Většinu z nich je třeba vyzkoušet experimentálně, aby byla ověřena jejich správná funkčnost. Další část je zaměřena na popis experimentu se zařízeními Conti TDS, který má za cíl zjistit závislost průtoku, spotřeby energie a střední velikost shluků částic na parametrech zařízení pro disperzi silikonových nanočástic do kapalin o různých viskozitách. Jako disperzní prostředí byly použity roztoky vody a polyglycerolu o různých koncentracích.

5.1 Teoretický úvod

Spotřeba energie je u míchacích zařízení vyjádřena pomocí příkonu P_0 . Příkon je charakteristickou funkcí Reynoldsova čísla Re v hlavě zařízení:

$$P_0 = \frac{P - P_0}{\rho \cdot N^3 \cdot d^5} \quad (24)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot N}{\eta} \quad (25)$$

zde P vyjadřuje spotřebu energie na hnacím hřídeli a P_0 spotřebu energie samotného zařízení, když přes něj neprochází žádná látka. ρ vyjadřuje hustotu procházející látky, D průměr hlavy rotoru, N počet otáček za sekundu a η vyjadřuje viskozitu. Vztah pro výpočet P_0 v rotor-stator zařízení je zaveden podle Sparkse :

$$P_{ORS} = \frac{P - P_0}{\rho \cdot \dot{Q}_v \cdot N^2 \cdot D^2} \quad (26)$$

\dot{Q}_v je průtok látky zařízením. Koeficienty u otáček a průměru hlavy rotoru jsou určeny experimentálně.

V roce 2009 byly vztahy upraveny Kowalskim do konečného vztahu, podle kterého je počítána spotřeba energie u Conti TDS zařízení :

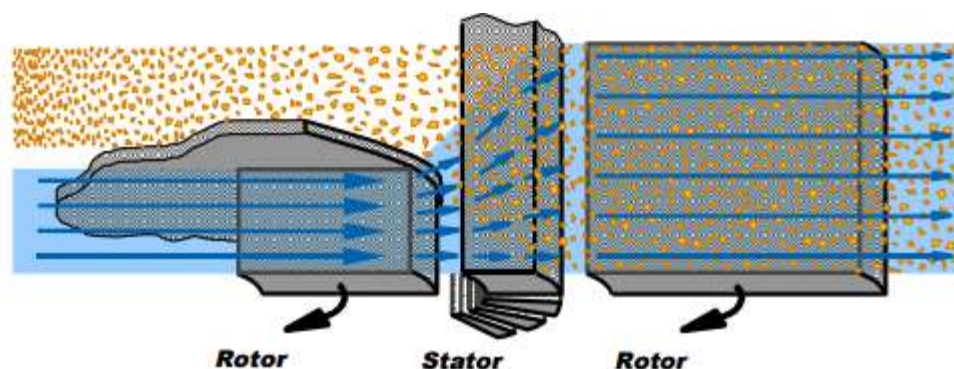
$$P - P_0 = P_{oz} \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 + k_1 \cdot \dot{Q}_v \cdot n^2 \cdot d^2 \quad (27)$$

výraz $P_{oz} \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$ může být vyjádřen z rovnice (24) a popisuje hydraulický výkon v hlavě zařízení potřebný k promíchání kapaliny s práškem při nulovém průtoku. Druhý výraz $k_1 \cdot \dot{Q}_v \cdot n^2 \cdot d^2$ popisuje spotřebu energie pro dosažení potřebného hmotnostního průtoku. P_{oz} a k_1 jsou parametry disperzního zařízení, které je nutné experimentálně určit.⁶

5.2 Popis experimentu

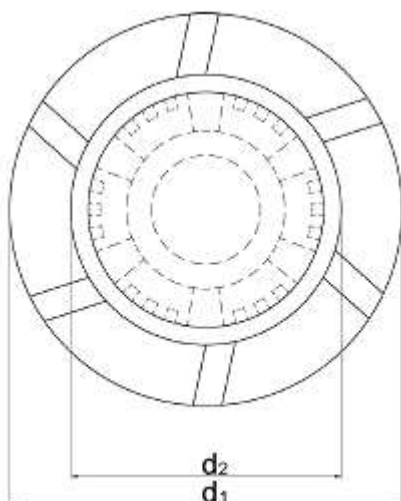
Experiment byl prováděn na 4 různých zařízeních Conti TDS (TDS = Transportní a Disperzní Systém). Jedná se o průtočná zařízení pro práškové disperze. Rizikem u disperzí prášků je znečištění okolí a nebezpečí pro obsluhu, proto je prášek nasáván přímo z balení a nedochází k žádnému úniku do okolního prostředí.⁵

Uprostřed hlavy zařízení, je vytvářen podtlak pro nasávání prášku do kapaliny. Vytvořením podtlaku zaručíme, že se do hlavy dostane veškerý prášek a nedochází k žádným znečištěním na stěnách trubice během dopravy prášku. V hlavě zařízení pod povrchem proudící kapaliny také dochází ke kompletnímu máčení prášku. Prášek a kapalina přichází do míchací hlavy oddělenými cestami. Díky obrovským turbulentním silám už zde dochází k mísení prášku s kapalinou, žádný prášek se nedostane s kapalinou ven, tudíž nedochází ke znečištění okolí a usazování na hnací hřídeli.⁵



Obrázek 22 - Schéma dějů v hlavě rotor-stator zařízení⁵

Kompletní obvod se skládá s míchané nádoby, průtokoměru, měřiče spotřeby elektrické energie a rotor-stator dispergačního zařízení, jak můžeme vidět na obrázku č. 24. Míchaná nádoba zároveň slouží jako zásobník látky, je vybavena chlazením a je umístěna nad rotor-stator zařízením.⁶



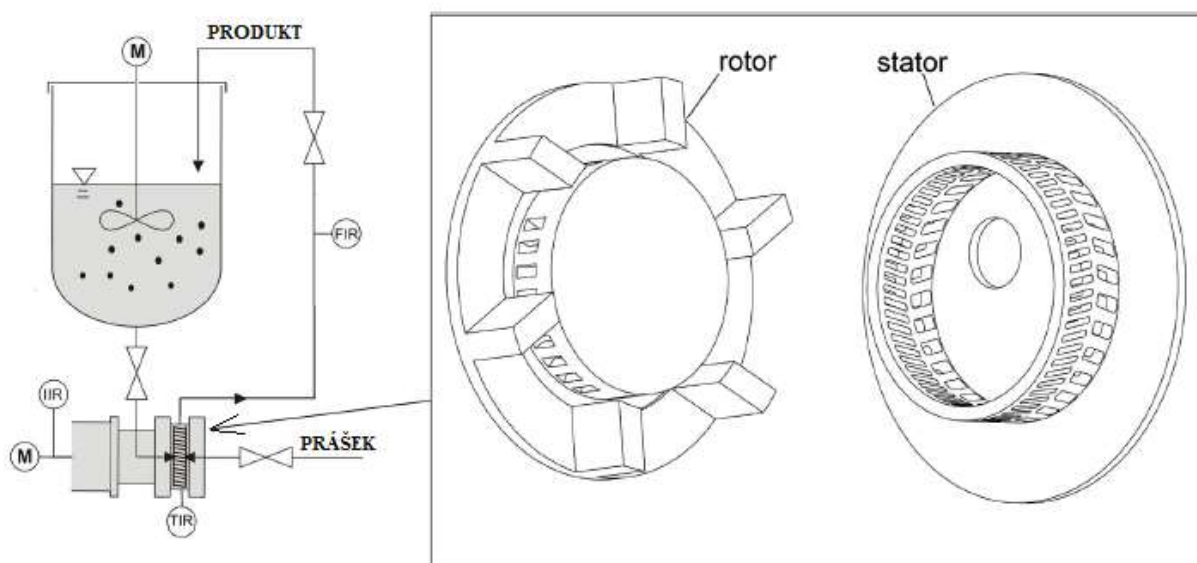
Conti TDS	d_1 [mm]	d_2 [mm]	Průměr potrubí [mm]
1	80	59	32
2	111.8	76.8	32
3	168	124	65
5	225	153	80

Obrázek 23 - Nákres rotoru a statoru s tabulkou rozměrů⁶

Měření spotřeby energie rotor-stator zařízení bylo prováděno při různých otáčkách rotoru a ve čtyřech různých zařízeních pro kapaliny o rozdílných viskozitách. Jako disperzní prostředí byl používán roztok vody a polyglycerolu.⁶

Zařízení	Otáčky rotoru [1/min]	Obsah polyglycerolu [%]
Conti TDS 1	5659, 6600, 7545, 8488, 9431	0, 15, 37, 50
Conti TDS 2	3450, 4140, 4830, 5520, 6210, 6900	0, 5, 10, 15, 20, 37, 50
Conti TDS 3	1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3600	0.45, 0.5, 0.55
Conti TDS 5	1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3600	0.45, 0.5, 0.55

Tabulka 3 - pracovní podmínky zařízení pro experiment a koncentrace roztoků polyglycerolu⁶



Obrázek 24 - Schéma experimentálního zařízení a detail na geometrii statoru a rotoru⁶

Pro zjištění závislosti středních velikostí shluků nanočástic na speciální (disipované) energii přeměněné v hlavě zařízení byla použita opět čtyři různá zařízení Conti pro různé obvodové rychlosti rotoru, které jsou uvedeny v následující tabulce.

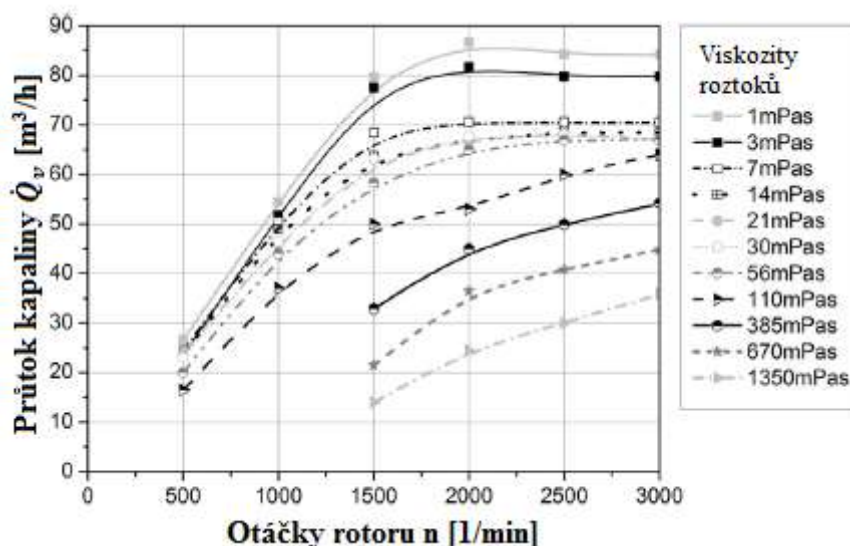
Zařízení	Obvodová rychlost rotoru [m/s]
Conti TDS 1	24; 28
Conti TDS 2	24; 28
Conti TDS 3	24
Conti TDS 5	24

Tabulka 4 - Experimentální pracovní podmínky pro zjištění velikostí shluků⁶

5.3 Výsledky

5.3.1 Průtok a spotřeba energie

Zařizem procházely kapaliny o různých viskozitách při různých otáčkách rotoru. Bylo dosaženo různých hodnot spotřeby energie pro různá množství průtoku.⁶ Na obrázku 17 můžeme vidět graf závislosti průtoku \dot{Q}_v na otáčkách rotoru n pro roztok vody s polyglycerolem v zařízení Conti TDS 5.

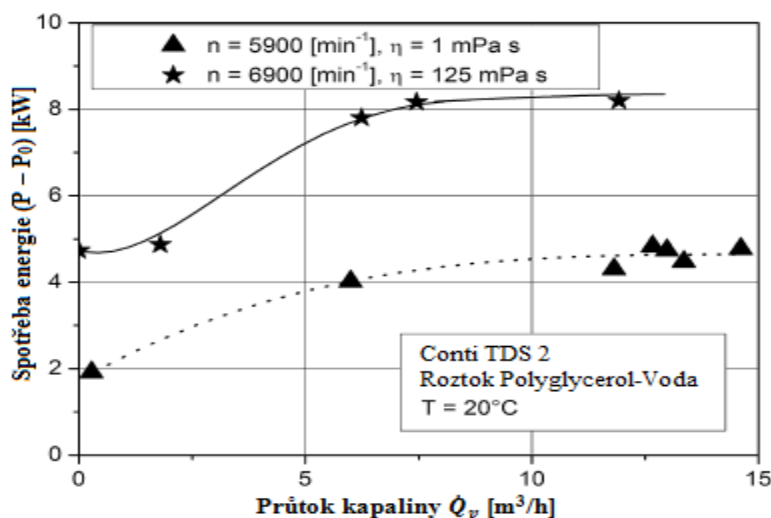


Obrázek 25 - graf závislosti průtoku na otáčkách rotoru⁶

Průtok kapaliny stoupá téměř lineárně až do otáček přibližně 1500 min^{-1} . Pro vyšší otáčky rotoru už průtok kapaliny roste jen minimálně nebo se dokonce snižuje pro nízké viskozity. Tento děj nebyl zatím zcela objasněn, ale je nejspíše způsobován tvorbou kavitací v kapalině, kvůli kterým klesá průtok a jsou způsobovány noži rotoru. Z grafu také

plyne, že čím více viskózní kapalinu používáme, tím je průtok menší. Obecně je doporučováno používat kapaliny o maximální viskozitě 1000 mPa.s.⁵

Spotřeba energie rotor-stator zařízení ($P - P_0$) byla měřena v závislosti na průtoku. Na obrázku 26 můžeme vidět tuto závislost pro zařízení Conti TDS 2 pro dva roztoky vody a polyglycerolu při konstantní teplotě 20°C.

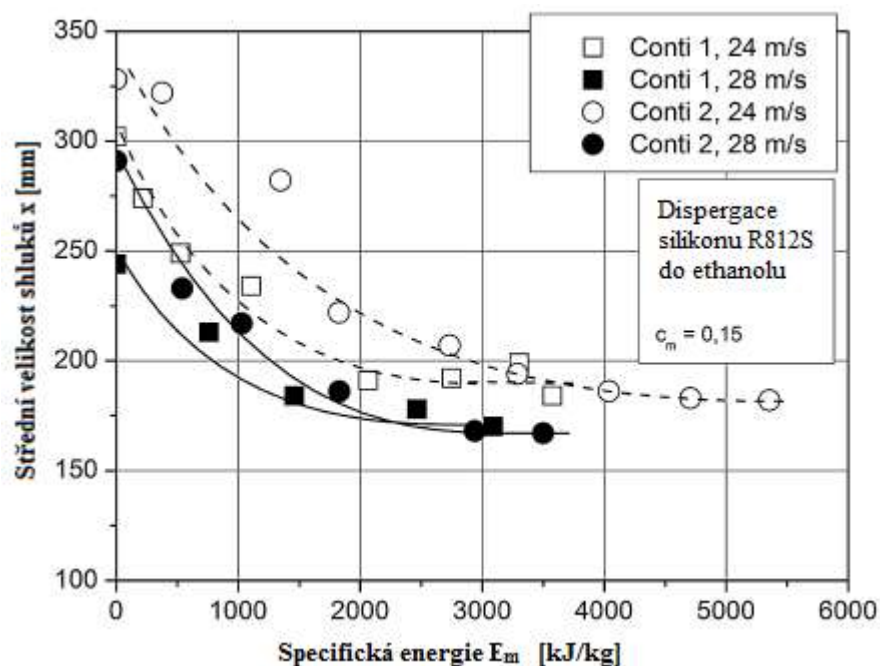


Obrázek 26 - závislost spotřeby energie na průtoku kapaliny⁶

Ze závislosti plyne, že spotřeba energie je nižší pro kapalinu s menší viskozitou. Pro malé hodnoty průtoku stoupá spotřeba energie rychleji, zatímco pro vyšší hodnoty už zůstává spotřeba konstantní.

5.3.2 Velikost shluků částic

Dispergace prášku byla prováděna na dvou zařízeních Conti TDS 1 a 2 při konstantních obvodových rychlostech rotoru 24 m/s a 28 m/s. Jako disperzní podíl byly použity nanočástice silikonu a jako disperzní prostředí ethanol. Látka se nechala procházet zařízením, dokud už nedocházelo k dalšímu zmenšování shluků.⁶ Na obrázku 27 můžeme vidět závislost velikosti shluků na celkovém množství spotřebované specifické energie v hlavě zařízení.



Obrázek 27 - závislost střední velikosti kapek na specifické energii⁶

Z grafu lze vyčíst, že zpočátku klesá velikost shluků poměrně strmě a čím déle necháme látku zařízením procházet, tím bude pokles velikosti pomalejší. Pro vyšší obvodovou rychlost dosáhneme menší velikosti shluků dříve a pro jeden průchod je množství specifické energie vyšší. Pokud zvětšíme obvodovou rychlost rotoru, zvýší se hodnota disipované energie v hlavě zařízení a dosáhneme menší velikosti shluků.

5.4 Shrnutí

Průtok kapaliny zařízením je lineárně závislý na otáčkách rotoru až do otáček kolem 1500 min^{-1} . Poté už otáčky průtok téměř neovlivňují. Proto je třeba pro každé zařízení najít ideální parametry, abychom dosahovali co nejvyšších hodnot průtoku při co nejmenších otáčkách.

Spotřeba energie lineárně stoupá pro malé průtoky. Při vyšších hodnotách už roste pouze nepatrně. Čím více viskózní kapalina slouží jako disperzní prostředí, tím vyšší bude spotřeba energie. Pro korelaci velikosti shluků je vhodné použít míru disipované specifické energie v hlavě zařízení. Tu lze ovlivnit množstvím průchodů látky zařízením a obvodovou rychlostí rotoru (množstvím otáček).

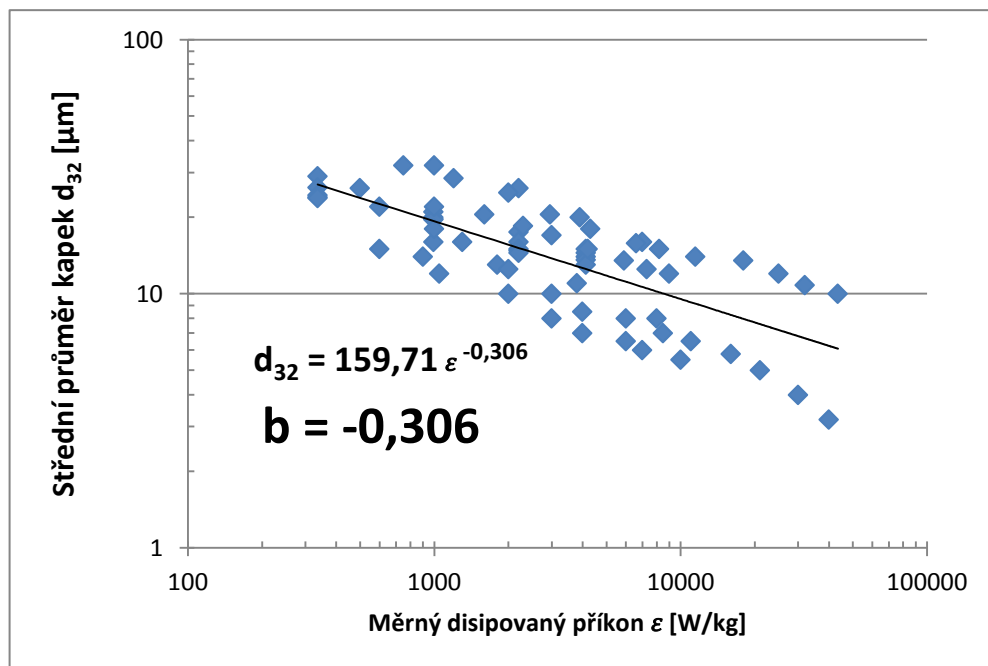
Závěrečné shrnutí práce

Zařízení pro tvorbu mikro a nanočásticových disperzí mají nezastupitelnou pozici při výrobě specifických látek, např. pigmentů, emulzí nebo lepidel. Pro výrobu těchto disperzí je možné použít mnohá technologicky odlišná zařízení, která jsou různě energeticky či prostorově náročná.

Tato práce měla za cíl zpracovat přehled těchto dispergačních technologií a podrobně se zaměřit na zařízení v konfiguraci stator-rotor. Pro stator-rotor míchadla byly uvedeny dva experimenty pro disperzi kapalina-kapalina ve vsádkové a průtočné konfiguraci a jeden experiment pro disperzi prášek-kapalina. Cílem bylo zhodnotit příkonové charakteristiky zařízení a zjistit závislosti maximální velikosti dispergovaných kapek a shluků.

U disperze prášek-kapalina v průtočném zařízení se velikost shluků koreluje množstvím disipované specifické energie, kterou lze ovlivnit rychlostí otáčení rotoru. Spotřeba energie závisí na množství průtoku látky zařízením.

Z výsledných hodnot disperze kapalina-kapalina bylo zjištěno, že příkon vsádkových i průtočných stator-rotor zařízení závisí zejména na rychlosti otáčení rotoru. U průtočných zařízení ovlivňuje příkon také hodnota průtoku.



Obrázek 28 – Vynesená závislost středního průměru kapek na měrném disipovaném příkonu pro disperzi kapalina-kapalina u vsádkových a průtočných zařízení použitých při experimentech uvedených v práci

Jako základní vztah pro korelaci maximální velikosti kapek pro disperze kapalina je uváděn vztah $D_K \sim \varepsilon^{-0,4}$. Sestavením hodnot ze dvou v práci uvedených zařízení byla vynesena závislost střední velikosti kapek na hodnotě měrného disipovaného příkonu, kterou můžeme vidět na obrázku 28.

Korekční součinitel $b = -0,306$ se od uváděného součinitele $b = -0,4$ příliš neliší, hodnota disipovaného příkonu v zařízení je tedy vhodným parametrem pro výběr zařízení pro tvorbu mikro a nanočásticových disperzí.

Seznam veličin

b	Korelační součinitel
β_k	Kolgomolova konstanta
C_1	Empirická konstanta
C_p	Tepelná kapacita
D	Průměr hlavy rotoru
δ	Povrchové napětí
d_{max}	Maximální průměr
d_{32}	Sauterův střední průměr
d	Průměr kapky
D_K	Velikost kapek
ε	Disipovaná energie
$E(k)$	Spektrální hustota energie
E_v	Hustota energie
k	Převrácená hodnota průměru kapky
m	Hmotnost
N	Počet otáček rotoru
ηk	Kolgomolova délka turbulentních vírů
η	Dynamická viskozita
P_o	Příkon
P	Celkový příkon
P_r	Příkon rotoru
P_t	Příkon vznikající z toku
P_z	Ztrátový příkon
P_{oz}	Výkon při nulovém průtoku
ρ_C	Hustota směsi
ρ_D	Hustota disperzního podílu
\dot{Q}_v	Průtok
Re	Reynoldsovo číslo
t	Čas
ΔT	Rozdíl teplot
τ_C	Napětí potřebné k deformaci kapky
τ_S	Kohezní napětí
τ_D	Viskózní napětí
U_T	Obvodová rychlost rotoru
μ_D	Viskozita disperzního podílu
μ_C	Viskozita směsi
$v(d)$	Rozdíl rychlostí podél průměru kapky
We	Weberovo číslo

Seznam použité literatury

- [1] E. L. PAUL, V. A. ATIEMO-OBENG, S. M. KRESTA, *Handbook of Industrial Mixing – Science and Practice*, nakl. Wiley Interscience, vydáno 2004, ISBN: 9780471451457
- [2] VŠCHT – Disperzní systém, [online], [cit. 20.12.2014], dostupné z http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/disperzni_system.html
- [3] STEVEN HALL – The effect of scale on liquid-liquid dispersion in in-line silverson rotor stator mixers, In: 14th European Conference on Mixing Warszawa, 10-13 September 2012 [online], Varšava, 2012, [cit. 25.3.2015], dostupné z http://mixing14.eu/p/mixing14eu_23.pdf
- [4] RUEGER, Paul Edwin. *Liquid-liquid dispersion in batch and in-line rotor-stator mixers*, University of Maryland 2013, Disertační práce, University of Maryland, Department of Chemical Engineering, [online] [cit. 25.3.2015], dostupné z <http://hdl.handle.net/1903/14625>
- [5] H. JACOB, R. ISHERWOOD – Powder into Liquids – Dustfree induction and dispersion, [online], [cit. 10.6.2015], dostupné z http://www.powdertechusa.com/downloads/Powders_into_Liquids.pdf
- [6] B. SCHÖNSTEDT, H. JACOB, C. SCHILDE, ARNO KWADÉ - Scale-up of the power draw of inline-rotor–stator mixers with high throughput, *Chemical Engineering Research and Design* [online], Elsevier. January 2015, 93, 12-20, ISSN : 0263-8762, [cit. 10.6.2015], dostupné z doi: [10.1016/j.cherd.2014.04.004](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.004)
- [7] VERDER – Statické míchadlo, [online], [cit. 10.6.2015], dostupné z <http://www.verder.cz/pumps/staticke-a-dynamicke-michadlo/staticke-michadlo>
- [8] NATHAN TECHNOLOGIES – Homogenisation, [online], [cit. 10.6.2015], dostupné z <http://www.nathantechnologies.com/technologies.asp>
- [9] ULTRASONIC EQUIPMENTS – Low Intensity Ultrasonic Dispersion Equipment, [online], [cit. 10.6.2015], dostupné z <http://www.ultrasonic-equipments.com/sale-4056931-low-intensity-ultrasonic-dispersion-equipment.html>
- [10] SILVERSON - Flashblend Powder/Liquid Mixers - How It Works, [online], [cit.14.6.2015], dostupné z <http://www.silverson.com/us/products/flashblend-powder-liquid-mixers/how-it-works>
-

