

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav procesní a zpracovatelské techniky (12118)



Procesní charakteristiky dispergačního zařízení stator - rotor

Process characteristics of stator - rotor dispergation equipment

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:

Strojní inženýrství

Studijní obor:

Procesní technika

Vypracoval:

Bc. Jan Bauer

Vedoucí práce:

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bauer** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **420511**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Procesní charakteristiky dispergačního zařízení stator - rotor

Název diplomové práce anglicky:

Process characteristics of stator - rotor dispergation equipment

Pokyny pro vypracování:

Popište základní procesní parametry dispergačního zařízení typu stator - rotor.

1. Na základě literární, průmyslové a patentové rešerše popište základní procesní charakteristiky zařízení stator - rotor, potřebné pro návrh zařízení pro dispergační technologie. Popište také experimentální metody jejich stanovování.
2. Na základě CFD simulace průtočného zařízení stator - rotor popište hydrodynamiku systému a příkonové charakteristiky.
3. Stanovte experimentálně příkonovou charakteristiku modelového zařízení stator - rotor a výsledky kriticky porovnejte se závěry CFD simulací. Experimenty proveďte pro dvě různé geometrické konfigurace zařízení a diskutujte vliv jednotlivých parametrů.

Seznam doporučené literatury:

dle vlastní literární, průmyslové a patentové rešerše a doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **23.10.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____


prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. Ing. Tomáš Jirbut, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29.10.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta



PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne

.....
Jméno a příjmení



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl vyjádřit poděkování vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D. za odborné rady a pomoc při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. a Ing. Karlu Peterovi, Ph.D. za odbornou konzultaci a dále také Ústavu procesní a zpracovatelské techniky za možnost manipulace s dispergačními zařízeními pro realizaci experimentu a numerické simulace.



Anotační list

Jméno autora:	Jan
Příjmení autora:	Bauer
Název práce česky:	Procesní charakteristiky dispergačního zařízení stator - rotor
Název práce anglicky:	Process characteristics of stator - rotor dispergation equipment
Rozsah práce:	počet stran: 114 počet obrázků: 108 počet tabulek: 16 počet grafů: 7 počet příloh: 2
Akademický rok:	2018/2019
Jazyk práce:	český
Ústav:	U12118 Procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Oponent:	
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Využití:	Získaná procesní (příkonová) charakteristika dispergačního zařízení stator - rotor je základním parametrem nutným pro navrhování zařízení. Na jejím základě je možné vypočítat příkon, provést výběr elektromotoru nebo optimalizaci.



Anotace česky:

Diplomová práce je zaměřena na problematiku procesních charakteristik dispergačních míchadel typu stator - rotor. Cílem práce je získat procesní charakteristiku dvou míchadel firmy IKA. V rešeršní části práce je proveden teoretický rozbor dispergace, klasifikace typů dispergačních míchadel a jejich provozní konfigurace. Dále jsou rozebrány publikované experimentální a numerické metody získávání procesních charakteristik, na které diplomová práce volně navazuje. V další části práce je v softwaru *Fluent* provedena CFD numerická simulace, která popisuje mechanismus dispergace pomocí vizualizace hydrodynamického proudění. Příkonová charakteristika byla v závěrečné části práce stanovena experimentálně na základě měření příkonu pomocí kalorimetrické metody a z ní byla vyhodnocena příkonová charakteristika ve tvaru $P_o = f(Re)$. V poslední fázi jsou porovnány a diskutovány výsledky numerické simulace a experimentu.

Klíčová slova:

dispergace, disperze, míchadla stator - rotor, procesní charakteristika, příkonová charakteristika



Anotace anglicky:

This diploma thesis is focused on the fundamentals of the rotor - stator dispersion mixer's process characteristics. The aim of this work is to obtain the process characteristics of two different mixers made by the IKA company. In the research chapter of the thesis, there is a theoretical analysis of dispersion, dispersion mixer type classification and their operating configurations. Then there is an analysis of published experimental and numerical methods of obtaining the process characteristics. This diploma thesis then independently builds on the published methods. In the next part, there is a CFD numerical simulation describing the mechanism of dispersion by hydrodynamic flow visualisation, using the *Fluent* software. In the final part, the power draw was determined experimentally by wattage measurement, specifically the calorimetric method, resulting in the equation $P_o = f(Re)$. The results of the numerical simulation and the experiment are discussed and compared in the last part of the diploma thesis.

Keywords:

dispergation, dispersion, stator - rotor mixers, proces characteristics, power draw, power consumption



Obsah

1	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	- 9 -
2	ÚVOD.....	- 12 -
3	REŠERŠE.....	- 13 -
3.1	TEORETICKÝ ROZBOR	- 13 -
3.2	TYPY MÍCHADEL STATOR - ROTOR.....	- 13 -
3.3	NUMERICKÉ SIMULACE SYSTÉMŮ STATOR - ROTOR.....	- 19 -
3.4	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SYSTÉMŮ STATOR - ROTOR.....	- 21 -
4	NUMERICKÁ SIMULACE	- 32 -
4.1	TVORBA 3D MODELU - CAD.....	- 32 -
4.2	TVORBA 3D MODELU - ANSYS.....	- 33 -
4.2.1	<i>Tvorba sítě.....</i>	<i>- 35 -</i>
4.2.2	<i>Kontrola kvality sítě.....</i>	<i>- 36 -</i>
4.2.3	<i>Specifikace ploch a objemů.....</i>	<i>- 38 -</i>
4.3	POSTUP PRÁCE V SOFTWARE FLUENT	- 39 -
4.3.1	<i>Specifikace podmínek pro numerickou simulaci.....</i>	<i>- 39 -</i>
4.4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉ SIMULACE	- 41 -
4.4.1	<i>Vyhodnocení krouticího momentu</i>	<i>- 41 -</i>
4.4.2	<i>Vizualizace hydrodynamiky proudění.....</i>	<i>- 43 -</i>
5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	- 48 -
5.1	POPIS GEOMETRIE EXPERIMENTU	- 48 -
5.1.1	<i>Míchadla stator - rotor.....</i>	<i>- 49 -</i>
5.1.2	<i>Zařízení a potřebné pomůcky.....</i>	<i>- 50 -</i>
5.2	POPIS PRŮBĚHU POMOCNÝCH MĚŘENÍ	- 54 -
5.2.1	<i>Příprava kapalin pro měření.....</i>	<i>- 54 -</i>
5.2.2	<i>Měření hustoty.....</i>	<i>- 54 -</i>
5.2.3	<i>Měření dynamické viskozity</i>	<i>- 56 -</i>
5.3	EXTERNÍ ZDROJ DAT.....	- 58 -
5.3.1	<i>Dynamická viskozita vody.....</i>	<i>- 58 -</i>
5.3.2	<i>Měrná tepelná kapacita měřených kapalin</i>	<i>- 59 -</i>
5.4	POPIS PRŮBĚHU EXPERIMENTU	- 60 -
5.5	NAMĚŘENÁ DATA	- 65 -
5.6	PŘÍKONOVÁ CHARAKTERISTIKA	- 67 -
5.6.1	<i>Teoretický rozbor - inspekční analýza</i>	<i>- 67 -</i>



5.6.2	Vyhodnocení příkonových charakteristik	- 71 -
6	DISKUSE	- 76 -
7	ZÁVĚR	- 79 -
8	REFERENCE	- 81 -
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	- 84 -
10	SEZNAM TABULEK	- 87 -
11	SEZNAM GRAFŮ	- 87 -
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 87 -
13	PŘÍLOHY	- 88 -



1 Seznam použitých symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
A	konstanta	[–]
B	konstanta	[–]
C	konstanta	[–]
c	směrnice regresivní přímky	[–]
c_p	měrná tepelná kapacita kapaliny	[kJ/kg.K]
D	smyková rychlost	[1/s]
d	obecný průměr rotoru	[mm]
d_{25F}	průměr rotoru typu F	[mm]
d_{25G}	průměr rotoru typu G	[mm]
d_s	průměr statorové hlavy	[mm]
F	síla	[N]
M_k	krouticí moment	[N.m]
M_C	moment po korekci	[N.m]
M_M	měřený moment	[N.m]
M_R	residuální moment	[N.m]
m	hmotnost	[g]
m	počet měření	[–]
\vec{n}	jednotkový normálový vektor k ploše	[1]
n	otáčky míchadla	[ot/s]
n	počet stupňů volnosti	[–]
P	příkon zařízení	[W]
$P_{vstupní}$	příkon motoru (napájení)	[W]
$P_{třecí}$	třecí výkon	[W]
P_o	příkonové číslo	[–]
p	tlak	[Pa]
Re	Reynoldsovo číslo	[–]
S	průřez	[m ²]
S	směrodatná odchylka	[–]
S_c	směrodatná odchylka směrnice	[–]



S_p	plocha průmětu tělesa do roviny kolmé na vektor rychlosti	$[m^2]$
T	teplota kapaliny	$[°C]$
T_1	teplota před mícháním	$[°C]$
T_2	teplota po míchání	$[°C]$
$T_{stř}$	střední teplota	$[°C]$
ΔT	rozdíl teplot	$[°C]$
t	doba míchání	$[s]$
t	poměr	$[-]$
$t_{m-2;\alpha}$	kritická hodnota poměru	$[-]$
$t_{m-1;\alpha}$	kritická hodnota poměru	$[-]$
\vec{u}	vektor rychlosti	$[m/s]$
V_p	objem pyknometru	$[cm^3]$
\vec{x}	polohový vektor	$[m]$
α	hladina významnosti	$[-]$
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost	$[1/s]$
$\vec{\Delta}$	tenzor rychlosti deformace	$[s^{-1}]$
$\vec{\delta}$	jednotkový symetrický vektor	$[1]$
η_M	účinnost motoru	$[-]$
μ	dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
ρ	hustota kapaliny	$[kg/m^3]$
$\vec{\sigma}$	tenzor celkových napětí	$[Pa]$

Dolní indexy

100	100% glycerin
100FL	100% glycerin ve <i>Fluentu</i>
50	50% vodný roztok glycerinu
H2O	voda
H2OFL	voda ve <i>Fluentu</i>
k100	kontrolní objem 100% glycerinu
k50	kontrolní objem 50% v. r. glycerinu
kH2O	kontrolní objem vody



m	vztaženo k hmotnosti
$P50$	pyknometr s 50% v. r. glycerinu
$PH20$	pyknometr s vodou
p	vztaženo k tlaku

Horní indexy

*	bezrozměrná veličina
+	bezrozměrná veličina

2 Úvod

V současné době jsou dispergační zařízení typu stator - rotor využívána v širokém spektru průmyslových odvětví. Komerčně dostupná míchadla tohoto typu jsou z konstrukčního hlediska velmi rozmanitá a jsou zastupována bohatou škálou rozměrů od malých laboratorních zařízení po velkokapacitní produkční průmyslové jednotky. Dispergační technologie mají uplatnění v průmyslu chemickém, biochemickém, potravinářském a kosmetickém. Obecně se používají pro suspenze, které mají dynamickou viskozitu menší než 150 Pa.s. a jsou zahrnuty v mnoha procesních operacích, jako je například homogenizace, dispergace, emulzifikace, mletí, rozpouštění, koagulace i v chemických reakcích. Charakteristickými produkty použití dispergátorů je latex, adheziva, osobní péče, čisticí produkty a další chemické mikrodisperze nebo také zemědělské pesticidní přípravky.

Navzdory rozsáhlému použití míchadel stator - rotor nemají z hlediska jejich znalosti téměř žádnou vědeckou základnu. Pro předvídání nějakého chování existuje jen málo teorií. Stejně tak systematické protokoly experimentálního měření pro zjištění výkonnosti. Dalším faktem zůstává, že zařízení jsou vyvinuta a vyráběna malými, navzájem si konkurujícími vysoce specializovanými společnostmi. Tyto společnosti si nechávají svoje know-how, což vytváří prostředí, které nesvědčí rozvoji všeobecné znalostní základny. Veškerý vývoj procesů, scale-up nebo provoz je ve většině případů prováděn prostřednictvím inženýrského úsudku nebo metodou pokus-omyl, namísto korektních inženýrských principů.

Obecně pro jakékoliv využívání dispergačních míchadel nebo návrh dispergačního systému je zapotřebí, aby byla popsána ona příkonová charakteristika, která je charakterizována dvěma bezrozměrnými čísly (Reynoldsovo a příkonové číslo). Tuto charakteristiku je možno získat buďto experimentálně nebo numericky.

Hlavní cílem diplomové práce je získat procesní charakteristiku dvou dispergačních míchadel stator - rotor od firmy IKA („S 25 N - 25 F“ a „S 25 N - 25 G“), které se vyskytují v laboratořích Ústavu procesní a zpracovatelské techniky na akademické půdě ČVUT v Praze. Konkrétně v případě těchto dvou míchadel není publikována žádná vědecká práce, která by popisovala jejich výkonnost, což je hlavní motivací této práce.

3 Rešerše

3.1 Teoretický rozbor

Proces dispergace je proveden pomocí dispergačního zařízení v tzv. *disperzní soustavě*, která je charakteristická obsahem alespoň dvou rozdílných druhů vsádky (materiálů). Jeden materiál se nazývá *disperzní prostředí* a druhý *disperzní podíl*. Hlavním cílem procesu dispergace je rozmíchat pevné částice nebo shluky částic v disperzním prostředí (kapalině) za účelem vytvoření homogenní disperze. [19]

Dispergační zařízení stator - rotor je charakteristické vysokými otáčkami, vysokým smykovým napětím (až stříh) a vysokými příkonovými nároky. Hlavním charakteristickým rysem míchadel tohoto typu je vysokorychlostní rotor v těsné blízkosti statoru, kde se mezera mezi těmito částmi pohybuje v rozmezí od 100 do 3 000 μm . Typické obvodové rychlosti rotoru se pohybují v rozmezí od 10 do 50 m/s , což má za následek i vysoké rychlosti smykové deformace v mezeře v rozsahu od 20 000 do 100 000 s^{-1} . [19] Dalším důležitým aspektem je generování lokální disipované energie v pracovní oblasti zařízení. Celkově se zařízení i vsádka zahřívá, a proto je typickým materiálem legovaná nerezová ocel ASI 316L. Obecně lze říci, že tato energie je až o tři řády vyšší než u běžných konvenčních mechanicky míchaných nádob, a proto je dispergátor někdy nazýván jako generátor. [1]

3.2 Typy míchadel stator - rotor

Komerční míchadla stator - rotor jsou běžně dostupná v různých velikostech od laboratorního měřítka po vysoce výkonné průmyslové zařízení (viz obr. 6). Na trhu existuje mnoho firem, které navrhují a dodávají dispergační zařízení tohoto typu. Geometrie zařízení pro podobné procesy se od různých firem liší pouze minimálně, nicméně rozdíly energetických požadavků jsou markantní.

I přes četné konstrukční variace, které firmy nabízejí, lze dispergační zařízení stator - rotor klasifikovat podle geometrie do tří základních skupin:

- 1) koloidní mlýny
- 2) axiální míchadla
- 3) radiální míchadla

Koloidní mlýny mají velmi široké spektrum využití. Lze je použít jak pro vysoce-viskózní kapalné látky, tak i pro suspenze s vysokým obsahem pevných látek. Primárně jsou využívány pro tvorbu nejjemnějších disperzí (emulze), často ve farmaceutickém průmyslu (zubní pasta, masti, krémy, mýdla) a v potravinářském průmyslu (majonéza, homogenizace tuku). Skládají se ze dvou částí kuželového tvaru. Tyto části vytvářejí dispergační mezeru právě ve tvaru kužele, která se pohybuje v rozmezí od 50 do 800 μm . Z hlediska velikosti a tvaru mezery existuje mnoho konstrukčních provedení, což umožňuje ovlivňovat průtok skrze zařízení a tím i velikost dispergujících částic. Povrchy mohou být hladké, hrubé nebo jsou ve většině případů obě části opatřeny značným počtem zubů nebo drážkovaním. Shluky částic jsou díky rotaci rotoru nasávány do dispergační mezery, kde jsou rozbíjeny působením vysokých smykových napětí a díky odstředivé síle jsou tlačeny směrem k výstupu z dispergátoru. Na následujícím obrázku jsou zobrazena tři konstrukční provedení od firmy IKA. [1] [19]



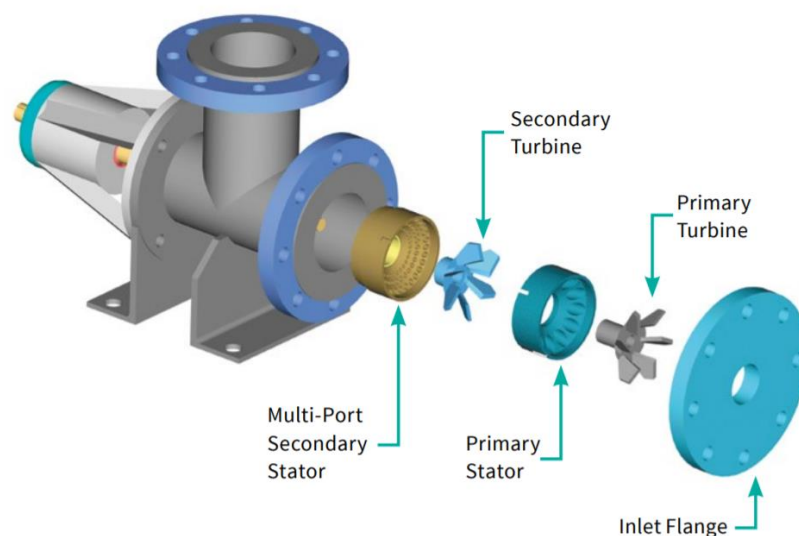
Obr. 1a,b,c. Koloidní mlýn firmy IKA a) drážkování [3] b) hrubý povrch se zuby [3]
c) víceetapňové zuby [2]

Axiální míchadla jsou dalším typem míchadel stator - rotor. Koncepční návrhy a příslušenství pokrývá na trhu především firma Chemineer Greerco, která se na tento typ dispergátorů soustředí. V tomto případě je rotorem axiální míchadlo, které pohání suspenzi ve směru osy rotujícího hřídele a vytváří hlavní dispergaci na stříh. Suspenze proudí zařízením axiálně a prochází statorem. Ve statoru jsou díry o určité velikosti, ve kterých se díky rotujícímu míchadlu také vytváří určitý tangenciální stříh. Tato firma nabízí i dvoustupňové verze zařízení, což v důsledku znamená, že jde za sebou více rotorů a statorů. Zařízení se potom například skládá z primárního stupně dispergátoru s většími otvory ve statoru a sekundárního stupně dispergátoru s otvory menšími. Dalším charakteristickým znakem axiálních míchadel je možnost ovlivnit dispergaci suspenze díky regulaci šířky mezi statorem a rotorem pomocí podložek nebo pouzder. [1]

Na následujících obrázcích jsou zobrazena konstrukční provedení od firmy Chemineer Greerco.



Obr. 3. Axiální míchadla firmy Chemineer Greerco a) jednostupňové b) dvoustupňové [1]



Obr. 2. Sestava dvoustupňového axiálního dispergačního míchadla firmy Chemineer Greerco [5]

Radiální míchadla jsou posledním typem míchadel stator - rotor. Na trhu je poskytují, ve vzájemné anonymitě „know-how“, především firmy IKA, Silverson a Ross. U tohoto typu dispergátoru je opět hlavní poháněcí složkou rotor, který rotuje uvnitř statoru válcového charakteru. Stator je opět nehybnou složkou zařízení. Vlivem otáčení rotoru a vzniklých odstředivých sil dochází (ve směru osy hřídele) k nasávání suspenze do zařízení. K hlavní dispergaci dochází v mezeře mezi státorem a rotorem, která se pohybuje v rozmezí od 5 do 50 μm . V této mezeře probíhá hlavní dispergace, kde je suspenze vystavena nejvyšším smykovým napětím (tangenciálně vůči radiálnímu toku). Zbytky suspenze následně opouštějí pracovní prostor a radiálním směrem vycházejí ze zařízení skrze díry ve statoru. [1]

Geometrie statoru (i rotoru) zásadně ovlivňuje celkový chod dispergace a kvalitu výsledné disperze. Různorodost jejich provedení je zobrazena na následujících obrázcích.



Obr. 4. Různá konstrukční provedení radiálních míchadel firmy IKA [4]

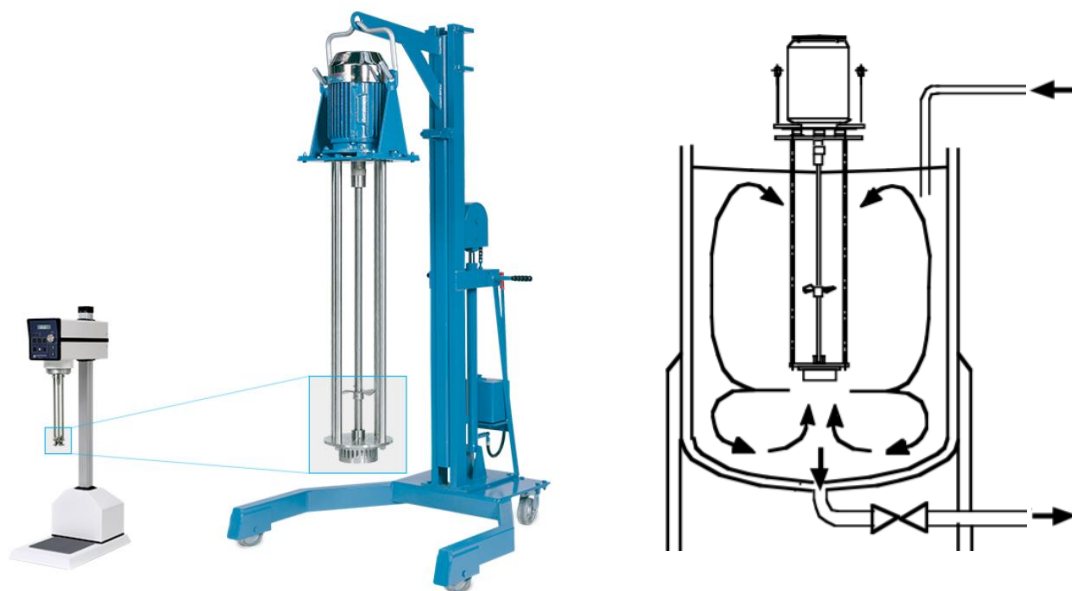


Obr. 5. Různá konstrukční provedení radiálních míchadel firmy Silverson [7]

Všechny výše zmíněné typy geometrií míchadel stator - rotor lze dále ještě klasifikovat vzhledem k jejich provozní konfiguraci:

- 1) vsádkové (polo-vsádkové)
- 2) průtočné

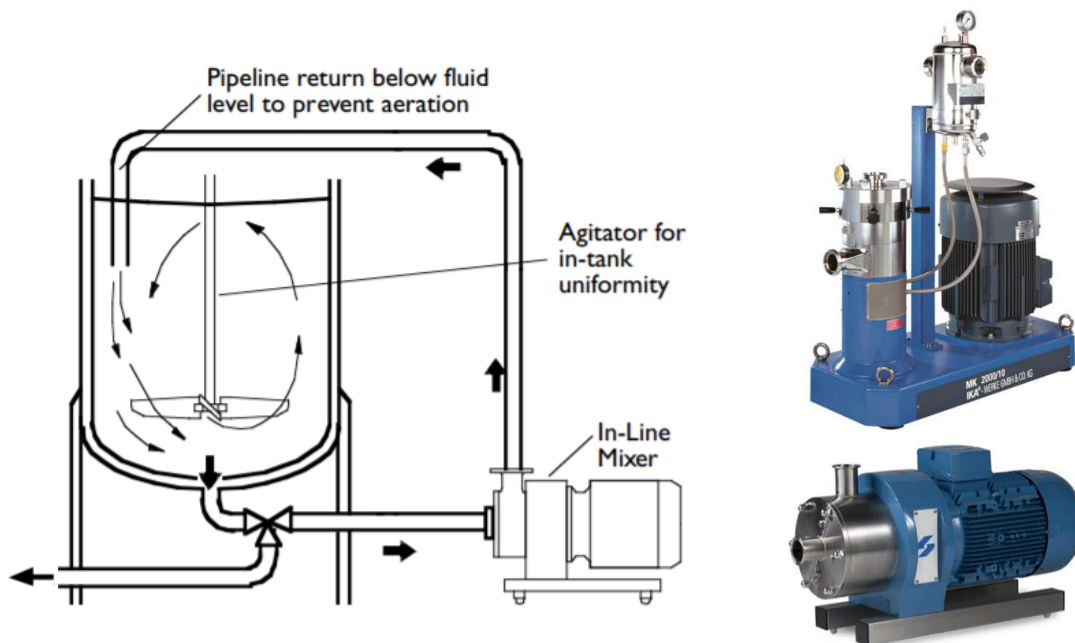
Vsádková (polo-vsádková) konfigurace provozu je typická především pro radiální typ míchadel. V laboratorním měřítku je dispergátor připojen přímo do dispergačního nástavce (viz Obr. 6.). V případě větších rozměrů v průmyslu je dispergátor připojen k dlouhé hřídeli, která je navíc kvůli oscilacím ještě vyztužena podpůrnými tyčemi (většinou čtyři), pro které platí stejné nároky na těsnění. Dalším aspektem průmyslového měřítka je nepoměr velikostí dispergačního zařízení vůči míchané nádobě. Pokud jsou míchané nádoby větší než 40 l, tak dispergátor není schopen zajistit dostatečnou cirkulaci vsádky. V takovém případě musí být nádoba vybavena přidavným míchadlem v ose nádoby, jejíž funkcí je vytvářet dostatečnou cirkulaci. Dispergátor je vestaven excentricky.



Obr. 6a,b. Vsádkový radiální míchadlo firmy Silverson a) provedení scale-up [8]

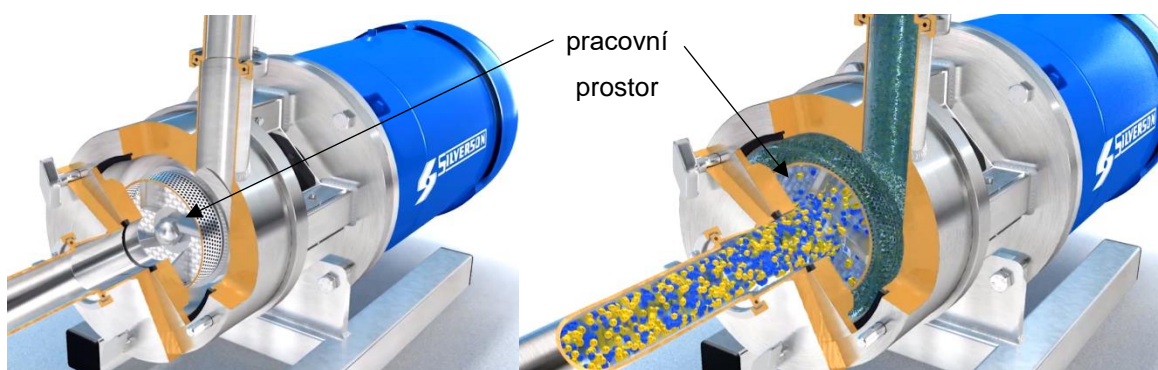
b) schematický náčrt dispergační nádoby [6]

Průtočná konfigurace provozu je realizovatelná pro všechny tři typy míchadel stator - rotor. Dispergační pracovní prostor je umístěn mimo prostor nádoby se vsádkou. Nádoba musí být v její ose vybavena míchadlem opět pro dostatečnou cirkulaci vsádky. Jedná se tedy o konvenční míchanou nádobu, která je ale navíc vybavena „by-passem“, jehož součástí je právě průtočné dispergační zařízení. Pracovní prostor dispergátoru je umístěn v pouzdře externího zařízení s odděleným vstupem a výstupem. Ve většině případů je vstupní tok situován do středu rotoru, čili princip rozbíjení shluku částic je zcela totožný se vsádkovou konfigurací. Obecně lze ale říci, že průtočné zařízení jsou v průmyslovém měřítku využívána více a oproti vsádkové konfiguraci je doba homogenizace kratší. [1]



Obr. 7a,b,c. Průtočné radiální míchadlo a) schematický náčrt dispergační nádoby [6]

b) koloidní mlýn firmy IKA [2] c) In-line dispergační zařízení firmy Silverson [9]



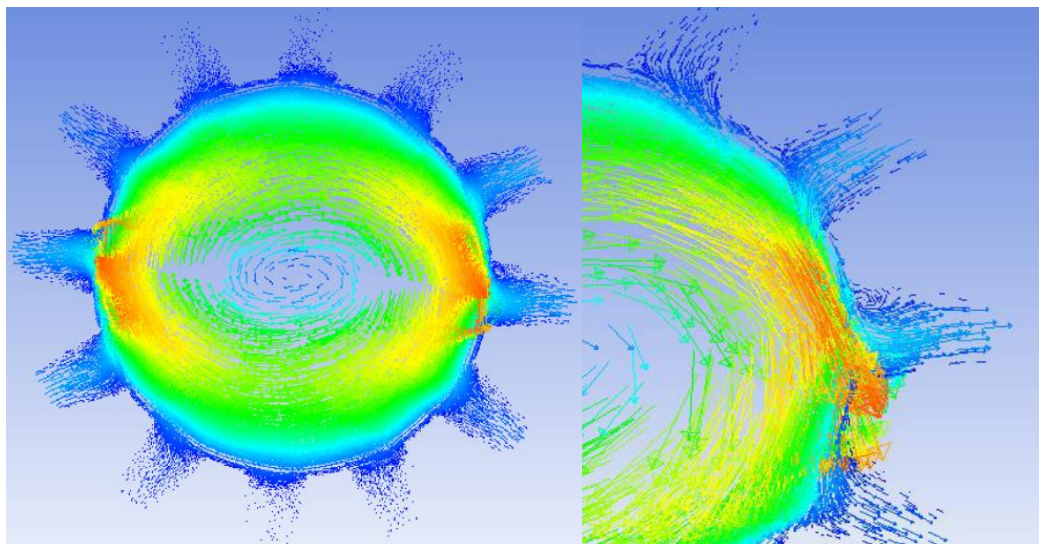
Obr. 8. Průběh dispergace v In-line zařízení firmy Silverson [9]

3.3 Numerické simulace systémů stator - rotor

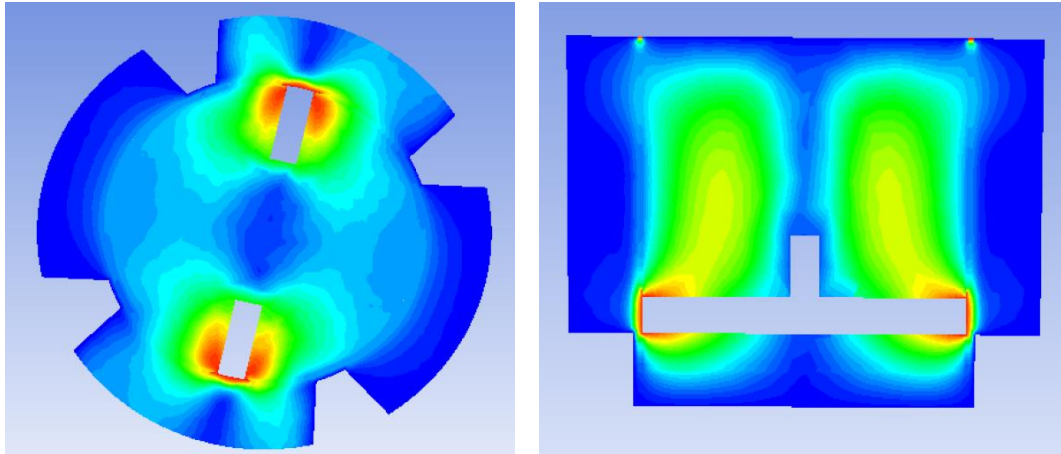
Numerické simulace jsou v obecném měřítku dobrým nástrojem pro ověření tokových vlastností kapaliny v určitém prostředí. V případě dispergátorů stator - rotor je znalost rychlostního a vektorového pole podstatnou informací pro stanovení hodnot tečných napětí a celkové přiblížení procesu dispergace. Vzhledem k tomu, že neexistuje mnoho publikovaných dat pro příkonové charakteristiky, je numerická simulace podstatnou součástí této diplomové práce.

Na akademické půdě ČVUT Fakulty strojní v Praze se numerickou simulací dispergačních míchadel stator - rotor již někteří předchozí kolegové zabývali. Konkrétně v diplomové práci „*Vliv dispergace na tokové vlastnosti disperzí nátěrových hmot (2015)*“ se kolega Ing. Zajíček zabýval právě míchadlem firmy IKA typu „S 25 N - 25 G“. V seminární práci „*Simulace míchadla typu stator - rotor ve Fluentu (2015)*“ se dále zabývá rozborem práce v softwaru *Fluent*. Jedním z cílů těchto prací bylo při určitých okrajových podmínkách popsat proudění kapaliny pomocí rychlostního a vektorového pole. V případě diplomové práce byla pracovní kapalinou nátěrová hmota, což odpovídá vysoko-viskózní kapalině.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny a popsány výsledky předchozích numerických simulací.



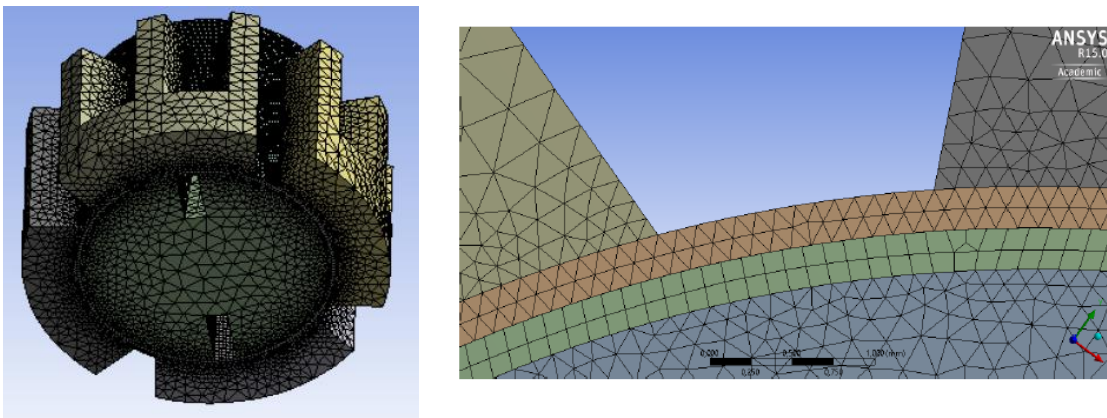
Obr. 9. Vektorové pole směrů proudění v řezu kolmém k ose [19]



Obr. 10a,b. Kontura (rychlostní pole) a) pohled na půdorys b) kolmý řez lopatkami rotoru [19]

Na obr. 9 je viditelné, že v otvorech ve statoru nedochází pouze k výstupu kapaliny, ale zároveň i k nasávání vlivem podtlaku zapříčiněného vysokými otáčkami rotoru. K tomuto jevu dochází zvláště v oblasti za rotujícím míchadlem. Na obr. 10a,b. jsou zobrazena rychlostní pole, kde je viditelné, že nejvyšších rychlostí dosahuje dispergující kapalina v oblasti na okrajích lopatek rotoru. [19]

Cílem této diplomové práce je provést CFD simulaci stejného typu míchadla firmy IKA, ačkoli v tomto případě bude kladen větší důraz na jemnější síť v oblasti mezikruží mezi rotorem a statorem, kde se vyskytují největší smyková napětí. V předchozí CFD simulaci byly v mezikruží zvoleny 4 výpočtové elementy na poloměru. Pro přesnější výsledky numerické simulace bude v této diplomové práci zvolen počet elementů 10. Následně bude díky jemnější síti přesněji určen krouticí moment M_k , ze kterého bude dále vypočten příkon zařízení P .



Obr. 11. Vygenerovaná síť celého objemu dispergačního zařízení a podélný řez objemem zařízení [18]



3.4 Experimentální měření systémů stator - rotor

Měření příkonové charakteristiky je hlavním experimentem této diplomové práce. V předchozí rešerši je zmiňováno, že na trhu existuje nespočet variací geometrií míchadel stator - rotor s různými konfiguracemi provozu. Dalším faktem je, že existuje pouze málo publikovaných dat (příkonové charakteristiky) těchto dispergačních míchadel. Nicméně vzhledem k podobnosti konstrukcí míchadel je předpokládáno, že i navzdory nedostatku publikací, bude vyhodnocení experimentu řádově odpovídat dostupné literatuře. V zásadě nejvíce experimentů pro získání příkonových charakteristik bylo provedeno pro vsádková dispergační zařízení s jedním rotorem, který je obklopen prostým statorem. Jedná se tedy o základní konstrukční provedení, které dle popisu odpovídá míchadlům firmy IKA „S 25 N - 25 G/F“, na kterém je proveden hlavní experiment diplomové práce. [1]

Příkonová charakteristika $P_o = f(Re)$ je závislost dvou proměnných v logaritmických souřadnicích, tj. Reynoldsovo číslo Re a příkonové číslo P_o . Existuje nesporná podobnost mezi konvenčně míchanou nádobou a vsádkovým dispergačním zařízením stator - rotor. V posledních letech byly provedeny výzkumy, které aplikují známé teoretické základy míchané nádoby na dispergátory. Hlavně tedy ve výpočtu Re a P_o , kde je pro jejich výpočet použit vždy jeden základní rozměr míchadla, tj. průměr rotoru d . To v důsledku znamená, že tyto dvě závislé příkonové charakteristiky jsou definovány v obou případech stejně:

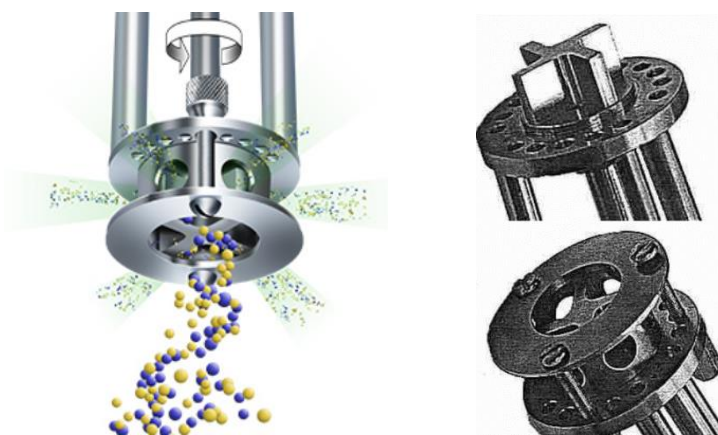
$$P_o = \frac{P}{\rho n^3 d^5}, \quad (1)$$

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

Z důvodu stejného definování Re a P_o , je podobný i průběh celé příkonové charakteristiky. V laminárním režimu proudění je P_o nepřímo úměrné vůči Re . V turbulentní oblasti proudění lze P_o aproximovat konstantou, která se pohybuje v řádech jednotek a to od 2 do 6. Přejít z laminární do turbulentní oblasti je v případě mechanicky míchané nádoby i míchadel stator - rotor přibližně stanoven pro $Re > 10^4$. [1]

Existují různé experimentální metody měřící systémy rotor - stator. Nejčastější metody jsou potom elektrická, tenzometrická a především kalorimetrická, která bude provedena v hlavním experimentu diplomové práce.

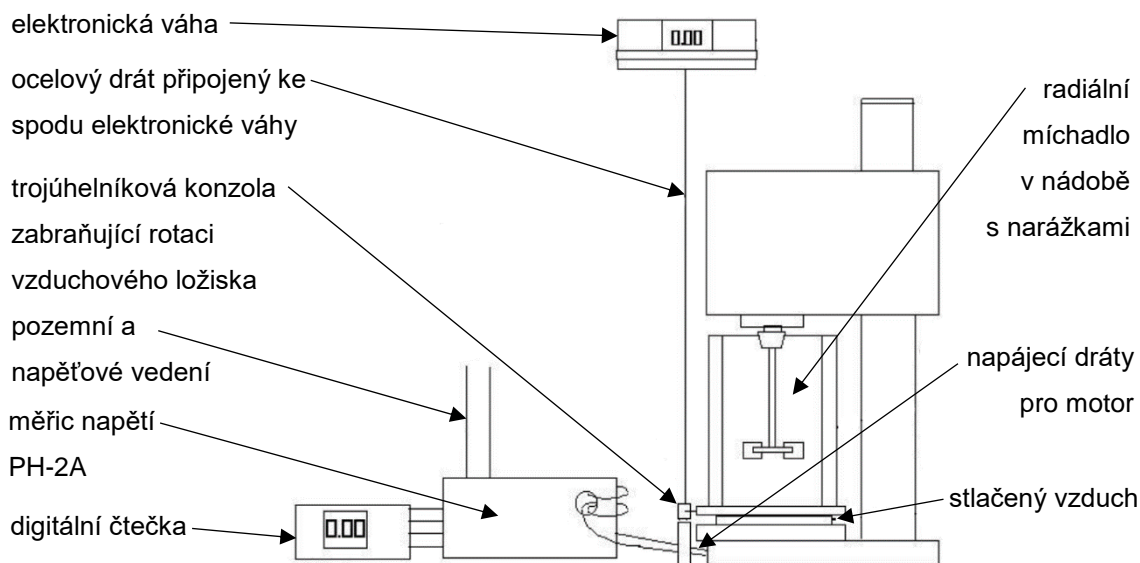
Elektrické měření příkonu bylo provedeno například podle publikace „*Measurement and comparison of power draw in batch rotor-stator mixers (2001)*“. Účelem této studie bylo charakterizovat příkonovou charakteristiku dvou geometricky podobných radiálních míchadel, avšak s rozdílným průměrem rotoru pro více druhů statorových hlav. Na následujícím obrázku je zobrazeno základní provedení dispergátorů dvou firem. [11]



Obr. 12a,b. Radiální míchadla pro elektrické měření

a) Silverson „LR4“ (rotor 28 mm.) [12] b) Ross „ME-100LC“ (rotor 34 mm.) [11]

Na následujícím obrázku je znázorněn schematický náčrt experimentálního měření příkonu elektrickou metodou.



Obr. 13. Schematický náčrt experimentálního měření příkonu elektrickou metodou [11]

Pro tento typ měření bylo příkonové číslo P_o vypočteno podle rovnice (1), avšak v případě příkonu motoru P je výpočet proveden podle následující rovnice:

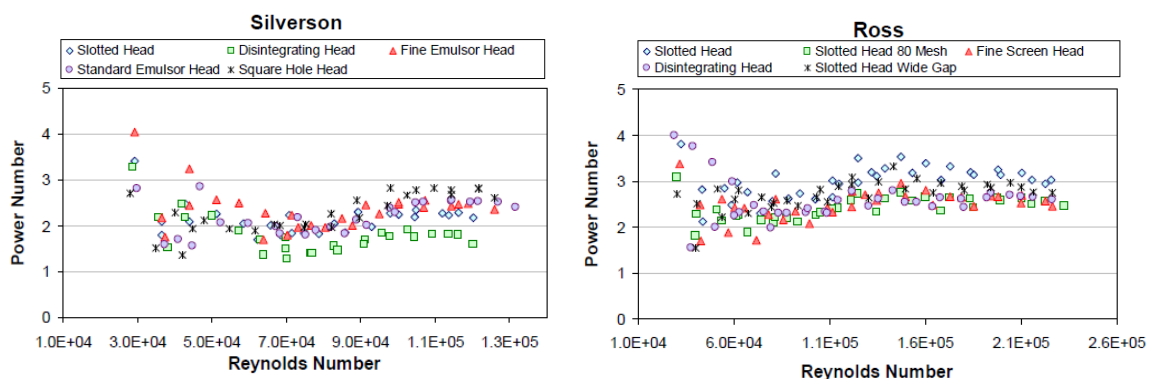
$$P = P_{\text{výstupní}} - P_{\text{třecí}},$$

$$P = \eta_M P_{\text{vstupní}} - \eta_{M(\text{hřídel})} P_{\text{vstupní}(\text{hřídel})},$$

(3)

kde $P_{\text{vstupní}}$ a η_M jsou zjištěny experimentálně (i pro hřídel). Příkony motoru $P_{\text{vstupní}}$ jsou měřeny přímo za použití digitálního měřiče napětí „PH-2A“, přičemž pro míchadlo je nastavován široký rozsah hodnot otáček rotoru. Tyto dva příkony jsou pro získání reálné hodnoty upraveny pomocí odpovídající účinnosti η_M . Reynoldsovo číslo Re je vyčteno dle teorie podle rovnice (2).

Na následujícím obrázku jsou znázorněny výsledky obou míchadel s různými statory.

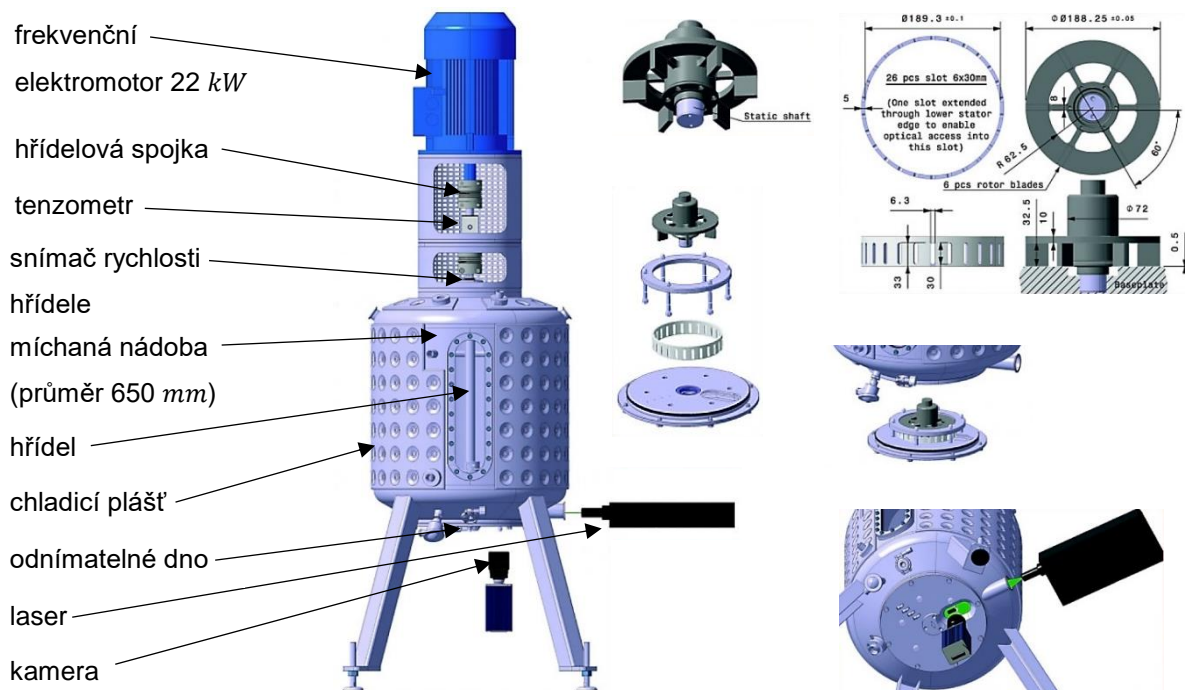


Obr. 14a,b. Příkonová charakteristika experimentálního měření příkonu elektrickou metodou

a) Silverson „LR4“ b) Ross „ME-100LC“ [11]

Příkonová charakteristika se v obou případech pohybuje pro $Re > 10^4$, jinými slovy se jedná již o turbulentní oblast proudění. Obě charakteristiky jsou si svým průběhem (chováním) v této oblasti velmi podobné a to je nejspíše způsobeno podobností geometrií. V případě míchadla firmy Silverson jsou příkonová čísla v celkovém měřítku o pár desetiny nižší než je tomu u míchadla firmy Ross a to je s nejvyšší pravděpodobností způsobeno menším průměrem rotoru. Rozdíly mezi průměrným minimem a maximem různých statorových hlav jsou v případě míchadel Silverson 47% a v případě míchadel Ross 25%. V obecném měřítku se příkonová čísla P_o pohybují v rozmezí hodnot od 2 do 3. [11]

Tenzometrické měření příkonu bylo provedeno například podle publikace „*The Canadian journal of chemical engineering (2011)*“ na experimentálním zařízení skládajícího se z mechanicky míchané nádoby s narážkami a odnímatelným dnem se zabudovaným dispergačním zařízením stator - rotor v ose nádoby. Oproti ostatním experimentálním měřením je míchadlo, z důvodu PIV, uloženo na dně nádoby, což by mohlo způsobit další nesrovnalosti oproti ostatním publikacím, avšak zůstává možnost pro měření více druhů dispergátorů. Prototyp je vybaven dalšími strojními součástmi, viz následující obrázek. [10]



Obr. 15. Prototyp experimentálního zařízení pro tenzometrické měření příkonu [10]

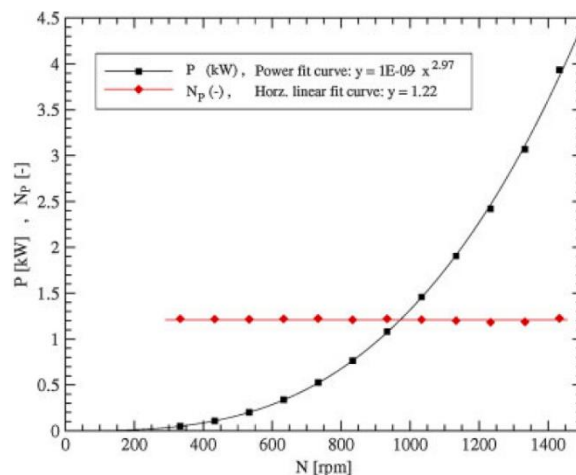
Pozn.: Podrobnější popis obrázku je uveden ve zdroji.

Zařízení je navíc vybaveno tzv. PIV („particle image velocimetry“), které slouží pro vizualizaci proudění a dále také regulační vzduchové ventily pro udržení vnitřního přetlaku 150 kPa, aby se zabránilo odrazům rozpuštěného vzduchu expandujícího v oblastech s nízkým tlakem nebo možnému vzniku kavitace. Chladič plášť potom pomocí cirkulující vody udržuje vsádku při konstantní teplotě.

Pro získání příkonu motoru P byl použit experimentálně zjištěný krouticí moment M_k , který byl změřen pomocí tenzometru firmy HBM „TWN 20“ (0,2 Nm) v rozsahu 0 - 100 Nm, umístěného na hřídeli mezi spojkami.

Výsledky experimentu byly získány za určitých podmínek, že prototyp pracoval v turbulentním režimu proudění ($Re \in 2 \div 8.5 \times 10^5$) opět pro různé hodnoty otáček rotoru. Pracovní kapalinou byla deionizovaná voda, tedy newtonská látka. Příkonové číslo P_o a Reynoldsovo číslo Re jsou vypočteny opět podle rovnic (1) a (2). [10]

Na následujícím obrázku je znázorněno vyhodnocení tenzometrického měření příkonové charakteristiky.



Obr. 16. Příkonová charakteristika experimentálního měření příkonu na prototypu tenzometrickou metodou [10]

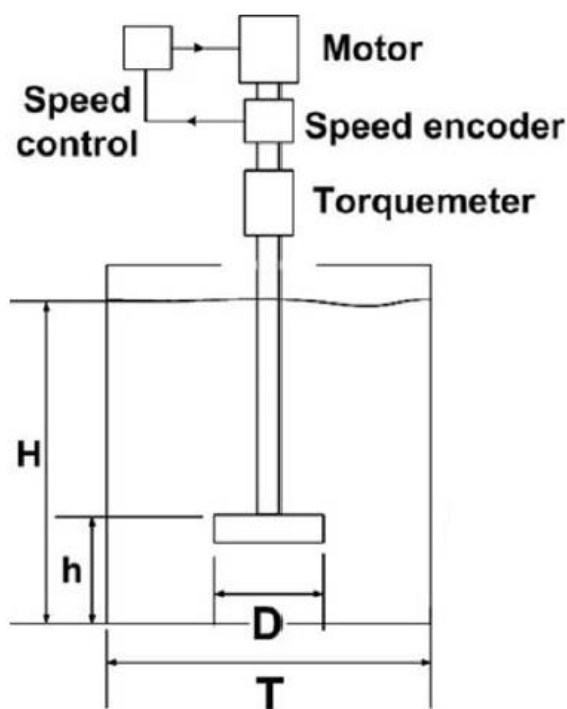
Příkonová charakteristika byla proložena v turbulentní oblasti proudění konstantou $P_o = 1,22$ (značeno N_p). Autor se odkazuje na publikaci „Atiemo-Obeng a Calabrese (2004)“, že ačkoliv je příkonové číslo v této oblasti nižší než v ostatních publikacích, dá se experiment považovat za úspěšný, jelikož vyšel řádově správně. [10]

Možné nesrovnalosti příkonových čísel mohou v tomto případě být způsobeny polohou dispergátoru u dna nádoby. Obecně ale zůstává otázkou vhodnost použití tenzometrické metody měření příkonové charakteristiky, která dispergátoru neumožňuje zajít do vyšších otáček. V tomto měření jsou použity otáčky od 200 do 1500 rpm, což s nejvyšší pravděpodobností způsobuje, že se dispergátor ani nedostane do správného pracovního bodu.

Pozn.: V diplomové práci jsou použity otáčky až 15000 rpm (míchadlo IKA).

Další **tenzometrické měření** bylo provedeno podle publikace „*Hydrodynamics characterization of rotor-stator mixer with viscous fluids (2005)*“. Experimentální zařízení (aparát) je celkově konstrukčně jednodušší, než je tomu v předchozím případě. Sestává se z polykarbonátové válcové nádoby, tentokrát bez narážek, s objemem 17 l. V ose nádoby je na hřídeli umístěno dispergační míchadlo firmy VMI („Rayneri Turbotest mixer“) s dodatečně namontovaným tenzometrickým převodníkem firmy Vibrac „TQ-200“ (0,5%) a snímačem rychlosti. Odhad nejistoty měření byl stanoven maximálně 5%. Otáčky byly nastaveny v rozsahu od 30 do 1500 rpm. [13]

Na následujících obrázcích je zobrazen schematický náčrt experimentálního aparátu se základními rozměry a dispergačního míchadlo.



$T = 0.295 \text{ m}$ $D/T = 0.305$ $H/T \approx 0.85$
 $d_{\text{Stator}} = 0.090 \text{ m}$
 $h_{\text{Stator}} = 0.025 \text{ m}$
Number of slots on the stator = 72
Width of slots = 2 mm
Height of slots = 22 mm
Number of circular orifices on the upper part of the stator = 8;
 $d_{\text{Rotor}} = D = 0.085 \text{ m}$
Height of rotor blades = 0.022 m;
Rotor-stator gap = $\delta_{\text{Gap}} = 1.5 \text{ mm}$.



Obr. 17. Schematický náčrt experimentálního aparátu pro tenzometrické měření příkonu a dispergačního míchadlo firmy VMI [13]

Jako newtonská pracovní kapalina byly použity roztoky glukózy, jejichž dynamická viskozita μ se pohybovala v rozmezí hodnot od 0.5 do 29 Pa.s a hustota ρ v rozmezí od 1326 do 1380 kg/m³.

Příkonová charakteristika byla získána měřením krouticího momentu, vytvářeného rotací míchadla. Hřídelový systém vytváří tzv. residuální krouticí moment. To znamená, že jako v předchozím případě měření dochází k tření, a proto musí být měřeného momentu odečten moment residuální. [13]

Celkový moment je tedy vypočten podle následující rovnice: [5]

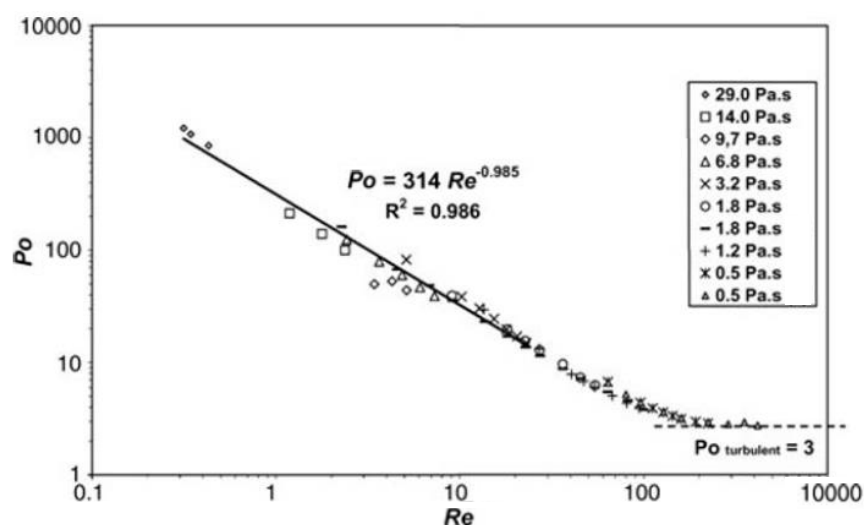
$$M_C = M_M - M_R, \quad (4)$$

a následně je vypočten příkon P : [5]

$$P = 2\pi n M_C. \quad (5)$$

Příkonové číslo Po je vypočteno opět podle rovnice (1).

Na následujícím obrázku je znázorněno vyhodnocení tenzometrického měření příkonové charakteristiky.



Obr. 18. Příkonová charakteristika experimentálního měření příkonu na aparátu tenzometrickou metodou [13]

Příkonová charakteristika má typický tvar křivky pro newtonské látky, avšak předpokládaná oblast pro turbulenci je pro $Re > 10^4$. Jedná se o typický problém tenzometrické metody, kdy není možno použít vyšší otáčky z důvodu možné deformace tenzometru. Tvar pro příkonové číslo $Po = 314 Re^{-0.985}$ v laminární oblasti proudění odpovídá dostupné literatuře a pro částečně změřenou turbulentní oblast je příkonové číslo $Po = 3$, což také odpovídá.

Pozn.: V Diplomové práci se míchadlo IKA vyskytuje v turbulentní oblasti proudění v oblastech i pro $Re = 7 \cdot 10^4$.

Kalorimetrické měření příkonu je posledním typem experimentálního měření příkonové charakteristiky. Tento typ experimentu byl historicky prováděn především pro průtočné konfigurace provozu („in-line mixers“) pod názvem „calorimetry measurement“ nebo „heat-balance measurement“. Uvedeno je například v publikaci „*Power and flow characteristics of three rotor-stator heads (2011)*“ nebo v „*Power consumption characteristics of an in-line silverson high shear mixer (2012)*“.

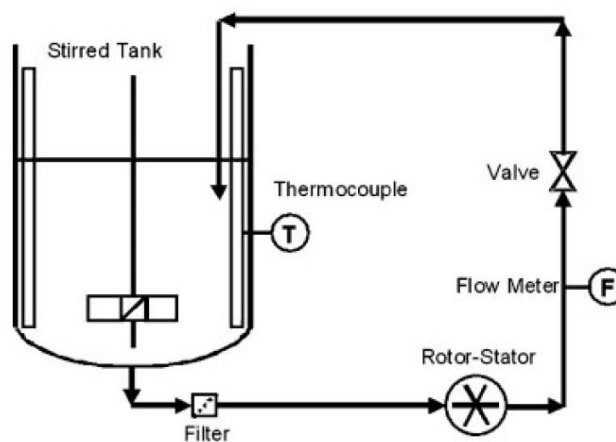
Tato metoda je založena na principu disipace energie, která vzniká při dispergaci. Jinými slovy předpokladem je, že zdroj energie dodávaný do systému skrze míchadlo stator-rotor je disipován, tudíž přeměněn na teplo vedoucí do kapaliny. [14]

Proto je pro výpočet příkonu motoru P použita kalorimetrická rovnice: [14]

$$P = \frac{mc_p\Delta T}{t}, \quad (6)$$

kde je měřen rozdíl teplot kapaliny před a po disipaci energie ΔT v závislosti na čase t v rozsahu určitých provozních podmínek (v tomto případě rychlost rotoru a průtok in-line míchadlem). Dále m je hmotnost kapaliny a c_p měrná tepelná kapacita kapaliny. Dále příkonové číslo Po a Reynoldsovo číslo Re je opět vypočteno podle rovnic (1) a (2). [14]

Na následujícím obrázku je znázorněn schematický náčrt experimentálního měření kalorimetrickou metodou průtočné konfigurace.



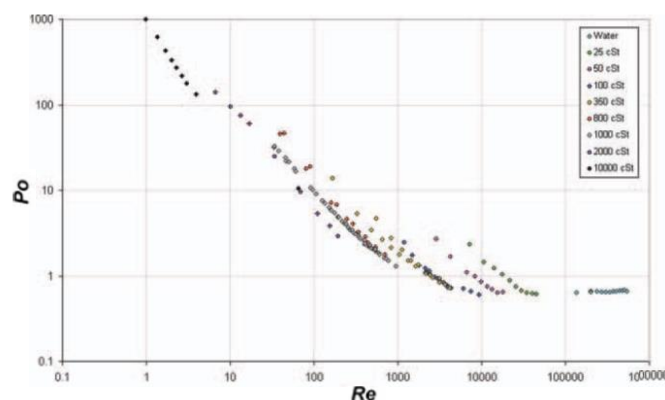
Obr. 19. Schematický náčrt experimentálního měření kalorimetrickou metodou průtočného zařízení [14]

Experimentální zařízení je vybaveno in-line míchadlem stator - rotor firmy Silverson v recirkulační smyčce s míchanou nádobou o průměru 610 mm. Zařízení je dále vybaveno nerezovou lopatkovou turbínou, která podporuje směr proudění z nádoby (dolů). Pracovní kapalinou je destilovaná voda, která před dispergátorem prochází filtrem. Další částí recirkulace je průtokoměr, který se nachází za dispergátorem a škrťací ventil, který reguluje průtok pracovní kapaliny. Aby se zabránilo možným tepelným ztrátám je potrubí opatřeno 20 mm potrubní izolací. Další tepelnou izolací je opatřena i nádoba a hlava dispergačního zařízení 150 mm (izolace se skleněnými vlákny). Teplota pracovní kapalina je měřena termočlánky Pt100, které jsou připojeny k počítači (automatické měření). Každé měření bylo provedeno tak, aby ohřátí kapaliny bylo alespoň o 10 °C. [14]

Na následujících obrázcích je znázorněno průtočné míchadlo stator - rotor a výsledná příkonová charakteristika.



Obr. 20. In-line dispergační míchadlo firmy Silverson („150/250 MS“) [15]



Obr. 21. Příkonová charakteristika experimentálního měření průtočného zařízení kalorimetrickou metodou [15]

Příkonová charakteristika průtočné konfigurace zařízení má podobný charakter jako vsádková konfigurace, nicméně konstanta příkonové číslo $Po \sim 0.8$ v turbulentní oblasti proudění je 3 - 4x menší, což je u průtočné konfigurace běžné.

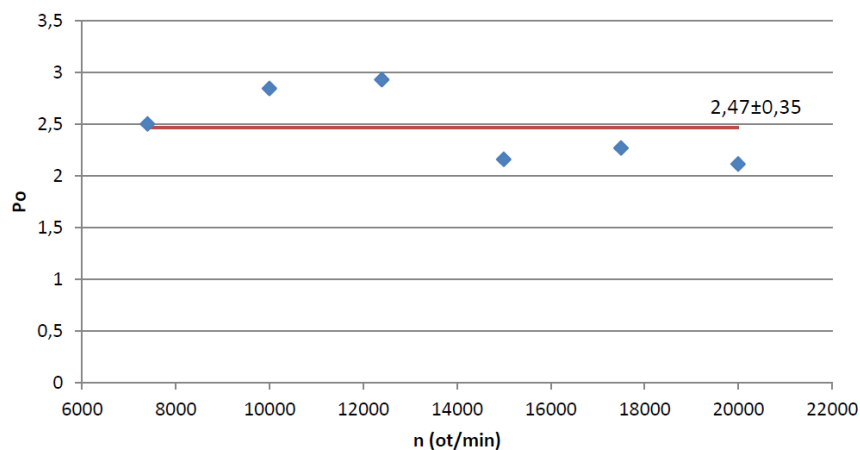


Podobně nízká příkonová čísla jsou uvedena i v ostatních zveřejněných publikacích a obecně se P_o pohybuje v rozmezí hodnot od 0,2 do 1. Přechod do turbulentní oblasti odpovídá $Re > 10^4$.

Na akademické půdě ČVUT Fakulty strojní v Praze se kalorimetrickou metodou měření příkonu (vsádková konfigurace) již někteří předchozí kolegové zabývali. Konkrétně v diplomové práci „*Dispergace v technologii výroby částicových nanokompozitů (2015)*“ se kolega Ing. Kovářík zabýval míchadlem firmy IKA typu „S 25 N - 25 G“. Jedním z cílů této práce bylo změřit závislost příkonového čísla na otáčkách výše zmíněného míchadla, kde pracovní kapalinou byla nátěrová hmota (barva). Pro barvu byla navíc měřena měrná tepelná kapacita c_p , kterou je nutno znát pro použití kalorimetrické metody měření příkonu. Měření měrné tepelné kapacity bylo problematické a probíhalo na starém kalorimetru (špatné míchání a cirkulace barvy). Výsledek kalorimetru je podhodnocený a chyba měření je odhadnuta na $\pm 30\%$. To ve finále způsobuje i nepřesný výpočet příkonového čísla, které je tudíž nižší než by mělo reálně být.

Pozn.: Diplomová práce navazuje práci na Ing. Kováříka pro stejný typ míchadla firmy IKA. Nicméně z důvodu přesnějších výsledků příkonové charakteristiky jsou zvoleny modelové kapaliny (voda, 50% vodný roztok glycerinu a 100% glycerin), u kterých je měrná tepelná kapacita c_p již známa pro širokou škálu hodnot teplot.

Na následujícím obrázku je znázorněna závislost příkonového čísla na otáčkách.



Obr. 22. Závislost příkonového čísla na otáčkách [17]



Ze závislosti na výše uvedeném obrázku je patrné, že se míchadlo pohybovalo v turbulentní oblasti proudění pro $Re > 10^4$. Tato oblast byla proložena konstantou, která odpovídá příkonovému číslu $Po = 2,47$, což se shoduje s dostupnou literaturou. Míchadlo se dostalo do pracovního režimu za použití značně vysokých otáček až 20 000 *rpm*.

4 Numerická simulace

Účelem numerické části diplomové práce je provést CFD simulaci zadané geometrie dispergačního zařízení stator - rotor firmy IKA „S 25 N - 25 G“ v softwaru *Ansys, Fluent v16.2*.

Cílem simulace je určení krouticího momentu M_k na rotoru (hřídel). Ten je potřebný pro výpočet příkonu zařízení P a následného určení příkonového čísla Po pro sestrojení příkonové charakteristiky.

V následných kapitolách je stručně rozebrán postup tvorby 3D modelu a vytvoření tzv. fluidu v zařízení, postup tvorby a kontrola kvality sítě, nastavení podmínek pro simulaci a postup práce v softwaru *Fluent*, popis vhodnosti zvoleného výpočtového modelu a na konci numerické části práce vyhodnocení dat (tzv. postprocessing) včetně vyhodnocení příkonového čísla.

4.1 Tvorba 3D modelu - CAD

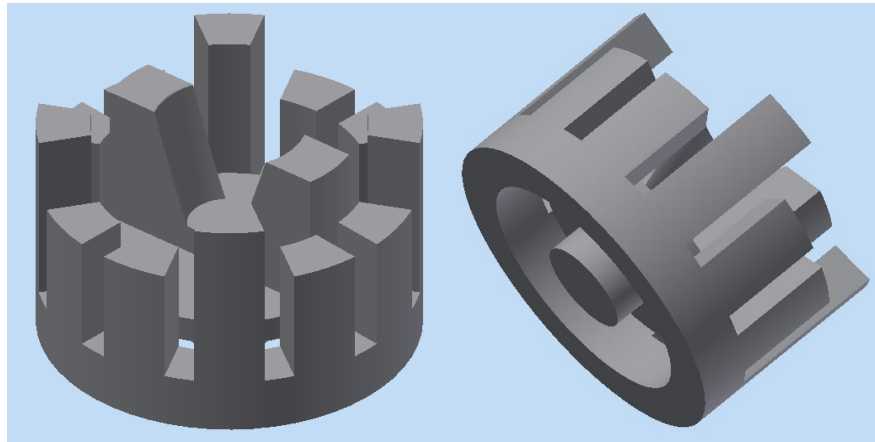
Při tvorbě 3D modelu - CAD byl použit software *Autodesk Inventor 2017 Professional - Student License*. Geometrie dispergačního zařízení stator - rotor od firmy Silverson je poměrně komplikovaná a členitá. Při srovnání uživatelského rozhraní softwaru *Inventor* a „Designmodeleru“ v softwaru *Ansys v16.2*, jsou pro složitější geometrie klasické modelovací CAD softwary výhodnější volbou („user friendly“). Samozřejmě zůstává možnost použití i dalších modelovacích softwarů jako je např. *Solid Works, Solid Edge*.

Při modelování bylo dbáno na co nejpřesnější napodobení reálné geometrie zařízení bez jakýchkoliv zjednodušovacích opatření a to proto, aby byly podmínky pro simulaci co možná nejpodobnější reálným experimentům, které budou následně provedeny v rámci experimentální části diplomové práce.

Nejdříve je zapotřebí vymodelovat dvě základní části dispergátoru STATOR a ROTOR. Tyto dvě části zařízení jsou následně zkompletovány do sestavy a poté je sestava vyexportována v CAD formátu STEP (.stp). Formát .stp je plně kompatibilní se softwarem *Ansys v16.2*.

Pozn.: Podrobný popis postupu v softwaru Inventor je uveden v přílohách P1.1, P1.2 a P1.3.

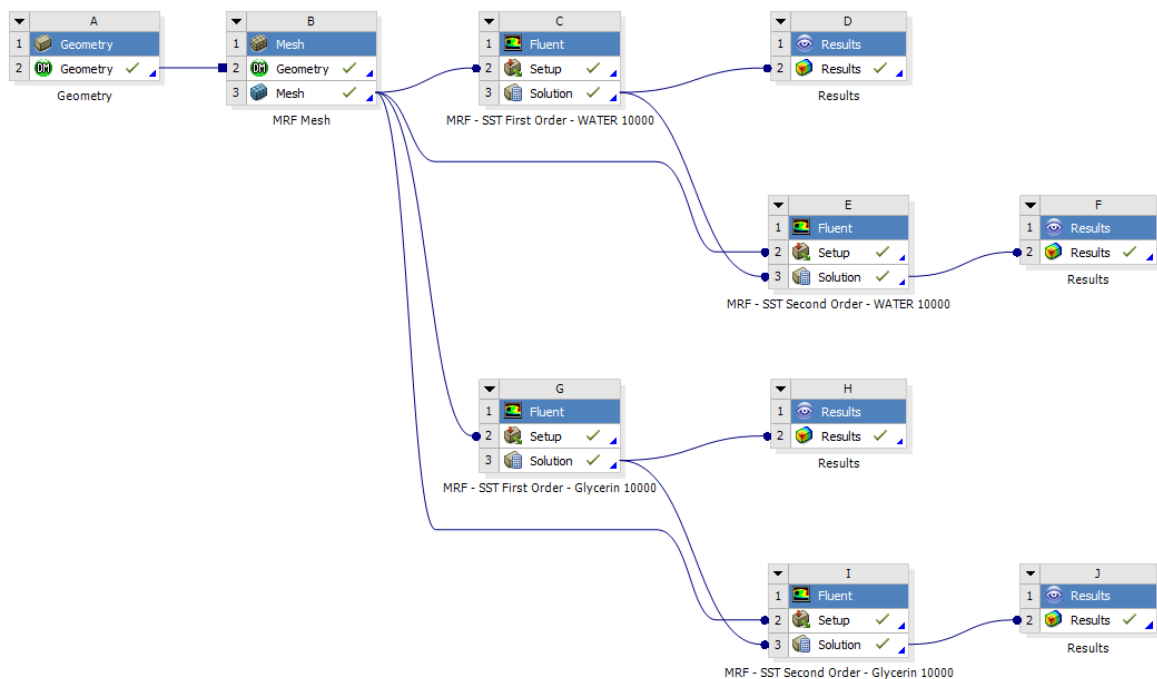
Na následujícím obrázku je zobrazena kompletní 3D sestava míchadla.



Obr. 23. Kompletní sestava připravená k vyexportování do CAD formátu .stp

4.2 Tvorba 3D modelu - ANSYS

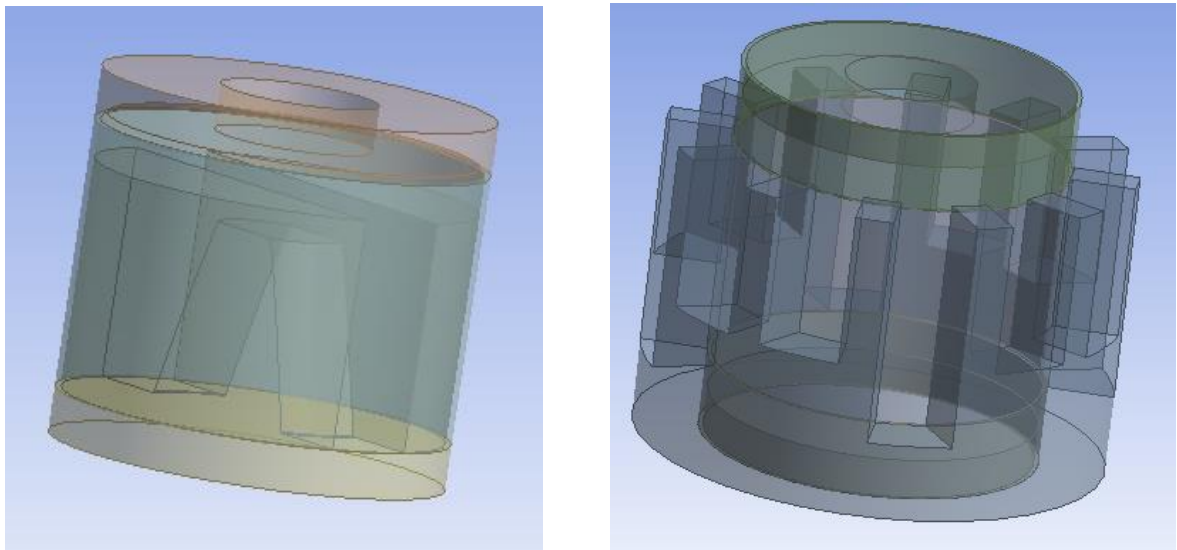
Postup práce v softwaru *Ansys* je systematický a pro uživatele zcela přehledný v prostředí zvaném „WorkBench“ (zkr. WB). Z hlediska návaznosti je dodržován určitý postup jednotlivých kroků, který je názorně zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 24. Zobrazení postupu práce numerické simulace v softwaru Ansys

V prvním kroku je vždy nejprve zapotřebí vytvořit geometrii („Geometry“). V dalším kroku je potom ve vytvořené geometrii vygenerována síť („Mesh“) s požadovanou kvalitou a určitým počtem ji tvořících elementů. V posledním kroku je využíván tzv. řešitel („Solver“). Pro tento případ (tj. simulace proudění) je zvolen *Fluent*. Zde je možnost nastavení („Setup“), kde jsou zvoleny okrajové podmínky, fyzikální vlastnosti kapaliny, vstupní a výstupní parametry, ale také třeba výpočtový model simulace. Jednotlivé numerické simulace pro vodu a glycerin jsou provedeny nejdříve s prvním a poté s druhým řádem přesnosti („First/Second Order“).

Předchozí kapitola 4.1 se zaměřila na tvorbu geometrie reálného dispergačního zařízení. Nicméně pro numerickou simulaci je zapotřebí, aby byla vytvořena geometrie tzv. prázdného prostoru, tedy takového prostoru, kde se bude vyskytovat a proudit daná kapalina. Jedná se tedy o inverzní tvorbu 3D modelu kapaliny. V řešiteli *Fluent* je zapotřebí tzv. rozpochybovat rotorovou část zařízení, proto je v půlce mezikruží fluid fiktivně rozdělen na rotorovou a statorovou část, viz následující obrázek.



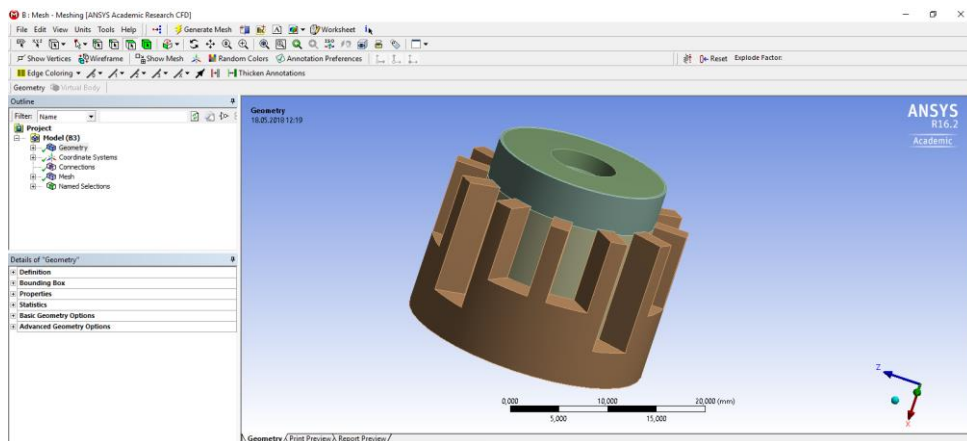
Obr. 25a,b. Fluid a) rotorové b) statorové části

Pozn.: Podrobný popis postupu tvorby 3D modelu kapaliny a rozdělování jeho objemů na jednodušší dílčí části je uvedeno v příloze P1.4.

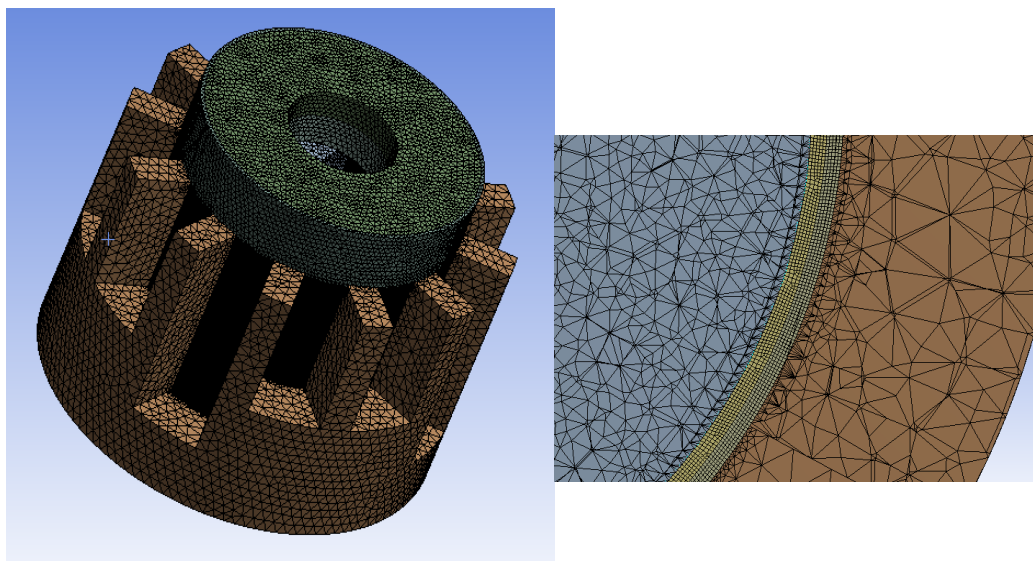
4.2.1 Tvorba sítě

Tento krok tvorby 3D modelu je nejpodstatnější. Druh a tvar elementů sítě rozhoduje o přesnosti a reálnosti výsledných hodnot ze simulace. Existují různé metody, jak lze postupovat při tvorbě sítě. Záleží na požadované kvalitě síťování. Ačkoliv existuje nespočet možností a nastavení jak dojít k vytvoření finální podoby sítě, je prostředí pro uživatele zcela intuitivní a přehledné.

Na následujících obrázcích je zobrazeno pracovní prostředí s modelem pro tvorbu sítě (Mesh) a kompletní vytvořená síť celého objemu, ve které bude probíhat.



Obr. 27. Pracovní prostředí tvorby sítě



Obr. 26. Vygenerovaná síť celého objemu dispergačního zařízení a podélný řez objemem zařízení

Pozn.: Největší důraz je kladen na mezikruží mezi statorem a rotorem, zde je síť nejjemnější. Podrobný popis postupu tvorby sítě je uveden v příloze P1.5.

4.2.2 Kontrola kvality sítě

Kontrola kvality sítě je pro další simulaci nezbytným krokem. Uživateli dává zpětnou vazbu o tom, zdali byla zvolena správná metoda síťování a základní statistické informace o síti.

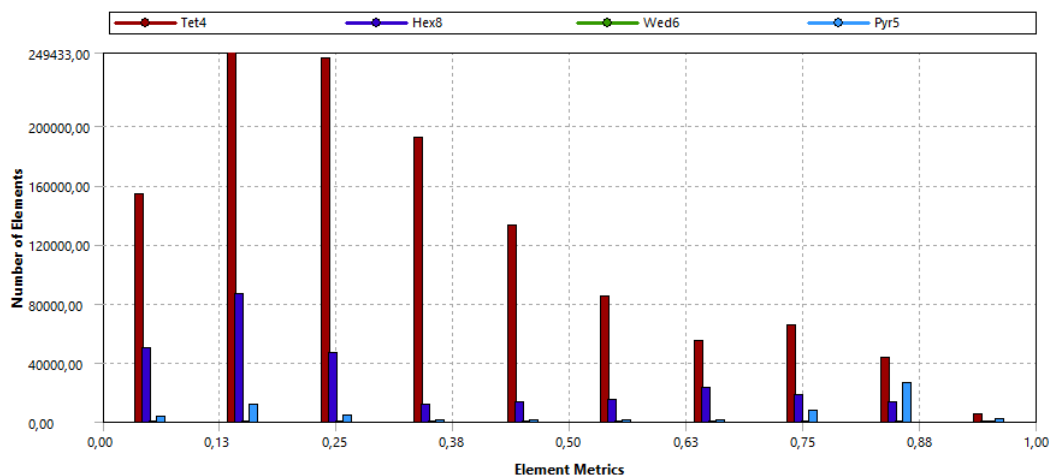
Tuto funkci je možno provést v záložce statistiky („Statistics“), kde je možno zvolit kontrolní metodu sítě („Mesh metric“). Dva základní statistické parametry kontroly jsou ortogonální kvalita¹ („Orthogonal Quality“) a šikmost („Skewness“). Zvolením kontrolní metody jsou získány grafické a číselné hodnoty, které jsou následně porovnány s doporučenými hodnotami (zejména Min, Max, Average). V této záložce je dále zobrazen i počet elementů ve vygenerované síti.

Hodnoty kontroly a následné vyhodnocení kvality je zobrazeno na následujících obrázcích.

Statistics		Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	516901	<input type="checkbox"/> Nodes	516901
<input type="checkbox"/> Elements	1555615	<input type="checkbox"/> Elements	1555615
Mesh Metric	Orthogonal Quality	Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	2,8966e-002	<input type="checkbox"/> Min	3,7964e-008
<input type="checkbox"/> Max	0,99999	<input type="checkbox"/> Max	0,99945
<input type="checkbox"/> Average	0,77735	<input type="checkbox"/> Average	0,33474
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,19741	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,23183

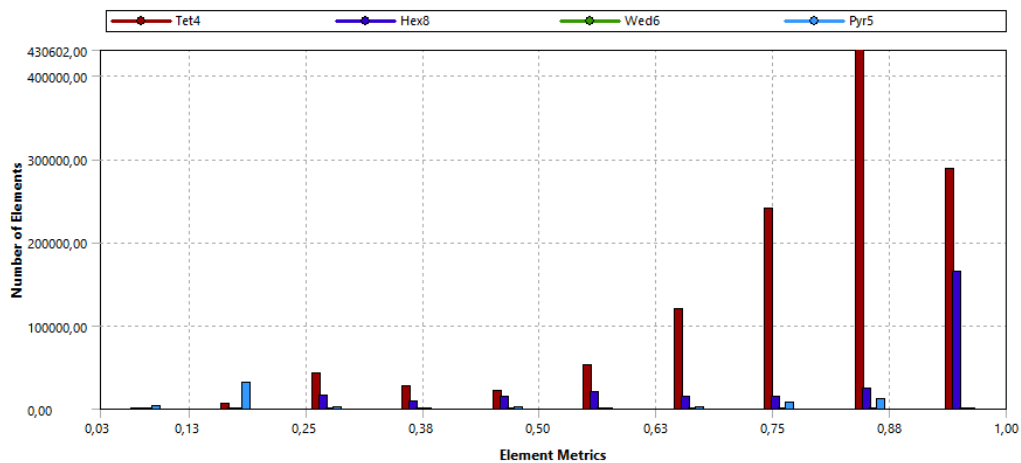
Obr. 28a,b. Zobrazení počtu elementů a následných hodnot kontroly (Min, Max, Average)

a) Orthogonal quality b) Skewness



Obr. 29. Grafické zobrazení Skewness

¹ Kontrola pravouhlosti elementů



Obr. 30. Grafické zobrazení ortogonální kvality (Orthogonal Quality)

Na následujícím obrázku je dále znázorněna tabulka hodnot (tj. škála rozmezí hodnot s daným slovním výstupem hodnocení) pro dvě metody kontroly kvality sítě.

Skewness mesh metrics spectrum					
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00
Orthogonal Quality mesh metrics spectrum					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00
© 2013 ANSYS, Inc.		February 28, 2014		ANSYS Confidential	

Obr. 31. Tabulka hodnocení kvality sítě [18]

Orthogonal Quality

Dle vygenerovaných hodnot kontroly sítě a tabulky hodnot je patrné, že Max hodnota 0,9999 spadá do kategorie „Excellent“, Min hodnota 0,0289 do kategorie „Bad“, nicméně průměrná („Average“) hodnota celé sítě 0,777 patří do kategorie „Very good“.

Skewness

V tomto případě je Min hodnota $3,796e-8$, což spadá do kategorie „Excellent“. Max hodnota 0,999 odpovídá hodnocení „Unacceptable“. Ačkoliv je Max podle srovnávací tabulky nepřijatelné je nutno podotknout, že průměrná hodnota celé sítě 0,334 spadá do kategorie „Very good“, což je nejpodstatnější.

Finální stanovisko zní tak, že síť je připravena k dalšímu kroku numerické simulace. Drobné niance budou brány v potaz jako možná nepřesnost simulace.



4.2.3 Specifikace ploch a objemů

Posledním důležitým krokem tvorby 3D modelu kapaliny je specifikace (pojmenování) ploch a objemů. Posléze jim bude v softwaru *Fluent* přiřazena i určitá funkce (význam). Postup je takový, že je nejdříve vybrán určitý počet ploch nebo objemů, který je následně pojmenován a to takovým způsobem, aby se uživatel dobře orientoval, o kterou množinu se přesně jedná. Přiřazení špatné funkce množině ploch a objemů by bylo zcela fatální pro celou simulaci.

Obecně lze říci, že jsou plochy a objemy rozděleny dle funkce do dvou skupin:

- 1) Stator = nepohybující se vzhledem k ose rotace
- 2) Rotor = pohybující se vzhledem k ose rotace

Pozn.: Vnitřní plochy na rozhraní (Interior) je softwarem Fluent automaticky vygenerováno. Jinými slovy tyto plochy není třeba jakýmkoli způsobem specifikovat. Jsou tím myšleny plochy na rozhraní mezi dvěma částmi celého objemu (fluidu), tzn. rotor - stator.

V celém simulovaném objemu se vyskytuje celkem šest skupin ploch a objemů, které je třeba určitým způsobem pojmenovat:

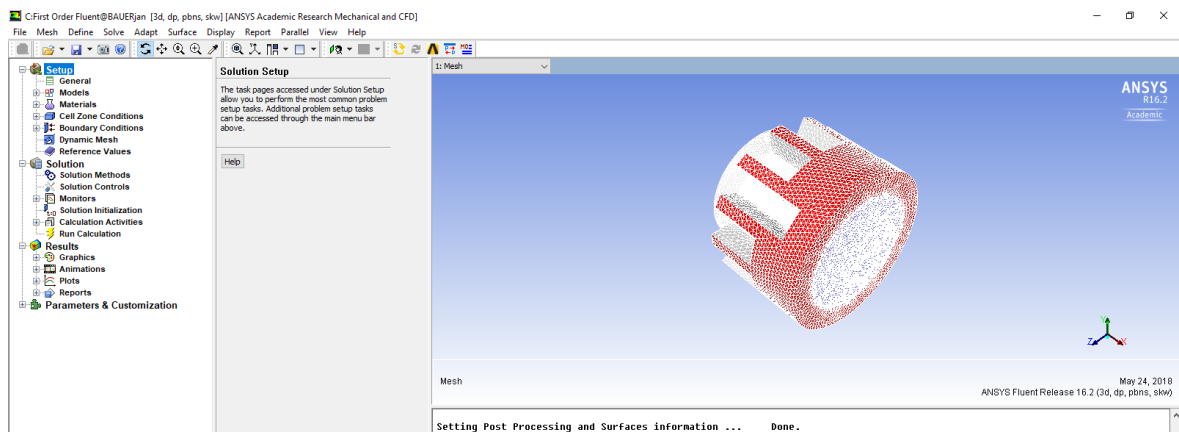
- 1) Plochy výstupu („outlet“)
- 2) Plochy vstupu („inlet“)
- 3) Plochy statorové části („wall_stator“)
- 4) Plochy rotorové části („wall_rotor“)
- 5) Statorové objemy („stator“)
- 6) Rotorové objemy („rotor“)

Pozn.: Podrobný popis specifikace ploch a objemů je uveden v příloze P1.6.

4.3 Postup práce v softwaru FLUENT

V posledním kroku, před zahájením samotné simulace, je zapotřebí i nastavit několik dalších všeobecných podmínek a předpokladů (výpočtový model, gravitace, látka kapaliny, okrajové podmínky, atd.).

Na následujícím obrázku je znázorněno uživatelské prostředí řešitele *Fluent*. Na levé straně prostředí je zobrazen sloupec s lištami, ve kterém uživatel postupně specifikuje všechna potřebná nastavení.



Obr. 32. Zobrazení pracovního prostředí softwaru *Fluent*

Pozn.: Kontrolní bod - pokud je do pracovního prostředí úspěšně nahrán kompletní fluid s vygenerovanou sítí, nejspíše to znamená, že uživatel postupoval v předchozích krocích korektně a může začít nastavovat podmínky simulace.

4.3.1 Specifikace podmínek pro numerickou simulaci

Všechna potřebná specifikace nastavení pro numerickou simulaci jsou totožná pro obě simulované kapaliny (voda, glycerin) a byla provedena podle následujícího postupu:

- 1) Všeobecná nastavení („General“)
- 2) Výpočtový model („Models“)

V obou případech se jedná o proudění viskózní newtonské látky, tudíž je zvolen viskózní model „Viscous model - SST k-omega“.

- 3) Látka kapaliny („Materials“)

Z databáze kapalin je zvolena pracovní kapalina s určitými fyzikálními vlastnostmi. Jedná se o vodu („water-liquid“) a glycerin („glycerin“).



- 4) Podmínky pro objemy („Cell Zone Conditions“)
Pro numerickou simulaci je použita metoda **MRF²** („Moving Reference Frame“), tím pádem musí být objemům přidělena určitá funkce. To v důsledku znamená, že je nutné nastavit, který objem se „hýbe“ (rotace) a který „stojí“.
- 5) Okrajové podmínky („Boundary Conditions“)
Nastavení okrajových podmínek se týká ploch celého objemu, který se skládá z následujícího výpisu:
 - Vstupní plochy („inlet“) - vstupní hmotnostní tok
 - Vnitřní plochy na rozhraní („interior“)
 - Výstupní plochy („outlet“) - metodika výpočtu
 - Stěny rotoru („wall_rotor“) - pohybující se stěny (10 000 rpm)
 - Stěny statoru („wall_stator“) - nepohybující se stěny
- 6) Výpočtové metody („Solution Methods“)
V tomto kroku jsou nastaveny finální specifikace výpočtové metody nebo také řád přesnosti výpočtu.
- 7) Inicializace řešení („Solution Initialization“)
- 8) Spuštění simulace („Run Calculation“)

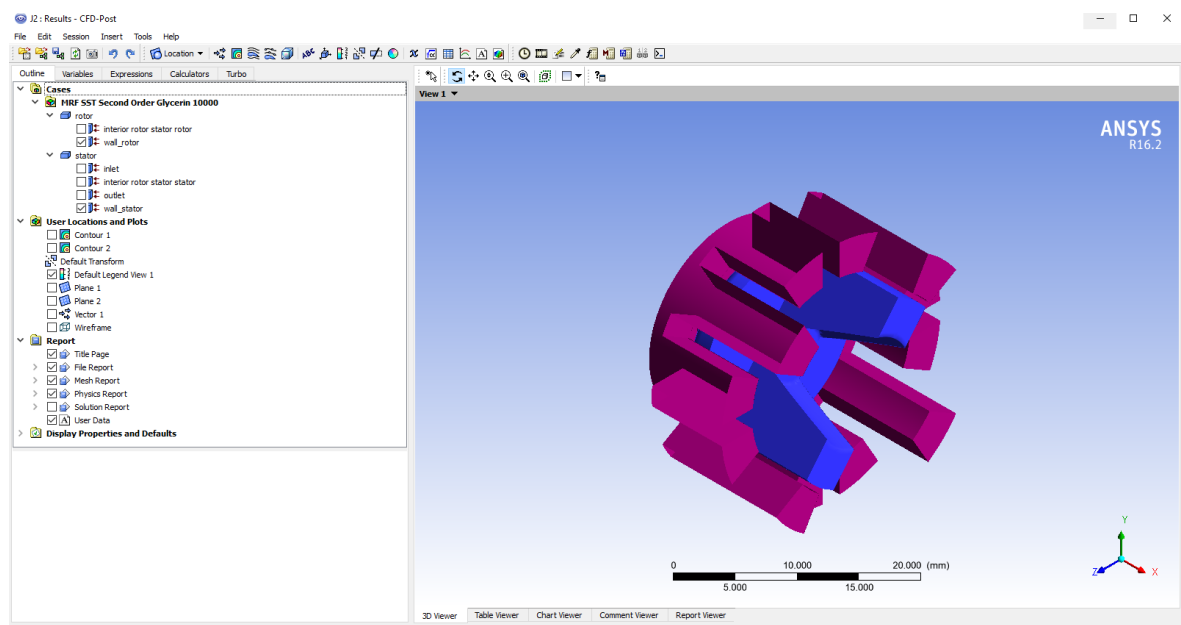
Pozn.: Podrobný popis specifikace podmínek před zahájením numerické simulace je uveden v příloze P1.7.

² Metoda simulující pohyb, která funguje na principu nepohyblivých strojních částí. Ve skutečnosti se pohybují elementy sítě (fluid), kterým jsou přidány místní zrychlení.

4.4 Vyhodnocení výsledků numerické simulace

Se všemi výsledky numerické simulace lze pracovat v posledním kroku pracovního prostředí Workbench (viz obr. 32.) a to pod názvem „Results“. V úvodu numerické části diplomové práce je řečeno, že cílem je určit krouticí moment M_k na rotorové části dispergačního zařízení, ze kterého je následně vypočten příkon zařízení P .

Na následujícím obrázku je zobrazeno uživatelské prostředí pro vyhodnocování výsledků (jedná se o již zmiňovaný postprocessing).



Obr. 33. Uživatelské prostředí pro vyhodnocování výsledků (Results)

4.4.1 Vyhodnocení krouticího momentu

V této kapitole je uveden výčet všech kalkulovaných krouticích momentů M_k (pro první i druhý řád přesnosti numerické simulace), ze kterých je pomocí následující rovnice vypočten příkon zařízení P :

$$P = M_k 2\pi n . \quad (7)$$

Pozn.: Podrobný popis kalkulací krouticích momentů M_k pomocí funkce „Calculators“ je uveden v příloze P1.8.



Název simulace	Popis veličiny	Veličina	Hodnota	Jednotka
MRF SST First Order Water 10000	kroucí moment	M_k	0,0213	N.m
MRF SST Second Order Water 10000			0,0201	
MRF SST First Order Glycerin 10000			0,0614	
MRF SST Second Order Glycerin 10000			0,0460	

Tab. I. Vyhodnocení kroucího momentu M_k z numerických simulací

Pro výpočet příkonu motoru P jsou potřebné veličiny uvedené v následující tabulce.

Popis veličiny	Veličina	Hodnota	Jednotka
otáčky míchadla	n	10000,0	ot/min
		166,7	ot/s
průměr rotoru míchadla typu G	d_{25G}	17,0	mm
hustota kapaliny FLUENT	ρ_{H2OFL}	998,0	kg/m ³
	ρ_{100FL}	1260,0	
dynamická viskozita FLUENT	μ_{H2OFL}	1,0	10 ⁻³ Pa.s
	μ_{100FL}	450,0	

Tab. II. Přehled potřebných veličin pro výpočet příkonu P

V následující tabulce jsou zobrazeny výsledky hodnot příkonu motoru P pro všechny provedené simulace.

Název simulace	Popis veličiny	Veličina	Hodnota	Jednotka
MRF SST First Order Water 10000	příkon	P	22,4	W
MRF SST Second Order Water 10000			21,1	
MRF SST First Order Glycerin 10000			64,3	
MRF SST Second Order Glycerin 10000			48,2	

Tab. III. Vyhodnocení příkonu P z numerických simulací

Podle výše uvedené tabulky je patrné, že za klíčové výsledky vyhodnocení kroucího momentu jsou uvažovány ty ze simulace s druhým řádem přesnosti. Obecně lze říci, že hodnoty výsledků s druhým řádem přesnosti jsou nižší než ty s prvním řádem přesnosti. V případě glycerinu je tato hodnota dokonce o 25% nižší.

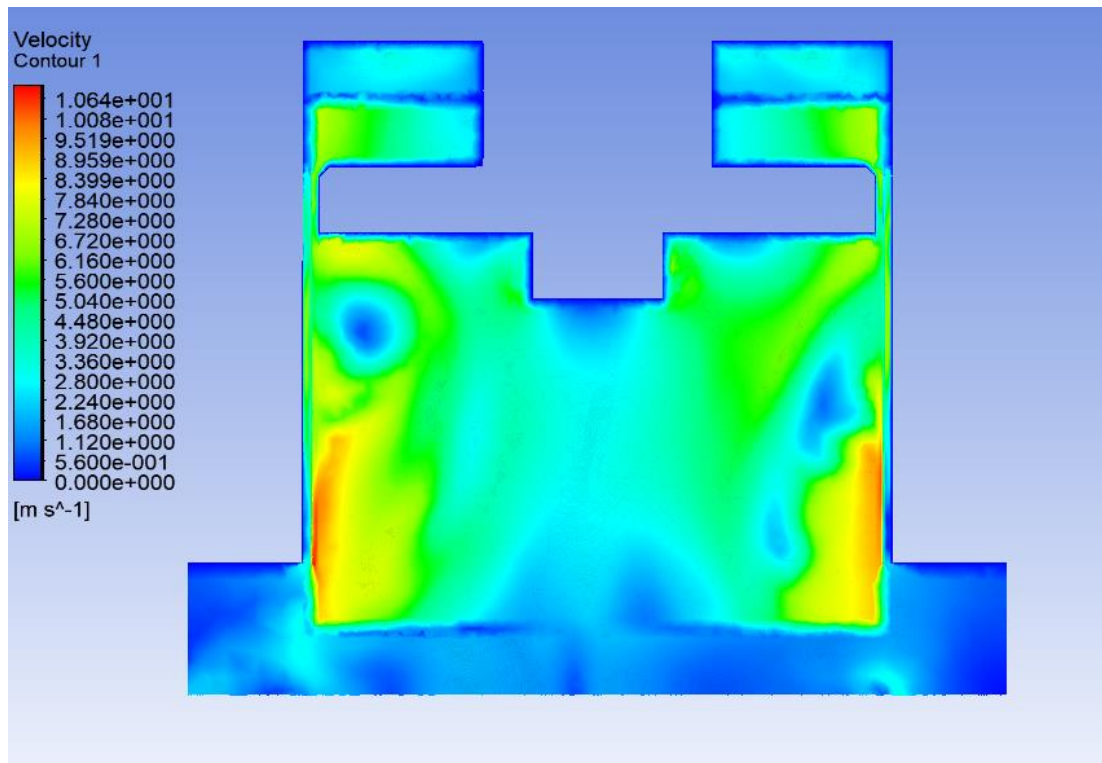
4.4.2 Vizualizace hydrodynamiky proudění

Poslední částí vyhodnocování numerické simulace je vizualizace hydrodynamiky proudění. Na těchto vizualizacích jsou zobrazeny rychlostní kontury a vektorová pole, kde se uživatel dozvídá zcela zásadní informace o rychlostech toků, čili i o změnách rychlostech toků. Tyto informace jsou využity pro určení míst s největším smykovým napětím, ale také směrech toků simulovaných kapalin.

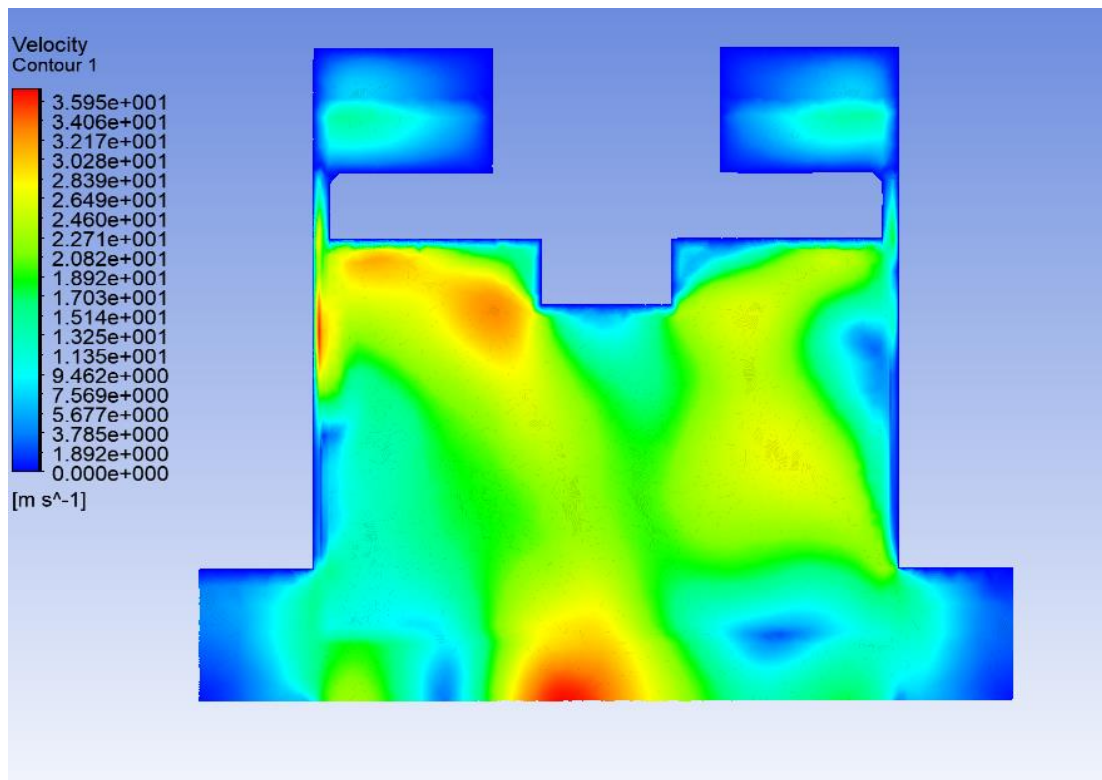
Pozn.: Na následujících stránkách je znázorněno porovnání vizualizací hydrodynamiky proudění vždy pro obě kapaliny, a to nejdříve pro vodu, poté glycerin. Z hlediska pochopení hlavní dispergace, ke které dochází hlavně v oblasti mezikruží mezi statorovou a rotorovou částí, jsou vybrány dva druhy řezu lopatkami (kolmý, příčný). Poté následuje porovnání vektorových polí směrů proudění se čtyřmi pohledy. Z důvodu možnosti porovnání dvojic obrázků na jedné stránce je závěr popisující vizualizace uveden níže pod touto poznámkou.

Vektorová pole směrů proudění obou simulovaných kapalin ukazují, že při pohybu rotoru dochází k axiálnímu nasávání kapaliny do pracovního prostoru dispergátoru a odtud radiálně vychází skrze díry ve statoru. Důležitým poznatkem této části je, že zde nedochází pouze k výstupu kapaliny, ale zároveň i k zpětnému nasávání zpět do pracovního prostoru. To je způsobeno podtlakem, který vytváří vysoké otáčky rotoru míchadla. Tento jev lze zpozorovat především v oblasti za rotujícím míchadlem.

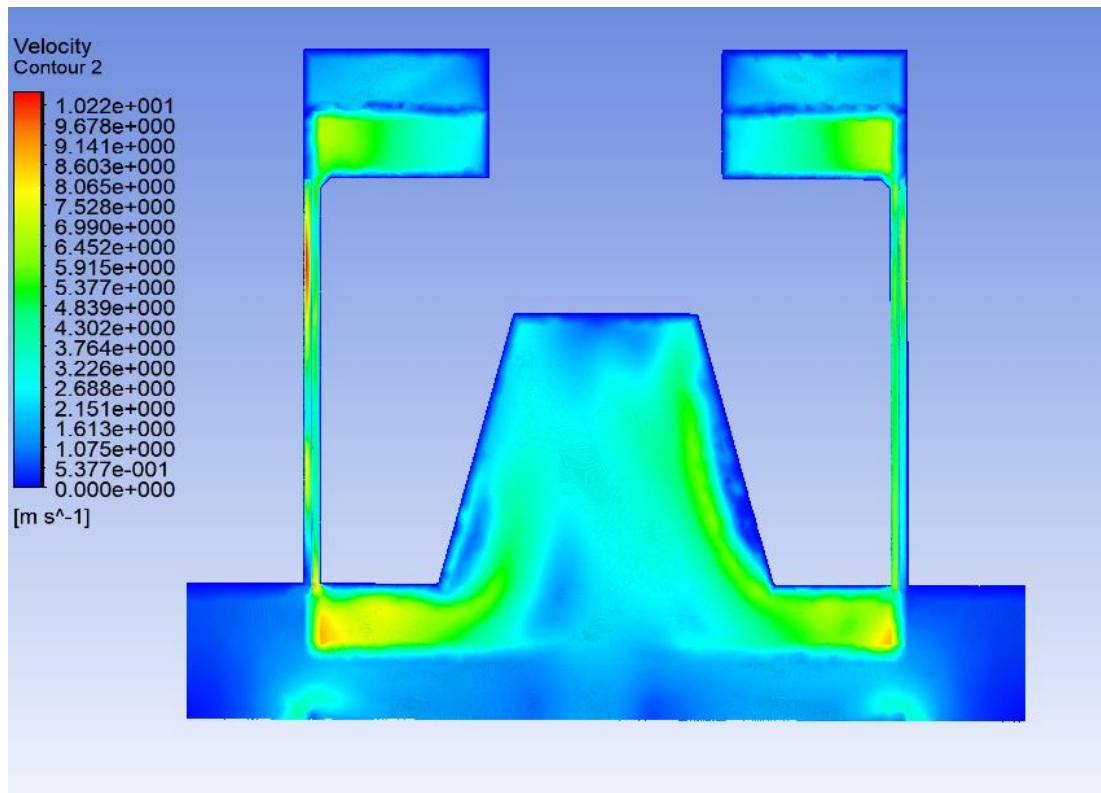
Rychlostní kontury prozrazují oblasti s nejvyššími rychlostmi kapaliny v dispergačním zařízení. Ke špičkám rychlostí dochází v obou případech simulací kapalin na noži rotoru (vnější část rotoru), a proto zde dochází k hlavní dispergaci a také maximální disipaci energie. V této oblasti jsou v případě vody rychlosti kapaliny (10 m/s) zhruba 3,5krát nižší než je tomu u glycerinu (35 m/s). Kapalina vytéká štěrbinami ve statoru a zde jsou pro obě kapaliny maxima gradientu rychlostí, čili v této oblasti jsou i maxima napětí způsobené náhlými změnami rychlostí. Ve fázi, kdy se rotor při rotaci nachází v oblasti statorové díry, dochází k mechanismu dispergace stříhem. V opačném případě, kdy se potkává rotor se statorovou stěnou, dochází ke smyku.



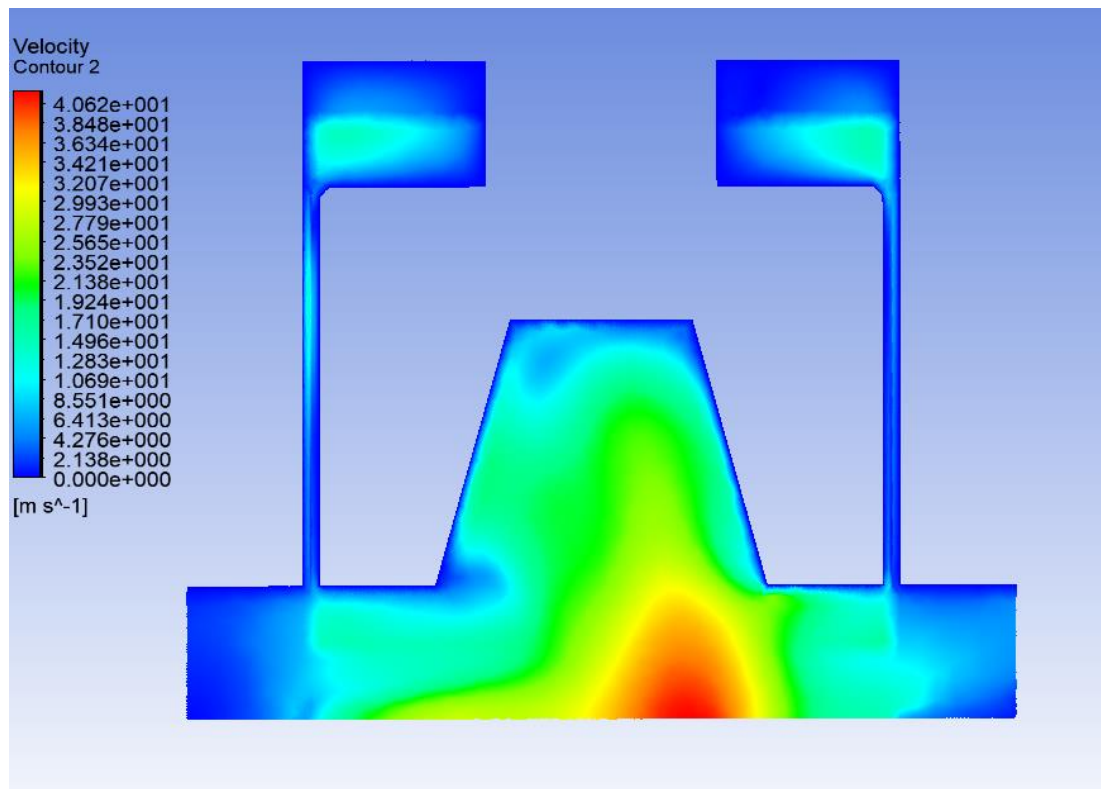
Obr. 34. Kontura (rychlostní profil) kolmého řezu lopatkami rotoru - VODA



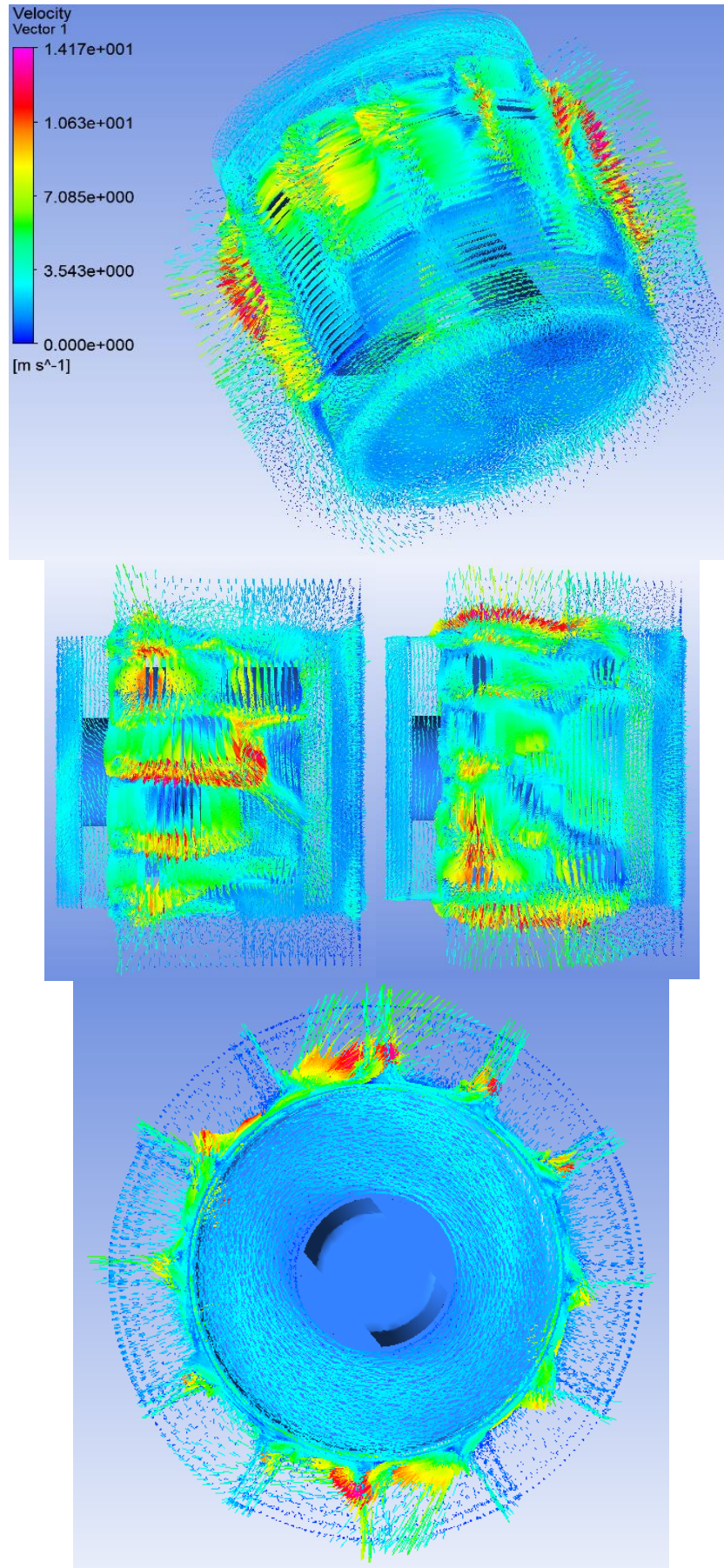
Obr. 35. Kontura (rychlostní profil) kolmého řezu lopatkami rotoru - GLYCERIN



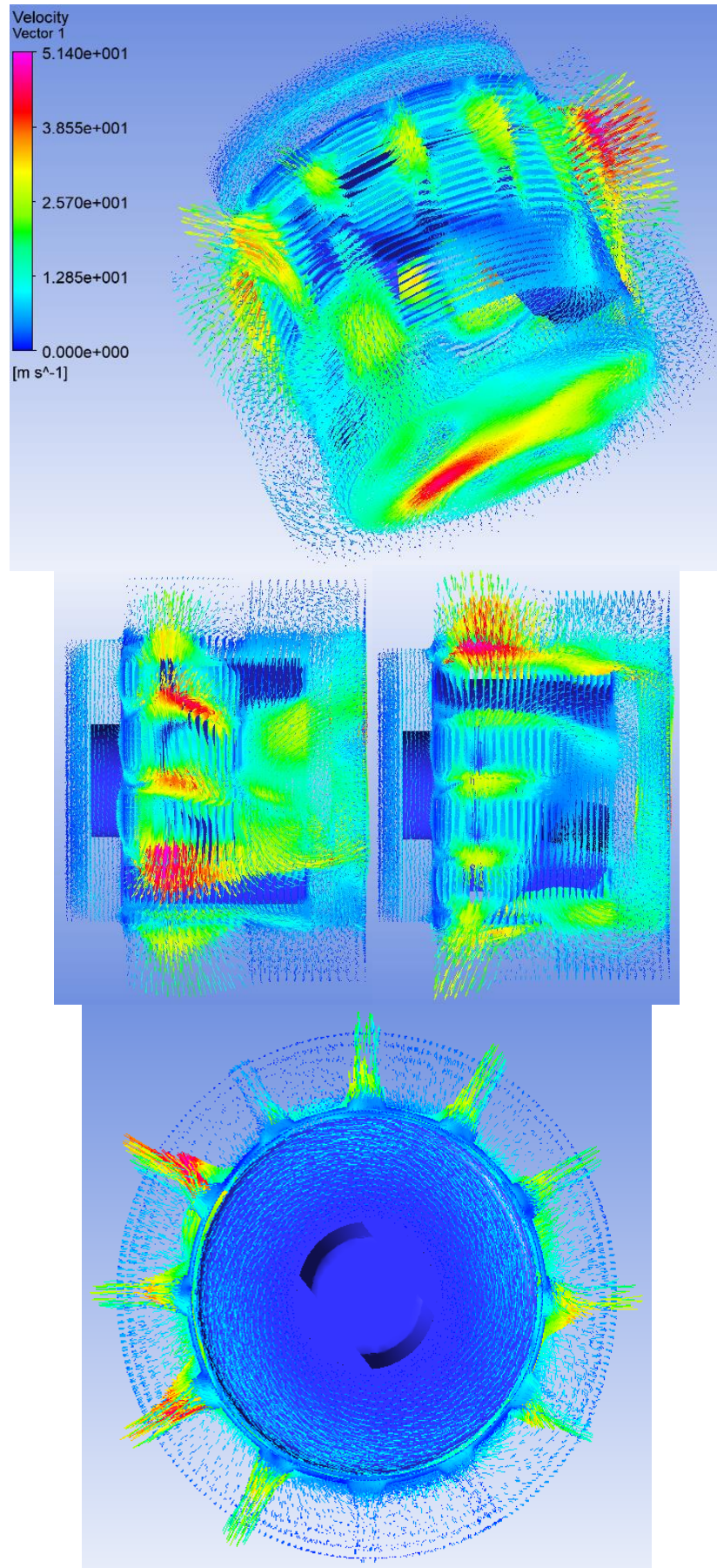
Obr. 36. Kontura (rychlostní profil) přímého řezu lopatkami rotoru - VODA



Obr. 37. Kontura (rychlostní profil) přímého řezu lopatkami rotoru - GLYCERIN



Obr. 38. Vektorové pole směrů proudění - VODA



Obr. 39. Vektorové pole směrů proudění - GLYCERIN

5 Experimentální měření

Účelem experimentální části diplomové práce je provést měření na dvou typech geometricky podobných dispergačních zařízení stator - rotor firmy IKA („S 25 N - 25 G“ a „S 25 N - 25 F“). Cílem tohoto experimentu je, stejně jako v numerické části, zjištění potřebných veličin pro sestavení požadovaných příkonových charakteristik. Zejména tedy příkon zařízení $P [W]$, ze kterého je následně určeno příkonové číslo P_o .

V rámci klíčového experimentu je provedeno měření příkonu kalorimetrickou metodou pro tři pracovní kapaliny (voda, 50% vodný roztok glycerinu, 100% glycerin). Tato metoda je založena na principu disipace energie, čili zvyšování teploty pracovní kapaliny. Příkon motoru P je vypočten podle rovnice (6) (podrobněji popsáno v kapitole 3.4). Pro kompletní vyhodnocení experimentálního měření je zapotřebí znalost dalších veličin. Některé z nich jsou získány z pomocných měření (pyknometr - hustota ρ , rotační viskozimetr - dynamická viskozita μ_{50}, μ_{100}) a pro další veličiny je použit externí zdroj dat (dynamická viskozita μ_{H20} , měrná tepelná kapacita pracovních kapalin c_p).

Všechna experimentální a pomocná měření jsou provedena v laboratořích Ústavu procesní a zpracovatelské techniky. Podrobný postup měření je popsán v následujících kapitolách. V poslední řadě následuje zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Dále také srovnání a diskuse výsledných příkonových charakteristik pro oba typy míchadel.

5.1 Popis geometrie experimentu

V této kapitole jsou popsány geometrie veškerých potřebných pomůcek a zařízení (včetně názvu firmy a modelu zařízení, rozsahů a přesnosti měření, atd.).

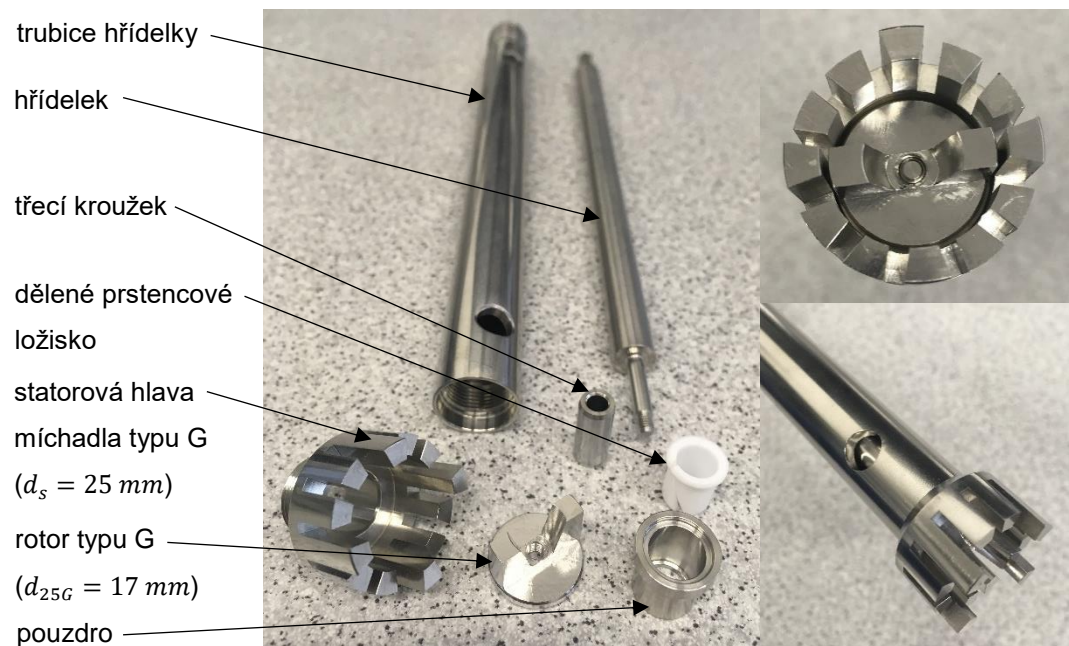
míchadla	„S 25 N - 25 F“	posuvné měřítko
	„S 25 N - 25 G“	pyknometr
dispergační nástavec		kanystr
termostat		plastová lahev
rotační reometr		skleněná kádinka
digitální termometr		plastová kádinka
digitální váha		odlamovací nůž
digitální stopky		izolace

Tab. IV. Výpis zařízení a pomůcek

5.1.1 Míchadla stator - rotor

Oba typy míchadel firmy IKA jsou složeny ze stejných strojních součástí, vyjma statorové hlavy a míchadla, kde probíhá hlavní dispergace. Na konci hřídele je pomocí klasického závitu upevněno míchadlo. Statorová hlava je naopak pomocí opačného závitu napevno spojena s tělem míchadla, nicméně je také pomocí distančního středícího válečku a těsnění spojena s hřídelkou.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny všechny části míchadla.



Obr. 41. Dispergační zařízení stator – rotor firmy IKA „S 25 N – 25 G“



Obr. 40. Dispergační zařízení stator – rotor firmy IKA „S 25 N – 25 F“

5.1.2 Zařízení a potřebné pomůcky

V průběhu hlavního i pomocných měření jsou použity následující zařízení a potřebné pomůcky, kde je v závorce uvedena přesnost nastavování nebo měření:

- dispergační nástavec IKA „T 25 D“ (0.1 ot/min)

stojan
motorek IKA
redukce
otáček
vypínač
spojka
upínací systém
míchadla



Obr. 42. Dispergační nástavec IKA

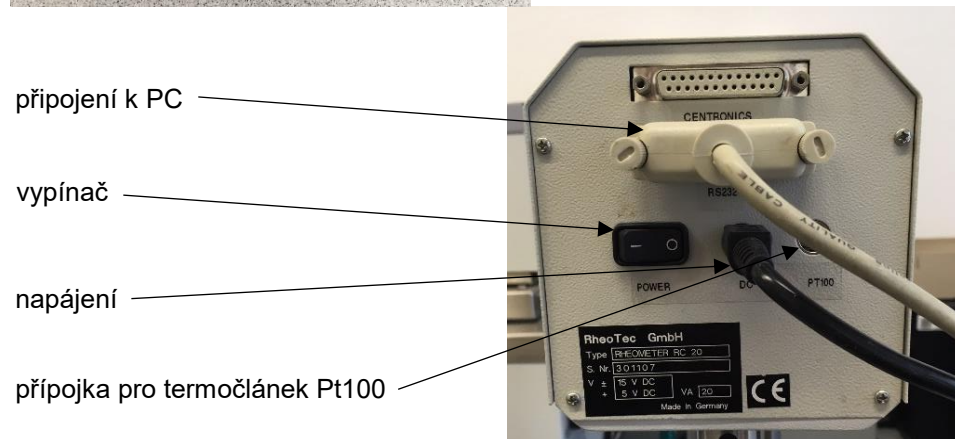
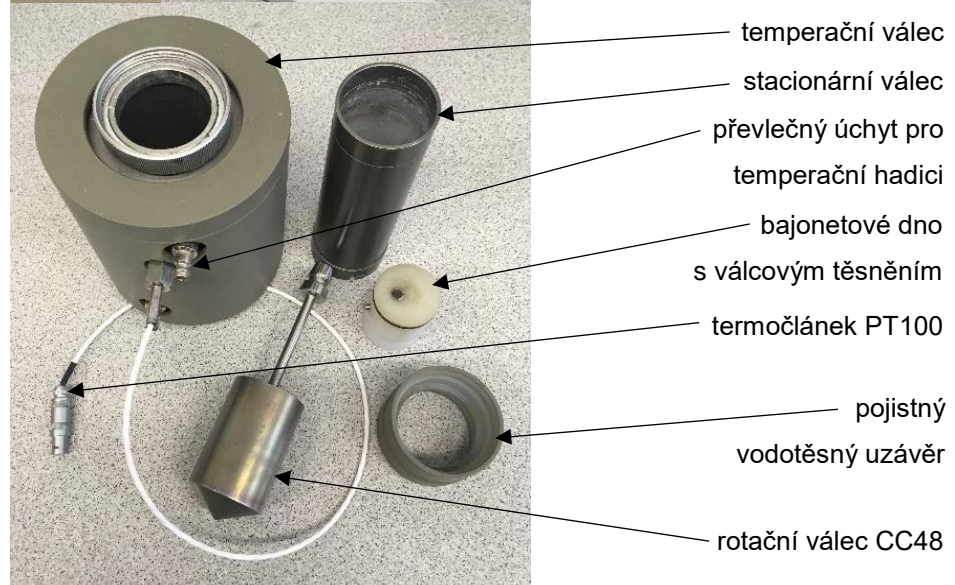
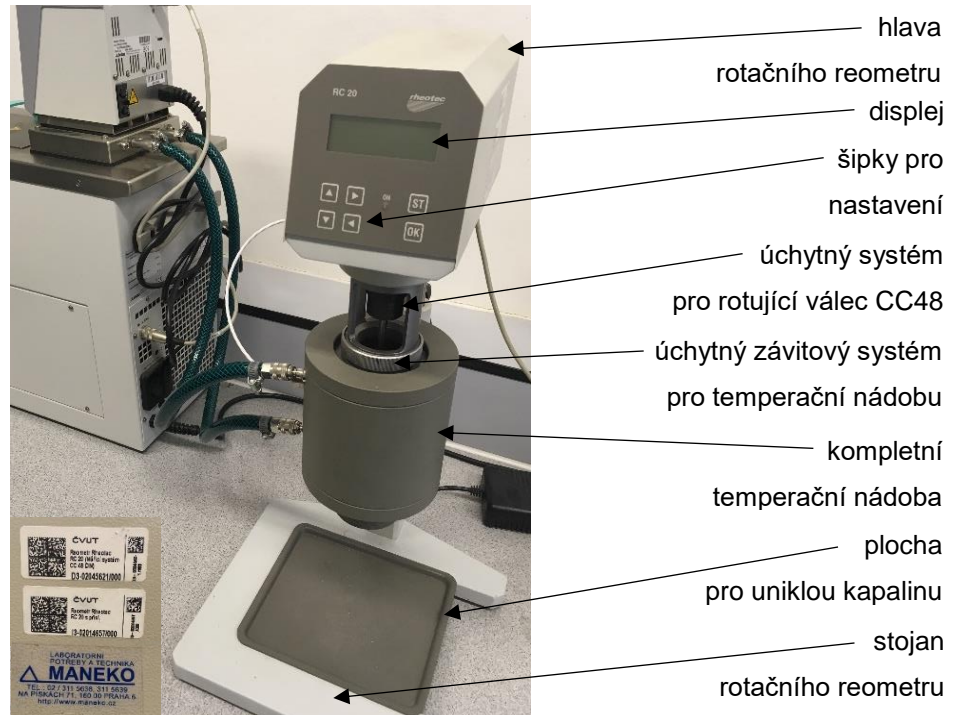
- termostat JULABO „F25-ME“ (0.1 °C)

vypínač
řídící část
termostatu
regulace
teploty
můstek
k termostatu
nerezové
izolační víko
nerezová
lázeň
temperační
hadice
vypínač
topná část
termostatu



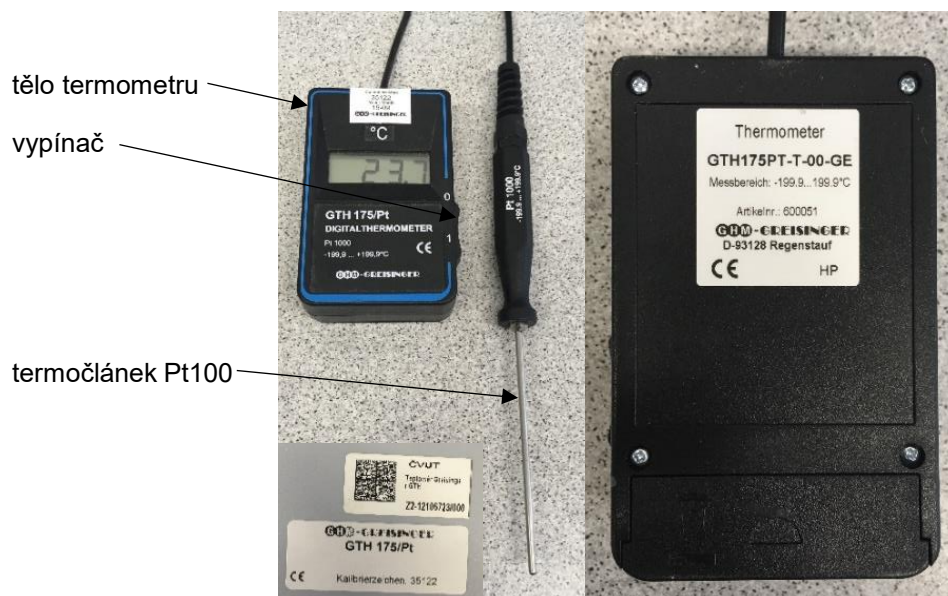
Obr. 43. Termostat JULABO

- rotační reometr RHEOTEC (0.001 Pa.s)



Obr. 44. Rotační reometr RHEOTEC

- digitální termometr GHM - GREISINGER „GTH 175/Pt-T“ (0.1 °C)



Obr. 45. Digitální termometr GHM - GREISINGER

- digitální váha VIBRA „AJ-820CE“ (0.01 g)



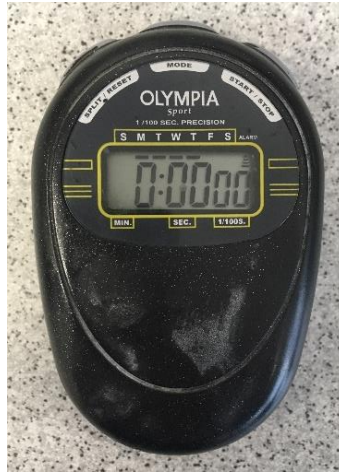
Obr. 46. Digitální váha VIBRA

- digitální váha OHAUS „Scout Pro SP-6001“ (0.1 g)



Obr. 47. Digitální váha OHAUS [24]

- digitální stopky OLYMPIA „Sport“ (0.01 s)



Obr. 48. Digitální stoky OLYMPIA

- posuvné měřítko EXTOL Premium „0-150 mm“ (0.1 mm)



Obr. 49. Posuvné měřítko EXTOL Premium

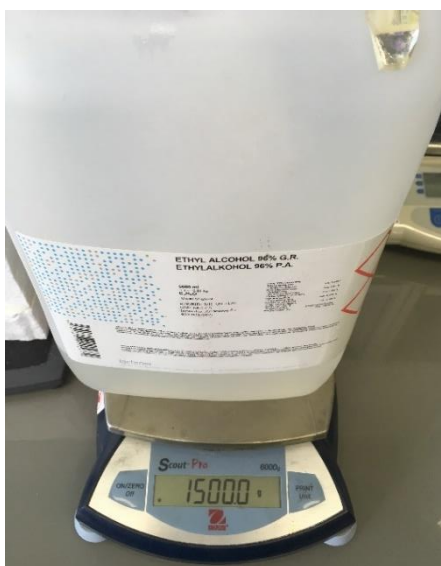
- pyknometr ASSISTANT 50 ml
- kanystr 5000 ml
- plastová lahev 500 ml
- skleněná kádinka SIMAX 400 ml
- plastová kádinka KARTELL 100 ml
- odlamovací nůž
- izolace

5.2 Popis průběhu pomocných měření

5.2.1 Příprava kapalin pro měření

Před experimentálním měřením jsou nejprve připraveny kapaliny do kanystrů (zejména tedy 50% vodný roztok glycerinu) dle následujícího postupu:

- 1) Vážení kanystru s náplní (např. 1500 g glycerinu), viz obrázek



Obr. 50. Vážení pro přípravu 50% vodného roztoku glycerinu

- 2) Dolit stejným množstvím vody do poměru 1:1 (např. 1500 ml voda)
- 3) **DŮLEŽITÉ!** Uzavřít kanystr

Glycerin je hydrofilní, čili pohlcuje vzdušnou vlhkost, a tím se samovolně snižuje koncentrace glycerinu.

5.2.2 Měření hustoty

Další potřebnou veličinou je hustota, která je změřena pyknetrem podle následujícího postupu:

- 1) Vyrovnání digitální váhy pomocí libely
- 2) Vážení prázdného pyknetru
- 3) Naplnění pyknetru kapalinou a změření teploty kapaliny

Změření teploty je v tomto kroku pouze pro ilustrativní představu.

Pro tento experiment je zcela dostačující pokojová teplota kapalin.



- 4) Vážení pyknometru naplněného kapalinou
- 5) Výpočet kontrolní hmotnosti kapaliny

$$m_{kH2O} = m_{PH2O} - m_{PP}, \quad (8)$$

$$m_{k50} = m_{P50} - m_{PP}, \quad (9)$$

$$m_{k100} = m_{P100} - m_{PP}. \quad (10)$$

- 6) Výpočet hustoty

$$\rho_{H2O} = \frac{m_{kH2O}}{V_P}, \quad (11)$$

$$\rho_{50} = \frac{m_{k50}}{V_P}, \quad (12)$$

$$\rho_{100} = \frac{m_{k100}}{V_P}. \quad (13)$$

V následující tabulce jsou znázorněny výsledky měření hustoty.

Popis veličiny		Veličina	Hodnota	Jednotka
hmotnost prázdného pyknometru		m_{PP}	28,45	<i>g</i>
objem pyknometru (známá hodnota)		V_P	50	cm^3
teplota kapaliny	H2O	T_{H2O}	26,40	$^{\circ}C$
	50% vodný roztok glycerinu	T_{50}	28,60	$^{\circ}C$
	100% glycerin	T_{100}	28,80	$^{\circ}C$
hmotnost pyknometru s kapalinou	H2O	m_{PH2O}	78,20	<i>g</i>
	50% vodný roztok glycerinu	m_{P50}	84,39	<i>g</i>
	100% glycerin	m_{P100}	91,01	<i>g</i>
kontrolní hmotnost kapaliny	H2O	m_{kH2O}	49,75	<i>g</i>
	50% vodný roztok glycerinu	m_{k50}	55,94	<i>g</i>
	100% glycerin	m_{k100}	62,56	<i>g</i>
hustota	H2O	ρ_{H2O}	995	kg/cm^3
	50% vodný roztok glycerinu	ρ_{50}	1119	kg/cm^3
	100% glycerin	ρ_{100}	1251	kg/cm^3

Tab. V. Výsledky měření hustoty - Pyknometr

Měřená hustota pracovních kapalin vyšla přibližně jako tabulkové hodnoty, čili jsou výsledky měření hustoty považovány za korektní.



5.2.3 Měření dynamické viskozity

V poslední řadě je provedeno pomocné měření na rotačním viskozimetru. Měření dynamické viskozity proběhlo v soustavě dvou souosých válců geometrie typu „CC48“ při použití temperační nádoby. Výsledkem je potom závislost dynamické viskozity na teplotě $\mu = f(T)$.

Pozn.: Měření je vykonáno pouze pro glycerin a 50% vodný roztok glycerinu. Smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ pro měření byly určeny tak, aby hodnota krouticího momentu M_k byla dostatečně velká z hlediska přesnosti měření rotačního viskozimetru. Příklad musí být zatěžován nejlépe ve středu rozsahu (0-1000 ‰), ve kterém by se voda nevyskytovala. Pro získání závislosti $\mu = f(T)$ u vody je použit webový portál termo-fyzikálních vlastností kapalin.

Pozn.: Podrobný popis postupu měření dynamické viskozity μ je uveden v příloze P2.1.

Postup měření dynamické viskozity je následující:

- 1) Příprava měřicí soustavy
- 2) Nalítí měřené kapaliny
- 3) Zajištění rotačního válce
- 4) Dokončení měřicí soustavy (rotační viskozimetr - termostat)
- 5) Zapnutí přístrojů (2x termostat, 1x rotační viskozimetr)
- 6) Nastavení teploty na termostatu

Na termostatu je nastavena potřebná teplota, na kterou se bude ohřívat/chladit měřená kapalina. Měření probíhá v rozmezí teplot od 20 do 80 °C vždy po 10 °C.

- 7) Nastavení rotačního viskozimetru
- 8) Zahájení měření

Vše je připraveno a tlačítkem „OK“ je zahájeno měření. Po uplynutí 30 sekund přístroj udává hodnotu dynamické viskozity μ_1 pro jednu smykovou rychlost D_1 (dále značeno $\dot{\gamma}_1$). Měření se opakuje od kroku 7) nyní pro smykovou rychlost $\dot{\gamma}_2$, kde je získána dynamická viskozita μ_2 .

9) Výpočet průměrné hodnoty dynamické viskozity pro jednu teplotu

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

(14)

Hodnoty měření jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

100% GLYCERIN			
teplota T [°C]	dynamická viskozita		
	μ_1 [mPa.s]	μ_2 [mPa.s]	$\bar{\mu}$ [mPa.s]
20	1105,0	1102,0	1103,5
30	508,8	495,6	502,2
40	248,1	244,9	246,5
50	133,6	133,1	133,3
60	77,8	77,3	77,6
70	48,3	47,8	48,1
80	31,3	31,3	31,3

50	100
$\dot{\gamma}$ [1/s]	
smyková rychlost	

Tab. VI. Dynamická viskozita
GLYCERIN

50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU			
teplota T [°C]	dynamická viskozita		
	μ_1 [mPa.s]	μ_2 [mPa.s]	$\bar{\mu}$ [mPa.s]
20	6,2	6,3	6,3
30	4,7	4,7	4,7
40	3,9	4,5	4,2
50	3,8	4,2	4,0
60	3,6	3,9	3,7
70	3,4	3,6	3,5
80	3,2	3,6	3,4

3500	4000
$\dot{\gamma}$ [1/s]	
smyková rychlost	

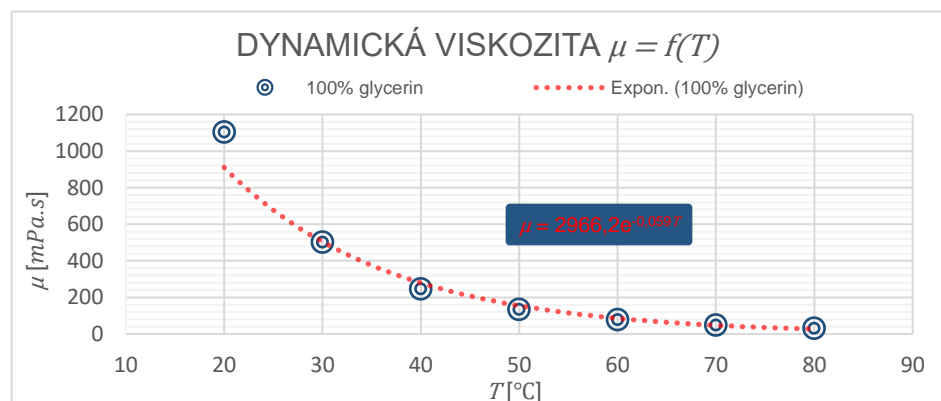
Tab. VII. Dynamická viskozita
50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU

Podle výše uvedených tabulek je patrné, že dynamická viskozita μ je teplotou T značně ovlivňována. Tuto závislost je nutno vyhodnotit a je možné využít různé korelační metody. Běžně je využívána exponenciální závislost ve tvaru:

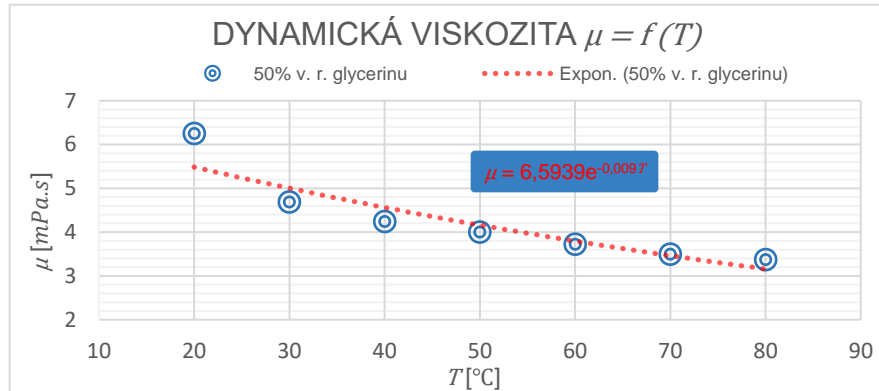
$$\mu = Ae^{BT}$$

(15)

kde jsou koeficienty A a B jsou stanoveny regresí pomocí *Excelu*. Výsledná korelační rovnice je uvedena v následujících grafech.



Graf I. Závislost dynamické viskozity na teplotě - GLYCERIN



Graf II. Závislost dynamické viskozity na teplotě - 50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU

5.3 Externí zdroj dat

Pomocí webového portálu termo-fyzikálních vlastností kapalin „<https://webbook.nist.gov/chemistry/>“ a skripta „Chemické inženýrstvo tabulky a grafy (2000)“ jsou získána externí data, která jsou potřeba pro kompletní vyhodnocení celého experimentu.

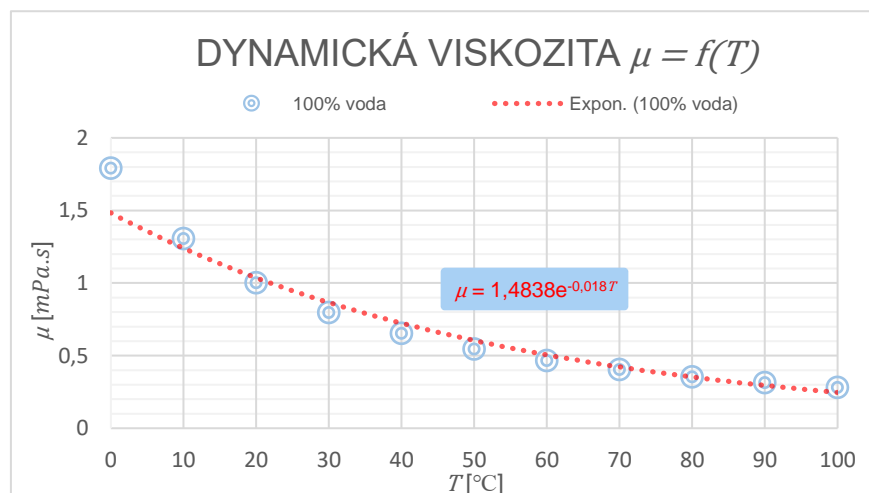
5.3.1 Dynamická viskozita vody

Podle výše uvedeného webového portálu [16] je získána závislost dynamické viskozity μ na teplotě T . Tyto body jsou následně korelovány pomocí exponenciální rovnice (15). Metoda vyhodnocení je tedy totožná jako v pomocném experimentálním měření dynamické viskozity v kapitole 5.2.3.

V následující tabulce jsou uvedena externí data, která jsou vyhodnocena ve vedlejším grafu.

VODA	
teplota	dynamická viskozita
T [°C]	μ [mPa.s]
0	1,79
10	1,31
20	1,0
30	0,80
40	0,65
50	0,55
60	0,47
70	0,40
80	0,35
90	0,31
100	0,28

Tab. VIII. Dynamická viskozita VODA [16]



Graf III. Závislost dynamické viskozity na teplotě - VODA

5.3.2 Měrná tepelná kapacita měřených kapalin

Podle výše uvedeného webového portálu [16] a skript [22] je získána závislost měrné tepelné kapacity c_p na teplotě T pro jednotlivé pracovní kapaliny.

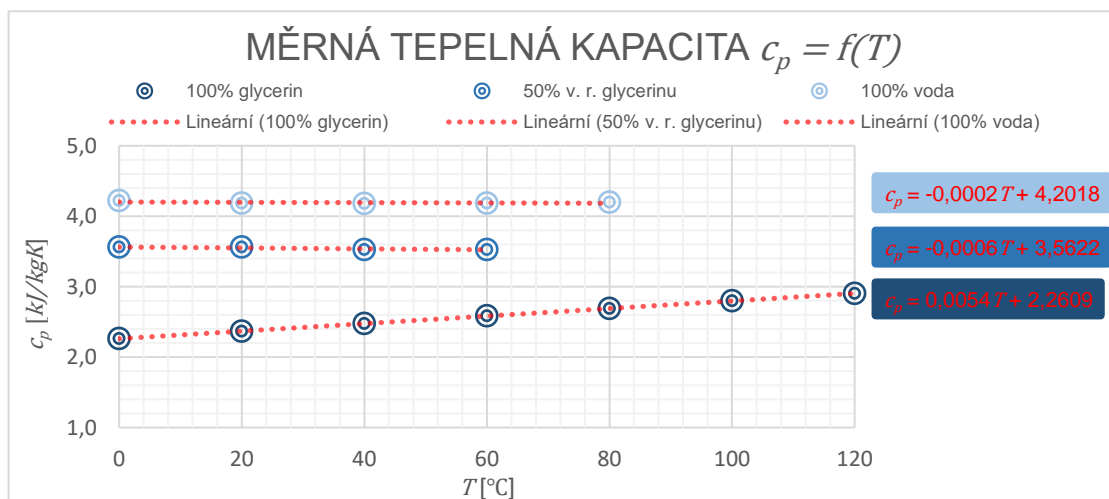
V následující tabulce jsou uvedena externí data.

kapalina \ teplota T [°C]	0	20	40	60	80	100	120
VODA	4,22	4,18	4,18	4,19	4,20	-	-
50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU	3,56	3,56	3,53	3,53	-	-	-
100% GLYCERIN	2,26	2,37	2,48	2,58	2,69	2,80	2,90

Tab. IX. Měrná tepelná kapacita měřených kapalin [16] [22]

Podle dat zobrazených ve výše uvedené tabulce je následně provedena korelace pro jednotlivé pracovní kapaliny. Pro uvedený rozsah hodnot teplot bude v tomto případě postačující prostá lineární regrese.

Výsledné korelační rovnice jsou opět uvedeny v následujícím grafu.



Graf IV. Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě

5.4 Popis průběhu experimentu

V klíčové části experimentálního měření (měření dispergace) je provedena tzv. nepřímá metoda měření příkonu, která je uskutečněna pro oba typy míchadel stator - rotor firmy IKA („S 25 N - 25 F“ a „S 25 N - 25 G“). Jak je již uvedeno v rešerši a úvodu experimentální části diplomové práce, jedná se o kalorimetrickou metodu měření příkonu, kde pro výpočet příkonu zařízení P je použita rovnice (6). Princip měření (disipace mechanické energie v teplo) je založen na rozdílu teplot ΔT před a po určité době míchání t , tím pádem se tedy postupně zvyšuje celková teplota vsádky. Před začátkem prvního míchání se teplota vsádky pohybuje kolem teploty okolního vzduchu $\approx 22\text{ °C}$ a dále roste do určité maximální teploty $\approx 52\text{ °C}$.

Na následujícím obrázku je zobrazena měřicí soustava, na které je provedeno experimentální měření kalorimetrickou metodou.



Obr. 51. Měřicí soustava experimentálního měření kalorimetrickou metodou

Pro úspěšné měření je dodržován následující postup s určitými předpoklady, které je pro korektnost nutno dodržovat:

Pozn.: Celý postup měření je shodný pro všechny tři pracovní kapaliny.

1) Vážení plastové lahve

Nejprve je zvážena hmotnost prázdné nádoby (m_{Npr}). Dále hmotnost plné nádoby (m_{NplH_2O} , m_{Npl50} , m_{Npl100}), viz následující obrázek.



Obr. 52. Vážení plastové lahve

Následně je vypočten rozdíl těchto hmotností a tím je zjištěna hmotnost naplnění nádoby (m_{H_2O} , m_{50} , m_{100}).

Hmotnosti jsou značeny vždy pro každou kapalinu zvlášť a zváženy digitální váhou „AJ-820E“, která je vyrovnána pomocí libely.

$$m_{H_2O} = m_{NplH_2O} - m_{Npr} , \quad (16)$$

$$m_{50} = m_{Npl50} - m_{Npr} , \quad (17)$$

$$m_{100} = m_{Npl100} - m_{Npr} . \quad (18)$$

2) Nasazení dispergačního míchadla do dispergačního nástavce

Podle následujícího obrázku je míchadlo nasazeno do upínacího systému na motorku.

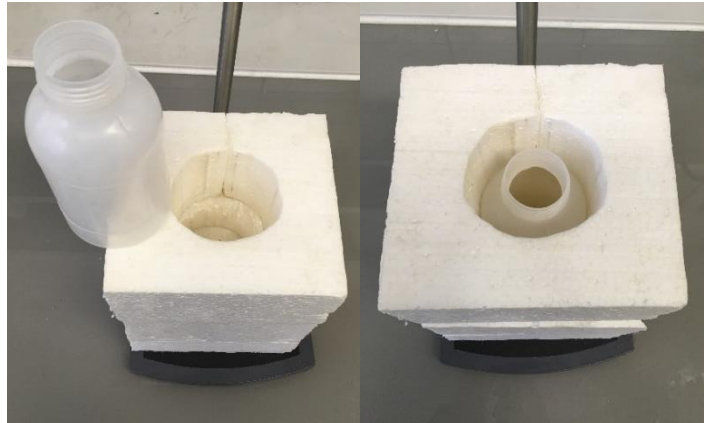


Obr. 53. Upínací systém míchadla se spojkou

Nejdříve je povolena spojka a vsunuto dispergační míchadlo (nadoraz). Následně je spojka dotažena a míchadlo je tímto připraveno k měření.

3) Vložení naplněné plastové lahve do polystyrenu

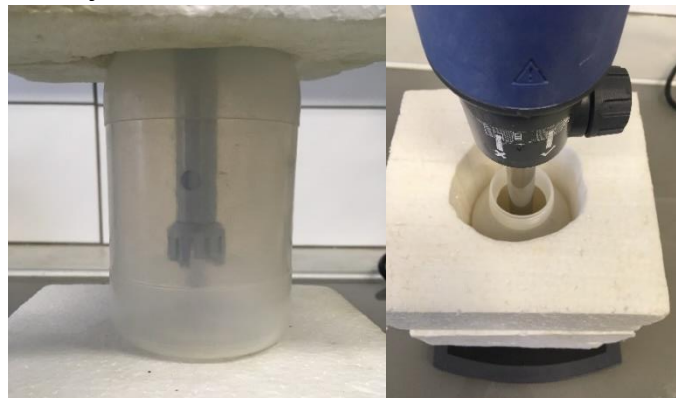
Po vložení lahve do polystyrenu vzniká tzv. izolovaný systém, který minimalizuje možný únik tepla do okolí. Aby byla izolace co možná nejefektivnější, je lahev vložena poměrně natěsno. Určité malé množství tepla uniká z izolovaného systému vrchem, nicméně to je zcela nezbytná ztráta pro samotnou realizaci experimentu. Tato ztráta tepla je uvažována jako určitá nepřesnost měření.



Obr. 54. Izolovaný systém experimentu

4) Vložení dispergačního míchadla do naplněné nádoby

Pomocí utahovacího závitu na stojanu motorku je vnořeno dispergační míchadlo do naplněné plastové nádoby. Je velmi důležité, aby se dispergační hlava (pracovní prostor) vyskytovala v dostatečné vzdálenosti od stěn, jinak by docházelo ke škrčení průtoku dispergátorem, což by paralyzovalo celý proces dispergace. To v důsledku znamená výskyt dispergační hlavy od dna nádoby v rozmezí od $\frac{1}{3}$ do $\frac{1}{2}$ délky nádoby. Dalším předpokladem úspěšného měření je vycentrování os míchadla a plastové lahve, viz následující obrázek.



Obr. 55. Vložení a vycentrování míchadla

5) Měření teploty kapaliny před mícháním

Teplota je měřena kalibrovaným termometrem. Špička termočlánku Pt100 je vsunuta do otvoru plastové lahve, vnořena do měřené kapaliny a co nejvíce přiblížena ke statorové hlavě (pracovní oblast míchadla). Následuje odečtení teploty na displeji digitálního termometru. Je velmi důležité, aby se špička termočlánku nedotýkala míchadla a nejlépe ani plastové lahve, jelikož všechny externí styky s termočlánkem mohou výrazně ovlivňovat odečtení teploty.



Obr. 56. Měření teploty kapaliny kalibrovaným termometrem

6) Nastavení otáček míchání

Na motorku je možnost nastavení otáček až do 25 000.0 *ot/min*. V průběhu experimentu je pro každou kapalinu vždy zvolena trojice otáček (Min, Max, polovina rozmezí Min-Max), které jsou po dobu míchání udržovány. Určení správného rozmezí otáček Min-Max je zcela zásadní a jakékoliv překročení tohoto rozmezí má pro vyhodnocení experimentu fatální následky.

Min hodnota je volena tak, aby se kapalina „hýbala“ a tvořila středový vír. To je nutná podmínka, nikoliv však postačující. Dále je také uvažována doba míchání t (6-7 *min*), po kterou se bude vsádka míchat, aby došlo k měřitelnému ohřátí ΔT (ideálně 2 °C a více).

Max hodnota otáček je pro změnu volena tak, aby nedošlo k aeraci měřené kapaliny středovým vírem. Tím by došlo ke změně tokových vlastností disperze (hustota ρ , dynamická viskozita μ), což by způsobilo další zkreslení výsledků experimentu. Dále je zapotřebí, aby kapalina udržela středový vír a „necákala“ ven z plastové lahve.

Pozn.: Otáčky jsou voleny podle citu a jejich postupnou redukcí je odhadnuto správné rozmezí hodnot Min-Max. Každá měřená kapalina disponuje při dispergaci rozdílnými tokovými vlastnostmi, tudíž se liší i cílové rozmezí hodnot.

kapalina	otáčky míchadla n [ot/min]		
VODA	5600	7600	10000
50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU	7000	9000	10600
100% GLYCERIN	7000	10000	15000

Tab. X. Hodnoty otáček dispergačních míchadel

Na následujícím obrázku je znázorněna redukce otáček, kde je zvoleno nejdříve Min pro glycerin a polovina rozmezí Min-Max pro glycerin.



Obr. 57. Redukce otáček pro glycerin

7) Měření teploty po určité době míchání

Pro jednu naplněnou plastovou lahev a **jedny zvolené otáčky** je měření provedeno třikrát. To v důsledku znamená, že je odečteno celkem šest hodnot teplot (resp. 3x před mícháním a 3x po určité době míchání, tj. 3x ΔT). Odečítání teploty respektuje pravidla uvedená v bodě 5).

Pozn.: Důležitými aspekty je příliš dlouhá doba míchání a stále rostoucí teplota vsádky, čímž se zvyšují ztráty tepla do okolí. To je velmi nežádoucí efekt, který zkresluje výsledky měření experimentu. Aby se minimalizovaly ztráty tepla odparem z hladiny a hladinou, je zvolena plastová lahev s úzkým hrdlem. Tím je minimalizován průřez pro tepelné ztráty. Při nejvyšších teplotách pracovní kapaliny, tedy předpoklad pro nejvyšší ztráty (Max otáčky u glycerinu), jsou z disipované energie tepelné ztráty do okolí maximálně 3-4%.

5.5 Naměřená data

V této kapitole je rozebrán kompletní postup práce s naměřenými daty pro dispergační míchadlo firmy IKA „S 25 N - 25 G“. Pro jednu rychlost otáčení míchadla n jsou provedeny tři měření se stejnou vsádkou (v tomto případě se jedná o vodu), kde výstupní hodnotou je příkon zařízení P .

V následující tabulce jsou uvedena zpracovaná naměřená data pro jednu vsádku.

Popis veličiny	Veličina	Hodnota	Jednotka	Hodnota	Jednotka	Hodnota	Jednotka
		1. měření		2. měření		3. měření	
otáčky míchadla	n	10000	<i>ot/min</i>	10000	<i>ot/min</i>	10000	<i>ot/min</i>
		166,7	<i>ot/s</i>	166,7	<i>ot/s</i>	166,7	<i>ot/s</i>
doba míchání	t	300	<i>s</i>	300	<i>s</i>	300	<i>s</i>
teplota tek. před mícháním	T_1	22,3	°C	25,7	°C	29,0	°C
teplota tek. po určité době t	T_2	25,8	°C	29,1	°C	32,3	°C
rozdíl teplot	ΔT	3,5	°C	3,4	°C	3,3	°C
dynamická viskozita v T_1	$\mu_{H_2O T_1}$	0,99	$10^{-3} Pa \cdot s$	0,93	$10^{-3} Pa \cdot s$	0,88	$10^{-3} Pa \cdot s$
dynamická viskozita v T_2	$\mu_{H_2O T_2}$	0,93	$10^{-3} Pa \cdot s$	0,88	$10^{-3} Pa \cdot s$	0,83	$10^{-3} Pa \cdot s$
průměrná dyn. viskozita	$\bar{\mu}_{H_2O}$	0,96	$10^{-3} Pa \cdot s$	0,91	$10^{-3} Pa \cdot s$	0,85	$10^{-3} Pa \cdot s$
střední teplota kapaliny	$T_{stř}$	24,1	°C	27,4	°C	30,7	°C
měrná tep. kapacita tek.	c_{pH_2O}	4,20	<i>kJ/kg.K</i>	4,20	<i>kJ/kg.K</i>	4,20	<i>kJ/kg.K</i>
příkon zařízení	P	24,5	<i>W</i>	23,8	<i>W</i>	23,1	<i>W</i>
hmotnost prázdné nádoby	m_{Npr}	43,20	<i>g</i>				
hmotnost plné nádoby	m_{NplH_2O}	542,70	<i>g</i>				
hmotnost naplnění nádoby	m_{H_2O}	499,50	<i>g</i>				
		0,5	<i>kg</i>				

Tab. XI. Naměřená data pro jednu vsádku dispergačního míchadla IKA „S 25 N - 25 G“

Zpracování naměřených dat bylo provedeno podle následujících rovnic:

$$\Delta T = T_2 - T_1, \quad (19)$$

$$\mu_{H_2O T_1} = 1,4833e^{-0,018T_1}, \quad (20)$$

$$\mu_{H_2O T_2} = 1,4833e^{-0,018T_2}, \quad (21)$$

$$\bar{\mu}_{H_2O} = \frac{\mu_{H_2O T_1} + \mu_{H_2O T_2}}{2}, \quad (22)$$

$$T_{stř} = \frac{T_1 + T_2}{2}, \quad (23)$$



$$c_{pH_2O} = -0,0002T_{stř} + 4,2018, \quad (24)$$

$$P = \frac{m_{H_2O} c_{pH_2O} \Delta T}{t}. \quad (25)$$

V následující tabulce jsou uvedena všechna zpracovaná naměřená data pro oba typy dispergačních míchadel.

typ míchadla	IKA „S 25 N - 25 G“								
kapalina	VODA			50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU			100% GLYCERIN		
Veličina	Hodnota								
n [ot/min]	5600			7000			7000		
P [W]	6,8	6,1	5,5	11,4	7,7	7,4	43,0	29,5	27,6
n [ot/min]	7600			9000			10000		
P [W]	10,1	10,7	10,7	18,2	14,7	14,9	95,1	70,9	61,2
n [ot/min]	10000			10600			15000		
P [W]	24,5	23,8	23,1	23,6	20,3	20,5	211,2	168,3	145,9
typ míchadla	IKA „S 25 N - 25 F“								
kapalina	VODA			50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU			100% GLYCERIN		
Veličina	Hodnota								
n [ot/min]	5600			7000			7200		
P [W]	10,9	8,2	7,5	12,3	9,9	10,5	48,8	53,7	31,8
n [ot/min]	7600			9000			10000		
P [W]	17,6	16,9	17,6	20,5	16,0	15,8	108,2	93,3	63,8
n [ot/min]	10000			10600			15000		
P [W]	36,3	34,8	34,1	21,6	18,3	17,5	221,6	175,8	106,5

Tab. XII. Souhrn zpracovaných naměřených dat pro oba typy dispergačních míchadel

Pozn.: Červeně označená data nebyla využita ve finálním vyhodnocení příkonové charakteristiky z dále uvedených důvodů. V případě Min otáček u vody bylo nedostatečné ohřátí vsádky ΔT a v případě Max otáček u 50% vodného roztoku glycerinu docházelo k aeraci.



5.6 Příkonová charakteristika

5.6.1 Teoretický rozbor - inspekční analýza

V této kapitole je rozebrána teorie příkonu rotačních míchadel, která je čerpána z literatury [20] a [21]. Tato teorie popisuje dvě základní oblasti příkonové charakteristiky. Jedná se zejména o oblast plouživého proudění (převládají vazké síly) a oblast turbulentního proudění (převládají setrvačné síly). Hlavním východiskem teoretického rozboru příkonu rotačních míchadel při míchání newtonských kapalin je získání typického průběhu příkonové charakteristiky.

Proudění newtonských kapalin

Pro většinu rotačních míchadel není zpravidla zcela možné analytické řešení rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice v důsledku složitosti sledovaného systému. Řešení těchto dvou rovnic je provedeno pomocí tzv. „inspekční analýzy“ (teorie podobnosti na základě zavedení bezrozměrných proměnných).

Rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 . \tag{26}$$

Navier-Stokesova rovnice při zanedbání gravitačních sil:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} . \tag{27}$$

Bezrozměrné proměnné:

$$\vec{u}^* = \frac{\vec{u}}{nd} \tag{28}$$

$$\nabla^* = d\nabla \tag{29}$$

$$t^* = nt \tag{30}$$

$$p^* = \frac{p}{\rho n^2 d^2} \tag{31}$$



$$p^+ = \frac{p}{\mu n}. \quad (32)$$

Z inspekční analýzy rovnic (26) a (27) vyplývá, že bezrozměrná rychlost i tlak jsou funkcí bezrozměrné polohy a Reynoldsova kritéria (časová závislost má v ustáleném proudění periodický charakter, tudíž je zanedbána a nahrazena časově středními hodnotami):

$$\vec{u}^* = f_1(\vec{x}^*, Re), \quad (33)$$

$$\tilde{p}^* = f_2(\vec{x}^*, Re). \quad (34)$$

Příkon rotačního míchadla

Při známém rozložení rychlosti by bylo možné příkon míchadla určit z rovnice:

$$P = \int_{S_p} \vec{u} \cdot d\vec{F} = \int_{S_p} \vec{u} \cdot \vec{\sigma} \cdot \vec{n} dS. \quad (35)$$

Síla $d\vec{F}$ je vyjádřena jako součin tenzoru celkových napětí $\vec{\sigma}$ (newtonské nestlačitelné kapaliny) a orientované elementární plošky dS :

$$\vec{\sigma} = -p\vec{\delta} + 2\mu\vec{\Delta}, \quad (36)$$

kde $\vec{\delta}$ je jednotkový tenzor a $\vec{\Delta}$ tenzor rychlosti deformace:

$$\vec{\Delta} = \frac{1}{2} [\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T]. \quad (37)$$

Po dosazení rovnic (36), (37), (28-31) do rovnice (35) a převedení do bezrozměrného stavu je získána rovnice:

$$P = \int_{S_m^*} nd\vec{u}^* \cdot \left\{ \rho n^2 d^2 p^* \vec{\delta} + \mu n [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T] \right\} \cdot \vec{n} d^2 dS^*. \quad (38)$$

Dělením rovnice (38) výrazem $\rho n^3 d^5$ je rovnice převedena na tvar:

$$\frac{P}{\rho n^3 d^5} = \int_{S_m^*} \vec{u}^* \cdot \left\{ -p^* \vec{\delta} + \frac{\mu}{nd^2 \rho} [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T] \right\} \cdot \vec{n} dS^*, \quad (39)$$



kde bezrozměrná plocha $S^* = S/d^2$. Na levé straně rovnice se nachází bezrozměrné kritérium odpovídající příkonovému číslu Po :

$$Po = \int_{S_m^*} \vec{u}^* \cdot \left\{ -p^* \vec{\delta} + \frac{1}{Re} [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T] \right\} \cdot \vec{n} dS^* . \quad (40)$$

Při splnění předpokladů, že je míchadlo dostatečně daleko od volné hladiny, že gravitační síly významně neovlivňují rychlostní a tlakové pole v blízkosti míchadla a že platí funkční závislosti (33-34), vychází po jejich zavedení do rovnice (40) závěr ve formě kritériální rovnice:

$$Po = f(Re) . \quad (41)$$

Turbulentní oblast proudění je charakterizována převládajícími setrvačnými silami (vysoké hodnoty Reynoldsových čísel) a vazké síly jsou zcela zanedbány. V této oblasti platí pro bezrozměrnou rychlost a tlak funkční závislost:

$$\vec{u}^* = f(\vec{x}^*) , \quad (42)$$

$$\tilde{p}^* = f(\vec{x}^*) \quad (43)$$

a po zavedení funkčních závislostí přechází rovnice (40) do tvaru:

$$Po = - \int_{S_m^*} \vec{u}^* \cdot p^* \vec{\delta} \cdot \vec{n} dS^* . \quad (44)$$

Inspekční analýza rovnice (44) dokazuje, že v turbulentní oblasti nezávisí příkonové číslo na Reynoldsově čísle, čili platí kritériální rovnice:

$$Po = B = konst. . \quad (45)$$

Plouživá oblast proudění je naopak charakterizována převládajícími vazkými silami (nízké hodnoty Reynoldsových čísel) a setrvačné síly jsou zanedbatelné. V této oblasti je postup inspekční analýzy podobný jako v turbulentní oblasti, ačkoliv namísto proměnné (31) je zavedena proměnná (32) a pro bezrozměrnou rychlost a tlak platí funkční závislost:

$$\vec{u}^* = f_1(\vec{x}^*) , \quad (46)$$

$$\tilde{p}^+ = f_2(\tilde{x}^*). \quad (47)$$

Po zavedení odpovídajících funkčních závislostí do rovnice (38), pak rovnice přejde do tvaru:

$$P = \int_{S_m^*} n d\vec{u}^* \cdot \left\{ -\mu n p^+ \vec{\delta} + \mu n [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T] \right\} \cdot \vec{n} dS^*. \quad (48)$$

Dělením rovnice (48) výrazem $\mu n^2 d^3$ je rovnice převedena na tvar:

$$\frac{P}{\mu n^2 d^3} = \int_{S_m^*} \vec{u}^* \cdot \left\{ -p^+ \vec{\delta} + [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T] \right\} \cdot \vec{n} dS^* \quad (49)$$

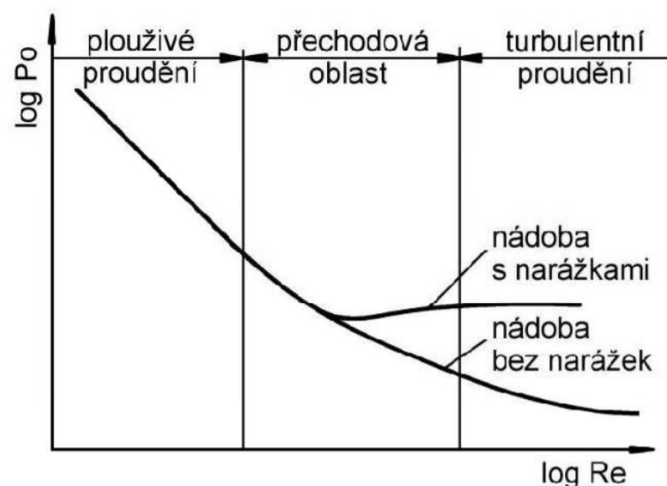
a po zavedení funkčních závislostí přechází rovnice (49) do tvaru:

$$\frac{P}{\mu n^2 d^3} = A = konst. , \quad (50)$$

respektive po úpravě:

$$Po = A \cdot Re^{-1} . \quad (51)$$

Na následujícím obrázku je znázorněn typický průběh příkonové charakteristiky.



Obr. 58. Typický průběh příkonové charakteristiky [21]



5.6.2 Vyhodnocení příkonových charakteristik

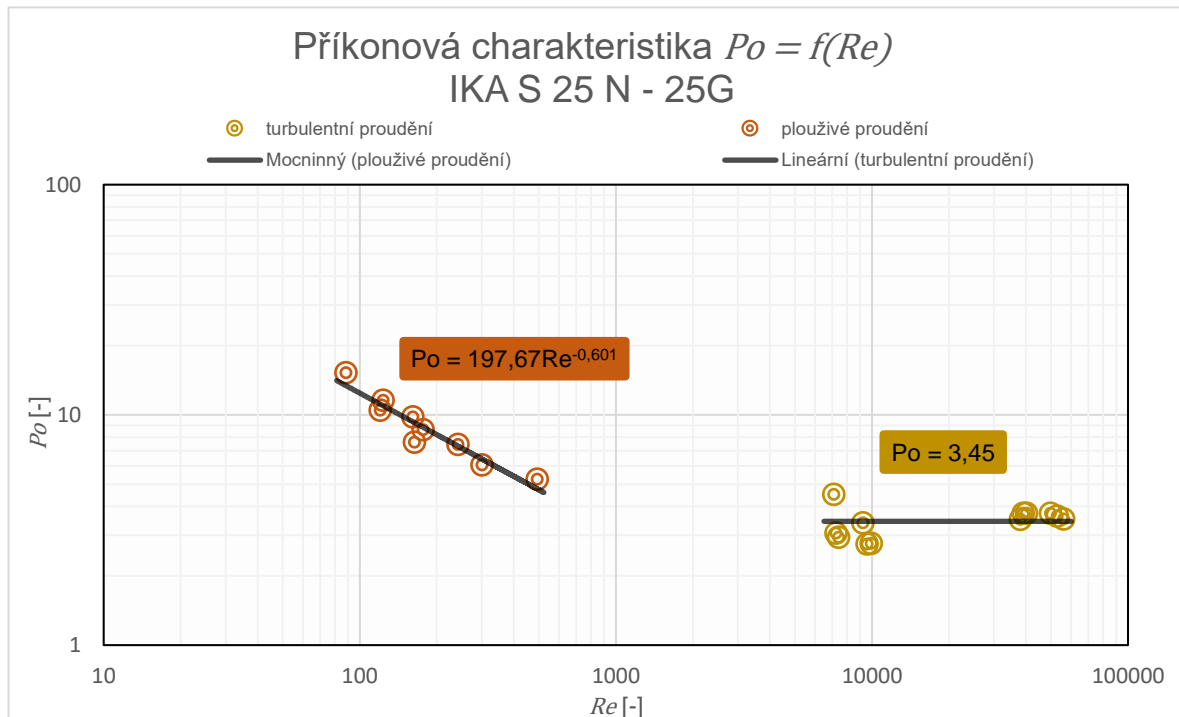
Ze zpracovaných naměřených dat (kapitola 5.5) byly pro jednotlivé geometrie, na základě teoretického rozboru inspekční analýzou (kapitola 5.6.1), spočítány dvojice hodnot příkonového čísla Po a Reynoldsova čísla Re . Tato bezrozměrná čísla jsou definována v rešerši diplomové práce a vypočtena podle rovnic (1) a (2). Hodnoty těchto čísel byly vyneseny do grafu, tzv. příkonové charakteristiky. V oblasti plouživého proudění byla data proložena podle rovnice (51) a v oblasti turbulentního proudění podle rovnice (45).

V následující tabulce je zobrazen souhrn bezrozměrných čísel (experimentální měření i numerická simulace) pro vyhodnocení příkonových charakteristik pro obě dispergační míchadla.

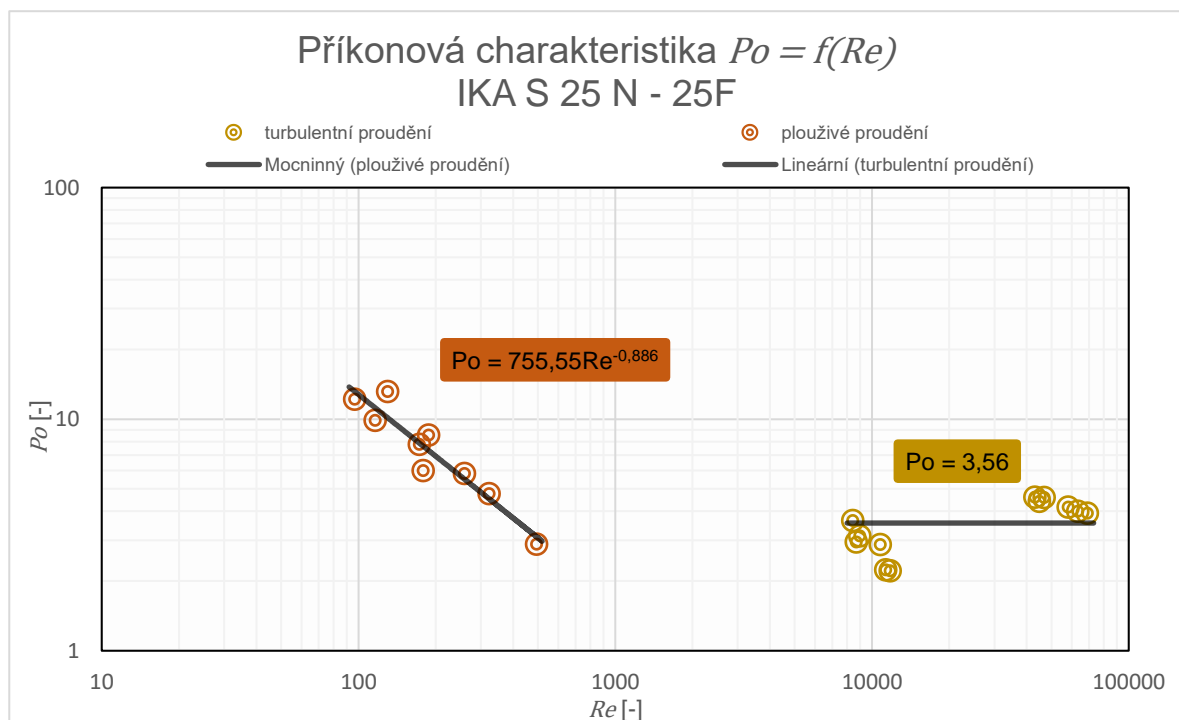
typ míchadla	IKA „S 25 N - 25 G“								
kapalina	VODA			50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU			100% GLYCERIN		
zdroj	experimentální měření								
Veličina	Hodnota								
n [ot/min]	7000			7000			7000		
Po [-]				4,5	3,1	2,9	15,2	10,5	9,8
Re [-]				7090	7230	7410	88	120	161
n [ot/min]	7600			9000			10000		
Po [-]	3,5	3,7	3,7	3,4	2,7	2,8	11,6	8,6	7,4
Re [-]	38030	39030	40170	9220	9580	9940	123	177	242
n [ot/min]	10000						15000		
Po [-]	3,7	3,6	3,5				7,6	6,1	5,3
Re [-]	49790	52880	56070				163	300	493
zdroj	numerická simulace								
n [ot/min]	10000						10000		
Po [-]	3,4		3,2				7,8	5,8	
Re [-]	47940		47940				135	135	
typ míchadla	IKA „S 25 N - 25 F“								
kapalina	VODA			50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU			100% GLYCERIN		
zdroj	experimentální měření								
Veličina	Hodnota								
n [ot/min]	7000			7000			7200		
Po [-]				3,6	2,9	3,1	12,2	13,1	7,8
Re [-]				8430	8700	8970	97	130	173
n [ot/min]	7600			9000			10000		
Po [-]	4,6	4,4	4,6	2,9	2,2	2,2	9,9	8,5	5,8
Re [-]	43130	44990	46930	10790	11320	11800	116	188	259
n [ot/min]	10000						15000		
Po [-]	4,2	4,0	3,9				6,0	4,8	2,9
Re [-]	58150	63510	69060				179	323	494

Tab. XIII. Souhrn bezrozměrných čísel pro obě dispergační míchadla

Vyhodnocení příkonových charakteristik pro obě dispergační míchadla vychází ze souhrnných dat bezrozměrných čísel (Tab. XIII.) a jsou zobrazena v následujících grafech.



Graf V. Příkonová charakteristika pro míchadlo IKA „S 25 N – 25 G“



Graf VI. Příkonová charakteristika pro míchadlo IKA „S 25 N – 25 F“

Turbulentní oblast je podle teorie proložena konstantou a tuto hypotézu je možno potvrdit statistickým testem, který je proveden na následujících stránkách.



Statistické vyhodnocení je způsob proložení mocninové závislosti přímkou, které je provedeno podle skript „Návody k laboratorním cvičením (1993)“ [23]. V teoretickém rozboru je inspekční analýzou rozebrána turbulentní oblast příkonové charakteristiky, která je popsána přímkovou závislostí $P_o = B = konst..$ Podle souhrnných dat bezrozměrných čísel (Tab. XIII.) je zkonstruována příkonová charakteristika v logaritmických souřadnicích. Oblasti plouživého a turbulentního proudění jsou proloženy mocninovou spojnicí trendu ve tvaru:

$$P_o = C \cdot Re^c, \quad (52)$$

kteřá je po úpravě ve tvaru:

$$\begin{aligned} \log P_o &= \log C + c \cdot \log Re \\ y &= \log C + c \cdot x. \end{aligned} \quad (53)$$

Statistické vyhodnocení je provedeno podle následujícího postupu:

- 1) Směrnice regresivní přímky c

$$c = \frac{m \sum_1^m (x_i y_i) - (\sum_1^m x_i)(\sum_1^m y_i)}{m \sum_1^m x_i^2 - (\sum_1^m x_i)^2}. \quad (54)$$

- 2) Konstanta C

$$\log C = \bar{y} - c \cdot \bar{x} = \frac{\sum_1^m y_i - c \cdot \sum_1^m x_i}{m}. \quad (55)$$

- 3) Směrodatná odchylka směrnice regresivní přímky

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum_1^m y_i^2 - [\log C \cdot \sum_1^m y_i + c \cdot \sum_1^m (x_i y_i)]}{(m - 2) \cdot \left[\sum_1^m x_i^2 - \frac{(\sum_1^m x_i)^2}{m} \right]}}. \quad (56)$$

- 4) V turbulentní oblasti příkonové číslo P_o nezávisí na Reynoldsově čísle Re , což v důsledku znamená, že naměřené hodnoty vyhovují rovnici:

$$P_o = B = konst. . \quad (57)$$

To znamená, že je statisticky otestována hypotéza, že směrnice regresivní přímky $c = 0$.

5) Poměr t

$$t = \frac{c - 0}{S_c}.$$

(58)

6) Porovnání poměru $|t|$ s kritickou hodnotou rozdělení $t_{n;\alpha}$, která je pro $(m - 2)$ stupňů volnosti a zvolenou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$ (pro technické výpočty) odečtena z tabelovaných hodnot. Hypotéza, že směrnice $c = 0$ lze přijmout, pokud je splněna podmínka:

$$|t| < t_{(m-2);\alpha}.$$

(59)

7) Za těchto podmínek se konstanta B vypočítá jako aritmetický průměr s 95% mezí intervalu spolehlivosti podle rovnice:

$$P_o = B = \frac{\sum_1^m (nt)_i}{m} \pm \frac{S \cdot t_{(m-1);\alpha}}{\sqrt{m}},$$

(60)

kde S je směrodatná odchylka určená ze vztahu:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^m (nt)_i^2 - \frac{[\sum_1^m (nt)_i]^2}{m}}{m - 1}}.$$

(61)

V následujících tabulkách je zobrazeno statistické vyhodnocení naměřených hodnot v turbulentní oblasti příkonové charakteristiky pro obě míchadla.

data		Popis veličiny	Veličina	Hodnota	Jednotka
		počet měření	m	12,00	-
x_i	y_i	směrnice regresní přímky	c	0,00	-
38025,04	3,52	konstanta	$\log C$	3,19	-
39030,03	3,74	směrodatná odchylka směrnice	S_c	0,00	-
40170,44	3,74	poměr	t	1,28	-
49788,76	3,74		$ t $	1,28	-
52884,87	3,63	počet stupňů volnosti	n	10,00	-
56072,44	3,52	hladina významnosti	α	0,05	-
7086,15	4,52	kritická hodnota poměru	$t_{m-2;\alpha}$	3,58	-
7231,74	3,07		$t_{m-1;\alpha}$	3,50	-
7409,54	2,95	ověření hypotézy	$ t < t_{m-2;\alpha}$	ověřeno	-
9221,74	3,40	směrodatná odchylka	S	0,50	-
9581,55	2,75	konstanta	$P_o = B$	3,45	-
9941,72	2,77	95% interval spolehlivosti	\pm	0,51	-

Tab. XIV. Statistické vyhodnocení turbulentní oblasti příkonové charakteristiky IKA „S 25 N - 25 G“



data		Popis veličiny	Veličina	Hodnota	Jednotka
		počet měření	m	12,00	-
x_i	y_i	směrnice regresní přímky	c	0,00	-
43125,40	4,59	konstanta	$\log C$	2,70	-
44989,63	4,41	směrodatná odchylka směrnice	S_c	0,00	-
46932,59	4,59	poměr	t	3,58	-
58145,54	4,16		$ t $	3,58	-
63512,08	4,00	počet stupňů volnosti	n	10,00	-
69059,56	3,92	hladina významnosti	α	0,05	-
8430,52	3,65	kritická hodnota poměru	$t_{m-2;\alpha}$	3,58	-
8700,82	2,94		$t_{m-1;\alpha}$	3,50	-
8970,80	3,13	ověření hypotézy	$ t < t_{m-2;\alpha}$	ověřeno	-
10793,12	2,87	směrodatná odchylka	S	0,86	-
11322,16	2,24	konstanta	$P_o = B$	3,56	-
11795,53	2,21	95% interval spolehlivosti	\pm	0,85	-

Tab. XV. Statistické vyhodnocení turbulentní oblasti příkonové charakteristiky IKA „S 25 N - 25 F“

V prvním případě (IKA „S 25 N - 25 G“) byla ověřena podmínka hypotézy a příkonová charakteristika byla v turbulentní oblasti proložena přímkou $P_o = 3,45$.

V druhém případě (IKA „S 25 N - 25 F“) byla podmínka hypotézy ověřena také, avšak velmi těsně a to nejspíše z důvodu nedostatečného počtu měření m . Vzhledem k podrobnému teoretickému rozboru řešené problematiky bude příkonová charakteristika také proložena v turbulentní oblasti přímkou $P_o = 3,56$.

6 Diskuse

V diskusi je hlavním tématem porovnání příkonových charakteristik, tedy výsledků diplomové práce (CFD numerická simulace, experimentální měření) s předchozí diplomovou prací Ing. Kovářika a také se zveřejněnými publikacemi.

V první části diskuse budou porovnány výsledky této diplomové práce (experimentálního měření s CFD numerickou simulací), které byly provedeny pro míchadlo firmy IKA „S 25 N -25 G“. Vizualizace hydrodynamiky proudění popisuje rychlostní kontury a vektorová pole směrů proudění. Při experimentálním měření bylo pozorováno, že k proudění ve vsádce dochází tak, jak bylo předpokládáno v numerické simulaci (axiální nasávání, středový vír, oblast nejvyšší disipace v pracovní oblasti míchadla). Další částí porovnání jsou výsledky příkonů zařízení P . Numerická simulace byla provedena pro otáčky míchadla $n = 1000 \text{ rpm}$ pro dvě pracovní kapaliny (voda, glycerin). V případě vody se výsledky příkonu téměř shodovaly. V případě glycerinu byly výsledky numeriky o 25% nižší, kde je tento jev nejspíše způsoben výpočtovým modelem k - ω ($2q\eta$), který je uzpůsoben pro turbulentní režim proudění, což je podle výsledků chybný předpoklad (glycerin se vyskytuje v plouživém režimu proudění). V další fázi vyhodnocení bylo vypočteno Reynoldsovo číslo Re a dále také z příkonu zařízení P příkonové číslo Po .

Data jsou k porovnání zobrazena v následující tabulce.

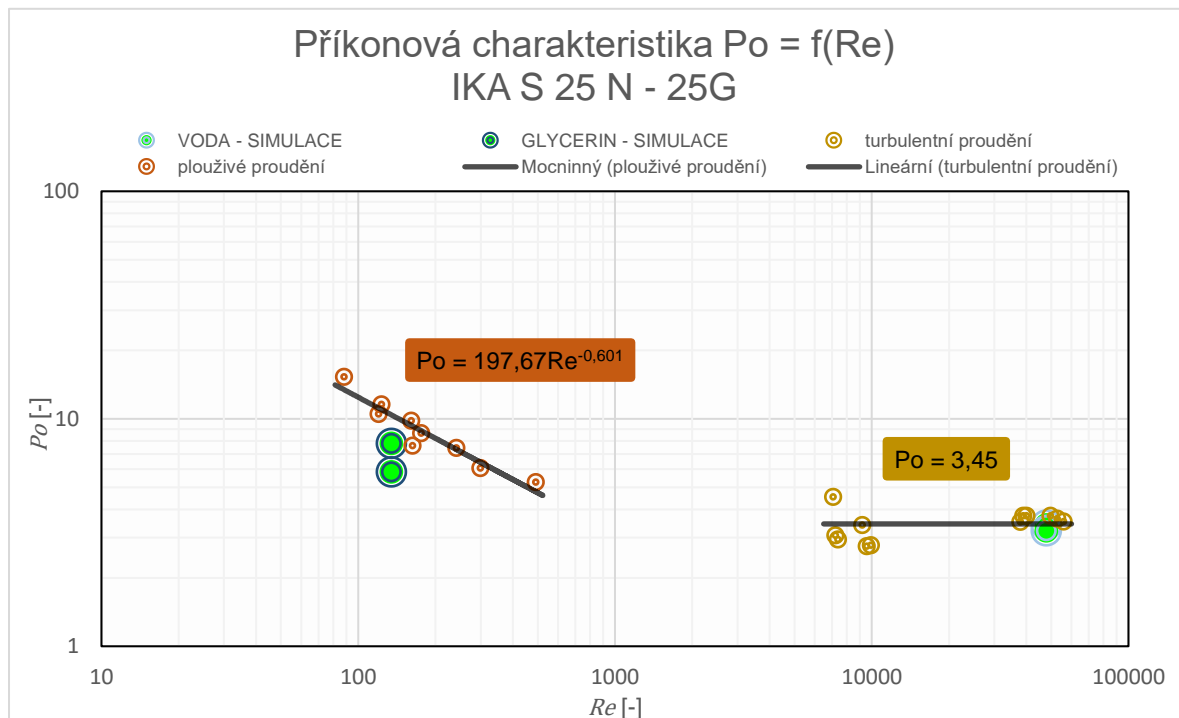
typ míchadla	IKA „S 25 N - 25 G“					
kapalina	VODA			100% GLYCERIN		
zdroj	experimentální měření					
Veličina	Hodnota					
$n [\text{ot}/\text{min}]$	10000			10000		
$P [\text{W}]$	24,5	23,8	23,1	95,1	70,9	61,2
$Po [-]$	3,7	3,6	3,5	11,6	8,6	7,4
$Re [-]$	49790,0	52880,0	56070,0	120,0	180,0	240,0
zdroj	numerická simulace					
$n [\text{ot}/\text{min}]$	10000*			10000**		
$P [\text{W}]$	22,4		21,1	64,3		48,2
$Po [-]$	3,4		3,2	7,8		5,8
$Re [-]$	47940,0		47940,0	130,0		130,0

Tab. XVI. Porovnávací data CFD numerické simulace a experimentu

* výsledky simulace s prvním řádem přesnosti (First Order)

** výsledky simulace s druhým řádem přesnosti (Second Order)

Výsledky byly pro porovnání vyneseny do jedné příkonové charakteristiky, viz následující graf.



Graf VII. Příkonová charakteristika pro porovnání výsledků CFD numerické simulace a experimentu

V druhé části diskuse budou porovnány výsledky experimentálního měření této diplomové práce s prací Ing. Kovářika, na kterou tato volně navazuje. V obou pracích je provedeno měření příkonu kalorimetrickou metodou na stejném dispergačním míchadle firmy IKA „S 25 N - 25 G“. Hlavním výstupem porovnání je proložení oblasti konstantou, kde v této práci je $Po = 3,45$ a v práci Ing. Kovářika je $Po = 2,47$. Zásadní rozdíl těchto prací je v použití různé pracovní kapaliny. V této diplomové práci jsou použity modelové newtonské kapaliny, u kterých jsou známy všechny tokové vlastnosti a měrná tepelná kapacita c_p z běžně dostupné literatury. V práci Ing. Kovářika je použita průmyslová barva, která je charakteristická neneutronským chováním, kde nejsou zcela známy tokové vlastnosti. U této reálné barvy byla navíc měřena měrná tepelná kapacita c_p , nicméně z důvodu špatného proudění v měřicím přístroji byla změřena s velkou chybou (až desítky %). To je faktor, který ovlivňuje výpočet příkonu, a tím příkonovou charakteristiku.



V poslední řadě budou porovnány výsledky experimentálního měření této diplomové práce s dalšími publikovanými experimentálními výsledky v dostupné literatuře. Obecný fakt o dispergačních zařízeních je ten, že se v turbulentní oblasti ($Re > 10^4$) příkonová čísla pohybují v rozmezí hodnot od 2 do 6. V rešerši diplomové práce jsou uvedeny tři základní experimentální metody měření příkonu, jejichž výsledky budou postupně porovnány. Faktem ale zůstává, že publikované výsledky měření jsou provedeny pro **rozdílné geometrie** míchadel stator - rotor, než je v této diplomové práci. První metodou je **elektrické měření**, které bylo provedeno pro vsádkovou konfiguraci provozu, což je stejné jako v diplomové práci. Použita byla dvě dispergační míchadla (Silverson, Ross) pro širokou škálu otáček míchadla n . Výsledky příkonových čísel P_o jsou pro turbulentní oblast proudění v rozmezí hodnot od 2 do 3, což řádově odpovídá výsledkům diplomové práce. Druhou metodou je **tenzometrické měření**, kde byly v rešerši uvedeny dvě měření. Obě měření jsou provedena pro vsádkovou konfiguraci opět pro rozdílné typy míchadel. První z nich je provedeno na speciálním prototypu se vzduchovými ventily, PIV výbavou a chladícím pláštěm pro udržování konstantní teploty. Dispergátor je umístěn u dna nádoby a pracovní kapalinou je deionizovaná voda. Výsledek měření $P_o = 1,22$ je oproti dalším publikacím velmi nízký a může být způsoben umístěním míchadla u dna míchané nádoby s narážkami. Dalším faktorem jsou nízké otáčky míchadla (200-1500 rpm), takže se dispergátor nejspíš ani nedostane do pracovní oblasti. Druhé tenzometrické měření je provedeno na prostším měřicím zařízení s míchadlem od firmy VMI opět s nízkými otáčkami míchadla (30-1500 rpm). V tomto případě jsou jako pracovní kapaliny používány roztoky glukózy a příkonové číslo vyšlo v turbulentní oblasti $P_o = 3$. Poslední metodou je již zmiňovaná **kalorimetrická metoda**, která je mimo akademickou půdu ČVUT zveřejněna pouze pro průtočnou konfiguraci provozu. Měření bylo provedeno na in-line míchadlu stator - rotor firmy Silverson, které je umístěnou v recirkulační smyčce. Výsledky měření příkonových čísel jsou pro tuto konfiguraci běžně 3 - 4x nižší a v tomto případě je $P_o = 0,8$.

7 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na problematiku procesních charakteristik dispergačních zařízení typu stator - rotor. Pod tento obecný pojem spadá příkonová charakteristika, což je fundamentální charakterizující parametr sloužící k popisu dynamického stavu míchání. Základním parametrem pro zkonstruování této charakteristiky je příkon P [W], který byl změřen pro tři základní pracovní kapaliny (voda, 50% vodný roztok glycerinu, 100% glycerin). Tento parametr byl získán numericky a experimentálně.

Podstatnou součástí diplomové práce je CFD numerická simulace, která byla uskutečněna v softwaru *Ansys, Fluent v16.2* se studentskou licenci. Simulační měření je provedeno pro dispergační míchadlo firmy IKA („S 25 N - 25 G“), pro které je zhotoven kompletní výpočtový model, kde bylo snahou nezjednodušovat reálnou geometrii. Jedná se o geometrii s pohyblivým elementem, pro kterou je využita metoda MRF (Moving Reference Frame). Hlavním cílem numerické simulace je určení krouticího momentu M_k , ze kterého je následně vypočten požadovaný příkon zařízení P . Dalším výsledkem simulace je vizualizace hydrodynamiky proudění, která potvrzuje předpokládané chování měřené kapaliny, ale přináší i nové poznatky. K hlavní dispergaci dochází v mezikruží mezi státorem a rotorem. Zejména tedy na vnější straně rotoru, kde byly pozorovány maxima rychlostí měřené kapaliny, a tudíž zde docházelo i k maximální disipaci kinetické energie v teplo. Vlivem rotoru byla axiálně nasávána pracovní kapalina do pracovního prostoru, která následně vycházela radiálně skrze díry ve statoru, kde jsou maxima gradientu rychlostí a tudíž i maxima smykových napětí. Rotor v pracovní oblasti vytvářel vlivem rotace podtlak, čímž způsobil zpětné nasávání pracovní kapaliny zpět do pracovního prostoru.

Druhou klíčovou částí diplomové práce bylo experimentální měření příkonu pro dvě dispergační míchadla firmy IKA („S 25 N - 25 F“ a „S 25 N - 25 G“), kde se jednalo o nepřímou metodu měření příkonu, tzv. kalorimetrická metoda. Tato metoda je založena na principu disipace kinetické energie v teplo, kde pro výpočet příkonu P byla použita kalorimetrická rovnice. Pro možnost využití



této rovnice byla změřena teplota T (před a po určité době míchání t) při konkrétních otáčkách n . Další potřebnou proměnnou pro tuto rovnici je měrná tepelná kapacita c_p . Pro kompletní vyhodnocení příkonové charakteristiky je zapotřebí znát další veličiny, pro které byla provedena některá pomocná měření (pyknometr - hustota ρ , rotační viskozimetr - dynamická viskozita μ).

Příkonová charakteristika je dle teorie vyjádřena závislostí dvou parametrů. Jedná se o dvě bezrozměrná čísla, tj. příkonové číslo Po a Reynoldsovo číslo Re . Z CFD numerické simulace a experimentálního měření byl tedy získán příkon zařízení P , ze kterého bylo následně vypočteno požadované příkonové číslo Po . Zpracovaná naměřená data byla vyhodnocena, vynesena do jednotné příkonové charakteristiky a následně porovnána jejich shoda. V porovnání obou metod se výsledky téměř shodovaly, a tudíž jsou výsledky diplomové práce považovány za úspěšné.

Výsledky diplomové práce mají znalostní přínos pro vědeckou základnu problematiky dispergačních míchadel typu stator - rotor. Příkonovou charakteristiku lze dále využít pro kvalitní návrh dispergačních míchacích systémů podle teorie, a to jak v laboratorních podmínkách, tak průmyslovém měřítku.

Vzhledem k celkovým výsledkům diplomové práce se nabízí možnost návrhu rozšíření nebo pokračování ve výzkumu dané problematiky. V CFD numerické simulaci je v plouživé oblasti proudění využít výpočtový model k-omega ($2q\eta$), který respektuje především turbulentní chování kapaliny. Simulační software *Fluent* nedisponuje vhodnějším modelem a jelikož vyšla pro glycerin zhruba o 25% nižší hodnota příkonového čísla, nabízí se možnost využití jiné výpočtové metody, tzv. Sliding Mesh. Další návrh je rozšířit příkonovou charakteristiku do oblasti, která není v této diplomové práci specifikována ($Re \in (800; 8000)$). To by v důsledku znamenalo použití pracovní kapaliny s jinými tokovými vlastnostmi (hustota ρ , dynamická viskozita μ).

8 Reference

1. **PAUL, Edward L., ATIEMO-OBENG, Victor A., KRESTA, Suzanne M.** *Handbook of Industrial Mixing, Science and Practice*. New Jersey : Vydavatelství Wiley Interscience, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004.
2. **IKA®.** MK Colloid Mill. www.ikausa.com. [Online] 2015. <https://www.ikausa.com/products/mk-colloid-mill-inline-mixers-inline-disperser-dispersing-machine-high-shear/>.
3. —. MKO Cone Mill. www.ikausa.com. [Online] 2015. <https://www.ikausa.com/products/mko-cone-mill-inline-mixers-inline-disperser-dispersing-machine-high-shear/>.
4. —. IKA accessories. <https://www.ika.com/en>. [Online] <https://www.ika.com/en/Products-Lab-Eq/Dispersers-Homogenizer-Accessories-cspacc-177/>.
5. **Chemineer®.** Chemineer. <https://www.chemineer.com/>. [Online] 2015. <https://www.chemineer.com/products/greerco/homogenizer.html>.
6. **Silverson®.** Dispersion of Fumed Silica. <http://www.silverson.com/>. [Online] 2015. <http://www.silverson.com/images/uploads/documents/CFumedSilica.pdf>.
7. —. Batch Mixers. <http://www.silverson.com/>. [Online] 2018. <http://www.silverson.com/us/products/batch-mixers/>.
8. —. From Lab to Production. <http://www.silverson.com/>. [Online] 2018. http://www.silverson.com/?gclid=Cj0KCQiAr93gBRDSARIsADvHiOr0lvdy5wBmgPT7To8WuEOR0cYEWyMuE7KVCrelyMOJbLZYKwsaFMAaAk8uEALw_wcB.
9. —. High Shear In-Line Mixers. <http://www.silverson.com/>. [Online] 2018. <http://www.silverson.com/us/products/in-line-mixers/>.
10. **MORTENSEN, Hans Henrik, a další.** The Canadian Journal Of Chemical Engineering. *Characteristics of batch rotor-stator mixer performance elucidated by shaft torque and angle resolved PIV measurement*. místo neznámé : © 2011 Canadian Society for Chemical Engineering, 2011. Volume 89. DOI 10.1002/cjce.20587.



11. **PADRON, Gustavo A., KOCH, Elizabeth G. a CALABRESE, Richard V.** Measurement and Comparison of Power Draw in Batch Rotor-Stator Mixers. *M.S. thesis*. USA - Maryland, College Park : University of Maryland, 2001. MD 20742-2111.
12. **Silverson®.** Laboratory Mixers. *http://www.silverson.com/*. [Online] 2018. *http://www.silverson.com/us/products/laboratory-mixers/*.
13. **DOUCET, L., ASCANIO, G. a TANGUY, P.A.** Chemical Engineering Research and Design. *Hydrodynamics characterization of rotor-stator mixer with viscous fluids*. Canada - Montreal, Department of Chemical Engineering, URPEI : © Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE, 2005, October. Sv. 83(A10), 1186-1195. DOI: 10.1205/cherd.04254.
14. **ÖZCAN-TASKIN, Gül, KUBICKI, Dominik a PADRON, Gustavo.** The Canadian journal of chemical engineering. *Power and flow characteristics of three rotor-stator heads*. místo neznámé : © 2011 Canadian Society for Chemical Engineering, 2011, October. Volume 89. DOI 10.1002/cjce.20553.
15. **COOKE, M., RODGERS, T. L. a KOWALSKI, A. J.** AlchE Journal. *Power consumption characteristics of an in-line silverson high shear mixer*. místo neznámé : © 2011 American Institute of Chemical Engineers, 2012, June. Sv. 58: 1683-1692, Volume 58, No. 6. DOI 10.1002/aic.12703.
16. **NIST®.** Chemistry WebBook - Isobaric Properties for Water. *http://webbook.nist.gov/chemistry/*. [Online] National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce. [Citace: 20. září 2018.]
17. **KOVÁŘÍK, Michal.** Dispergace v technologii výroby částicových nanokompozitů. *[Diplomová práce]*. Praha : ČVUT - Ústav procesní a zpracovatelské techniky, 2015.
18. **ZAJÍČEK, Pavel.** Simulace míchadla typu stator - rotor ve Fluentu. *[Semestrální práce]*. Praha : ČVUT - Ústav procesní a zpracovatelské techniky, 2015.
19. —. Vliv dispergace na tokové vlastnosti disperzí nátěrových hmot. *[Diplomová práce]*. Praha : ČVUT - Ústav procesní a zpracovatelské techniky, 2015.
20. **RIEGER, František, NOVÁK, Václav a Tomáš, JIROUT.** Hydromechanické procesy I. *[Skriptum]*. Praha : Vydavatelství České vysoké učení technické, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03286-2.



21. —. Hydromechanické procesy II. *[Skriptum]*. Praha : Vydavatelství České vysoké učení technické, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03302-9.

22. **BAFRNCOVÁ, Soňa, ŠEFČÍKOVÁ, Milica a VAJDA, Milan.** Chemické inžinierstvo tabuľky a grafy. *[Skriptum]*. Bratislava : Vydavateľství Tlač STU, 2000. Sv. I, Edičné číslo 4792. ISBN 80-227-1304-X.

23. **FOŘT, Ivan.** Návod k laboratorním cvičením. *[Skriptum]*. Praha : Vydavatelství České vysoké učení technické, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 1993. Sv. I. vydání (145 stran). ISBN 80-01-00999-8.

24. **ScalesGalore®.** Scales Galore. www.scalesgalore.com. [Online] Itin Scale Co., Inc., 2000.
https://www.scalesgalore.com/product/index.cfm?product_id=7146.



9 Seznam obrázků

Obr. 1a,b,c. Koloidní mlýn firmy IKA a) drážkování [3] b) hrubý povrch se zuby [3]	- 14 -
Obr. 2. Sestava dvoustupňového axiálního dispergačního míchadla firmy Chemineer Greerco [5]	- 15 -
Obr. 3. Axiální míchadla firmy Chemineer Greerco a) jednostupňové b) dvoustupňové [1]	- 15 -
Obr. 4. Různá konstrukční provedení radiálních míchadel firmy IKA [4]	- 16 -
Obr. 5. Různá konstrukční provedení radiálních míchadel firmy Silverson [7]	- 16 -
Obr. 6a,b. Vsádkový radiální míchadlo firmy Silverson a) provedení scale-up [8]	- 17 -
Obr. 7a,b,c. Průtočné radiální míchadlo a) schematický náčrt dispergační nádoby [6] b) koloidní mlýn firmy IKA [2] c) In-line dispergační zařízení firmy Silverson [9]	- 18 -
Obr. 8. Průběh dispergace v In-line zařízení firmy Silverson [9]	- 18 -
Obr. 9. Vektorové pole směrů proudění v řezu kolmém k ose [19]	- 19 -
Obr. 10a,b. Kontura (rychlostní pole) a) pohled na půdorys b) kolmý řez lopatkami rotoru [19]	- 20 -
Obr. 11. Vygenerovaná síť celého objemu dispergačního zařízení a podélný řez objemem zařízení [18]	- 20 -
Obr. 12a,b. Radiální míchadla pro elektrické měření a) Silverson „LR4“ (rotor 28 mm) [12] b) Ross „ME-100LC“ (rotor 34 mm) [11]	- 22 -
Obr. 13. Schematický náčrt experimentálního měření příkonu elektrickou metodou [11]	- 22 -
Obr. 14a,b. Příkonová charakteristika experimentálního měření příkonu elektrickou metodou a) Silverson „LR4“ b) Ross „ME-100LC“ [11]	- 23 -
Obr. 15. Prototyp experimentálního zařízení pro tenzometrické měření příkonu [10] Pozn.: Podrobnější popis obrázku je uveden ve zdroji.	- 24 -
Obr. 16. Příkonová charakteristika experimentálního měření příkonu na prototypu tenzometrickou metodou [10]	- 25 -
Obr. 17. Schematický náčrt experimentálního aparátu pro tenzometrické měření příkonu a dispergační míchadlo firmy VMI [13]	- 26 -
Obr. 18. Příkonová charakteristika experimentálního měření příkonu na aparátu tenzometrickou metodou [13] ..	- 27 -
Obr. 19. Schematický náčrt experimentálního měření kalorimetrickou metodou průtočného zařízení [14]	- 28 -
Obr. 20. In-line dispergační míchadlo firmy Silverson („150/250 MS“) [15]	- 29 -
Obr. 21. Příkonová charakteristika experimentálního měření průtočného zařízení kalorimetrickou metodou [15]	- 29 -
Obr. 22. Závislost příkonového čísla na otáčkách [17]	- 30 -
Obr. 23. Kompletní sestava připravená k vyexportování do CAD formátu .stp	- 33 -
Obr. 24. Zobrazení postupu práce numerické simulace v softwaru Ansys	- 33 -
Obr. 25a,b. Fluid a) rotorové b) statorové části	- 34 -
Obr. 26. Vygenerovaná síť celého objemu dispergačního zařízení a podélný řez objemem zařízení	- 35 -
Obr. 27. Pracovní prostředí tvorby sítě	- 35 -
Obr. 28a,b. Zobrazení počtu elementů a následných hodnot kontroly (Min, Max, Average)	- 36 -
Obr. 29. Grafické zobrazení Skewness	- 36 -
Obr. 30. Grafické zobrazení ortogonální kvality (Orthogonal Quality)	- 37 -
Obr. 31. Tabulka hodnocení kvality sítě [18]	- 37 -
Obr. 32. Zobrazení pracovního prostředí softwaru Fluent	- 39 -
Obr. 33. Uživatelské prostředí pro vyhodnocování výsledků (Results)	- 41 -
Obr. 34. Kontura (rychlostní profil) kolmého řezu lopatkami rotoru - VODA	- 44 -
Obr. 35. Kontura (rychlostní profil) kolmého řezu lopatkami rotoru - GLYCERIN	- 44 -
Obr. 36. Kontura (rychlostní profil) přímého řezu lopatkami rotoru - VODA	- 45 -
Obr. 37. Kontura (rychlostní profil) přímého řezu lopatkami rotoru - GLYCERIN	- 45 -
Obr. 38. Vektorové pole směrů proudění - VODA	- 46 -



Obr. 39. Vektorové pole směrů proudění - GLYCERIN.....	- 47 -
Obr. 40. Dispergační zařízení stator – rotor firmy IKA „S 25 N – 25 F“	- 49 -
Obr. 41. Dispergační zařízení stator – rotor firmy IKA „S 25 N – 25 G“	- 49 -
Obr. 42. Dispergační nástavec IKA.....	- 50 -
Obr. 43. Termostat JULABO.....	- 50 -
Obr. 44. Rotační reometr RHEOTEC.....	- 51 -
Obr. 45. Digitální termometr GHM - GREISINGER.....	- 52 -
Obr. 46. Digitální váha VIBRA	- 52 -
Obr. 47. Digitální váha OHAUS [24]	- 52 -
Obr. 48. Digitální stoky OLYMPIA.....	- 53 -
Obr. 49. Posuvné měřítko EXTOL Premium	- 53 -
Obr. 50. Vážení pro přípravu 50% vodného roztoku glycerinu	- 54 -
Obr. 51. Měřicí soustava experimentálního měření kalorimetrickou metodou	- 60 -
Obr. 52. Vážení plastové lahve.....	- 61 -
Obr. 53. Upínací systém míchadla se spojkou.....	- 61 -
Obr. 54. Izolovaný systém experimentu.....	- 62 -
Obr. 55. Vložení a vycentrování míchadla	- 62 -
Obr. 56. Měření teploty kapaliny kalibrovaným termometrem	- 63 -
Obr. 57. Redukce otáček pro glycerin.....	- 64 -
Obr. 58. Typický průběh příkonové charakteristiky [21]	- 70 -
Obr. 59. Stator - vysunutí 1.....	- 88 -
Obr. 60. Stator - vysunutí 2.....	- 88 -
Obr. 61. Stator - vysunutí 3.....	- 89 -
Obr. 62. Rotor - vysunutí 1	- 89 -
Obr. 63. Rotor - zkosení 1	- 89 -
Obr. 64. Rotor - vysunutí 2	- 90 -
Obr. 65. Rotor - rotace 1.....	- 90 -
Obr. 66. Rotor - zkosení 2	- 90 -
Obr. 67. Rotor - vysunutí 3	- 90 -
Obr. 68a,b. Tvorba 3D modelu a export a) postup „vazbení“ rotorové a statorové části b) export	- 91 -
Obr. 69. Importování geometrie reálného dispergačního zařízení	- 92 -
Obr. 70. Rozdělení objemu (fluidu) na 11 částí zformované do jednoho celku (part)	- 93 -
Obr. 71. Globální nastavení pro vytváření sítě (Report Preview)	- 94 -
Obr. 72. Postup vytváření sítě	- 95 -
Obr. 73. Zobrazení nastavení Sweep a Face sizing	- 96 -
Obr. 74. Stator circular ring – ukázka sítě.....	- 96 -
Obr. 75. Rotor circular ring – ukázka sítě.....	- 96 -
Obr. 76. Zobrazení nastavení Multizone a Face sizing	- 97 -
Obr. 77. Rotor up; Rotor down; Stator up 1, 2; Stator down 1, 2 – ukázka sítě	- 97 -
Obr. 78. Zobrazení nastavení Patch Conforming Method a Body sizing	- 97 -
Obr. 79. Rotor impeller; Stator outer 1 - ukázka sítě a nastavení Body sizing	- 98 -
Obr. 80. Plochy výstupu z dispergačního zařízení (outlet).....	- 98 -
Obr. 81. Plochy vstupu do dispergačního zařízení (inlet).....	- 99 -
Obr. 82. Plochy statorové části (wall_stator).....	- 99 -
Obr. 83. Plochy rotorové části (wall_rotor).....	- 99 -
Obr. 84. Statorové objemy (stator).....	- 100 -
Obr. 85. Rotorové objemy (rotor).....	- 100 -



Obr. 86. Všeobecná nastavení (General)	- 101 -
Obr. 87. Nastavení viskózního modelu k-omega (2 eqn)	- 102 -
Obr. 88. Výběr výpočtového viskózního modelu (Viscous - SST k-omega)	- 102 -
Obr. 89. Výběr z databáze kapalin – fyzikální vlastnosti kapalin	- 103 -
Obr. 90. Výběr z databáze kapalin.....	- 103 -
Obr. 91. Zobrazení výběru typu objemu.....	- 104 -
Obr. 92. Nastavení MRF pro statorovou část (stator)	- 105 -
Obr. 93. Nastavení MRF pro rotorovou část (rotor).....	- 105 -
Obr. 94. Výpis množin ploch	- 106 -
Obr. 95. Nastavení pro vstupní plochy (inlet)	- 106 -
Obr. 96. Vnitřní plochy tvořící rozhraní (interior)	- 107 -
Obr. 97. Nastavení pro výstupní plochy (outlet)	- 107 -
Obr. 98. Nastavení pro stěny rotoru (wall_rotor).....	- 108 -
Obr. 99. Nastavení pro stěny rotoru (wall_stator)	- 108 -
Obr. 100. Nastavení specifikace výpočtové metody	- 109 -
Obr. 101. Nastavení inicializační metody	- 110 -
Obr. 102. Zobrazení finálního okna před kalkulací	- 110 -
Obr. 103. Výsledky simulace s prvním řádem přesnosti (First Order)	- 111 -
Obr. 104. Výsledky simulace s druhým řádem přesnosti (Second Order)	- 111 -
Obr. 105. Postup výpočtu krouticího momentu M_k pomocí funkce Function Calculator.....	- 112 -
Obr. 106. Nastavení pro výpočet krouticího momentu M_k	- 112 -
Obr. 107. Měřicí soustava dynamické viskozity (rotační reometr - termostat)	- 114 -
Obr. 108. Postup nastavení rotačního viskozimetru.....	- 115 -



10 Seznam tabulek

Tab. I.	Vyhodnocení krouticího momentu M_k z numerických simulací	- 42 -
Tab. II.	Přehled potřebných veličin pro výpočet příkonu P	- 42 -
Tab. III.	Vyhodnocení příkonu P z numerických simulací	- 42 -
Tab. IV.	Výpis zařízení a pomůcek	- 47 -
Tab. V.	Výsledky měření hustoty - Pyknometr	- 54 -
Tab. VI.	Dynamická viskozita GLYCERIN	- 56 -
Tab. VII.	Dynamická viskozita 50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU	- 56 -
Tab. VIII.	Dynamická viskozita VODA [16]	- 57 -
Tab. IX.	Měrná tepelná kapacita měřených kapalin [16] [22]	- 58 -
Tab. X.	Hodnoty otáček dispergačních míchadel	- 63 -
Tab. XI.	Naměřená data pro jednu vsádku dispergačního míchadla IKA „S 25 N - 25 G“	- 64 -
Tab. XII.	Souhrn zpracovaných naměřených dat pro oba typy dispergačních míchadel	- 65 -
Tab. XIII.	Souhrn bezrozměrných čísel pro obě dispergační míchadla	- 70 -
Tab. XIV.	Statistické vyhodnocení turbulentní oblasti příkonové charakteristiky IKA „S 25 N - 25 G“	- 73 -
Tab. XV.	Statistické vyhodnocení turbulentní oblasti příkonové charakteristiky IKA „S 25 N - 25 F“	- 74 -
Tab. XVI.	Porovnávací data CFD numerické simulace a experimentu	- 75 -

11 Seznam grafů

Graf I.	Závislost dynamické viskozity na teplotě - GLYCERIN	- 56 -
Graf II.	Závislost dynamické viskozity na teplotě - 50% VODNÝ ROZTOK GLYCERINU	- 57 -
Graf III.	Závislost dynamické viskozity na teplotě - VODA	- 57 -
Graf IV.	Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě	- 58 -
Graf VI.	Příkonová charakteristika pro míchadlo IKA „S 25 N – 25 F“	- 71 -
Graf V.	Příkonová charakteristika pro míchadlo IKA „S 25 N – 25 G“	- 71 -
Graf VII.	Příkonová charakteristika pro porovnání výsledků CFD numerické simulace a experimentu	- 76 -

12 Seznam příloh

P1. Příloha 1 - Numerická simulace

P2. Příloha 2 - Experimentální měření

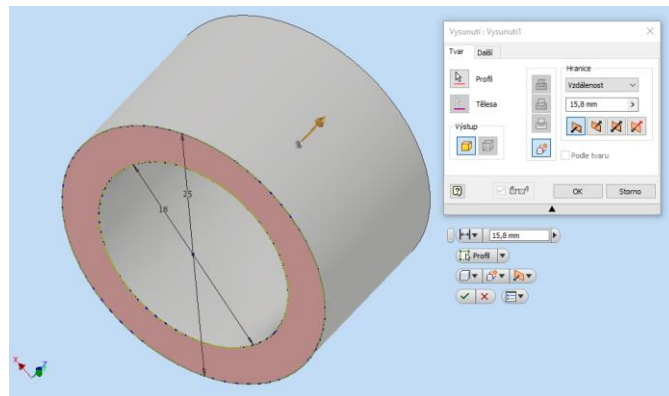
13 Přílohy

P1. Příloha 1 - Numerická simulace

P1.1. Modelování 1. části míchadla - STATOR

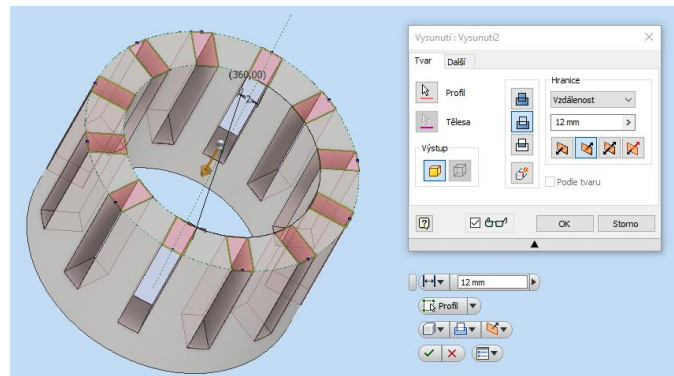
Statorová část byla vymodelována pomocí tří kroků:

1) Vysunutí 1



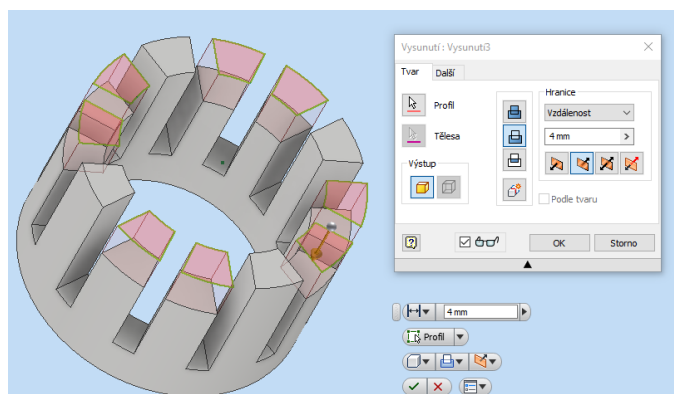
Obr. 59. Stator - vysunutí 1

2) Vysunutí 2



Obr. 60. Stator - vysunutí 2

3) Vysunutí 3

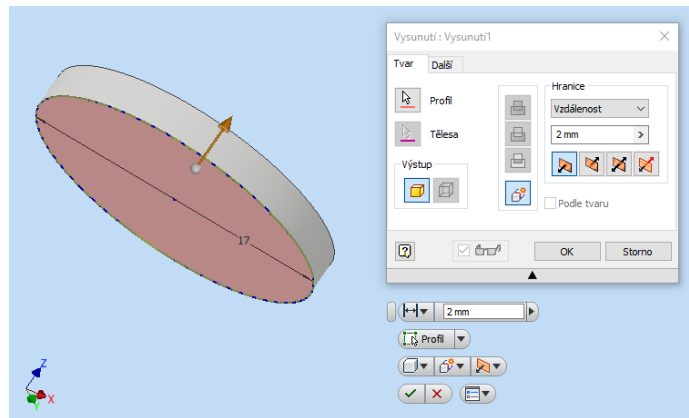


Obr. 61. Stator - vysunutí 3

P1.2. Modelování 2. části míchadla - ROTOR

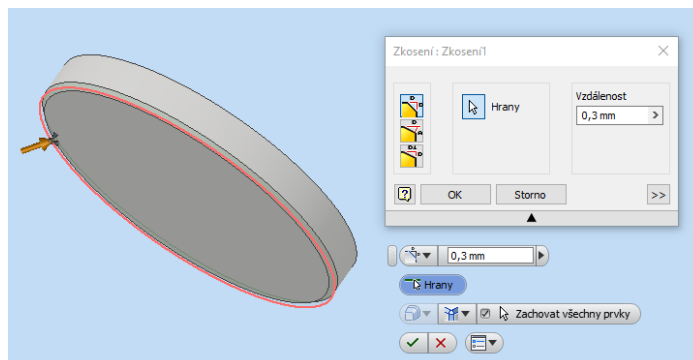
Rotorová část byla vymodelována pomocí šesti kroků:

1) Vysunutí



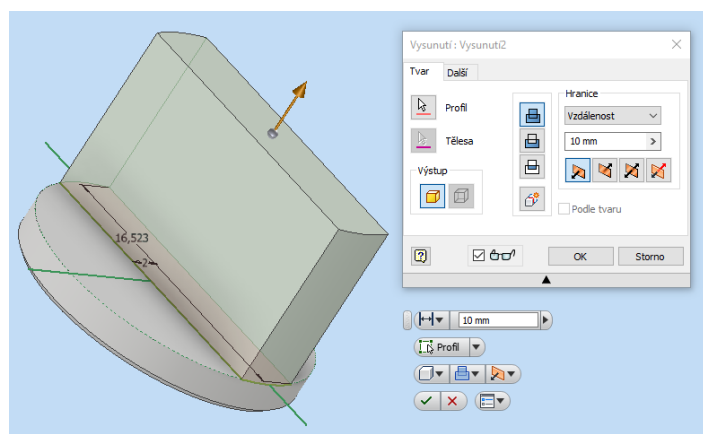
Obr. 62. Rotor - vysunutí 1

2) Zkosení 1



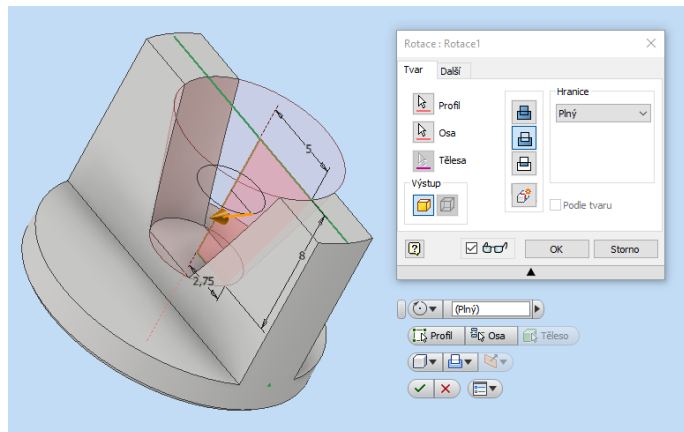
Obr. 63. Rotor - zkosení 1

3) Vysunutí 2



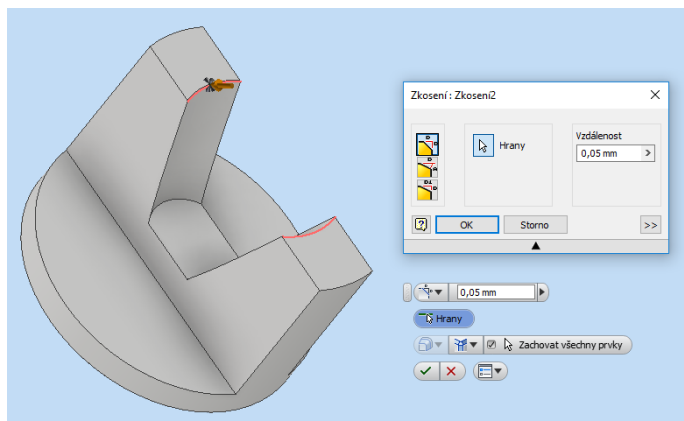
Obr. 64. Rotor - vysunutí 2

4) Rotace 1



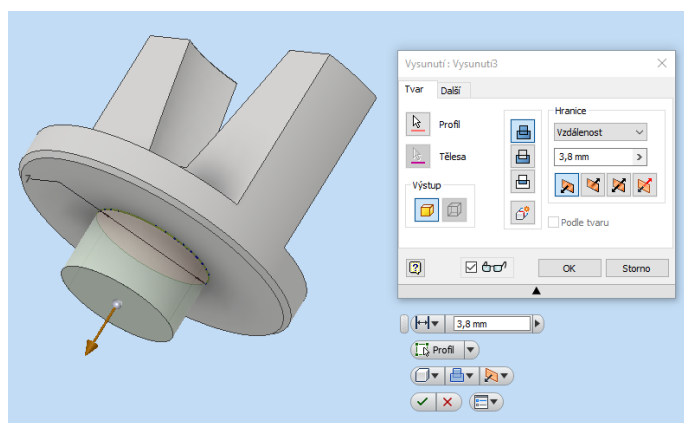
Obr. 65. Rotor - rotace 1

5) Zkosení 2



Obr. 66. Rotor - zkosení 2

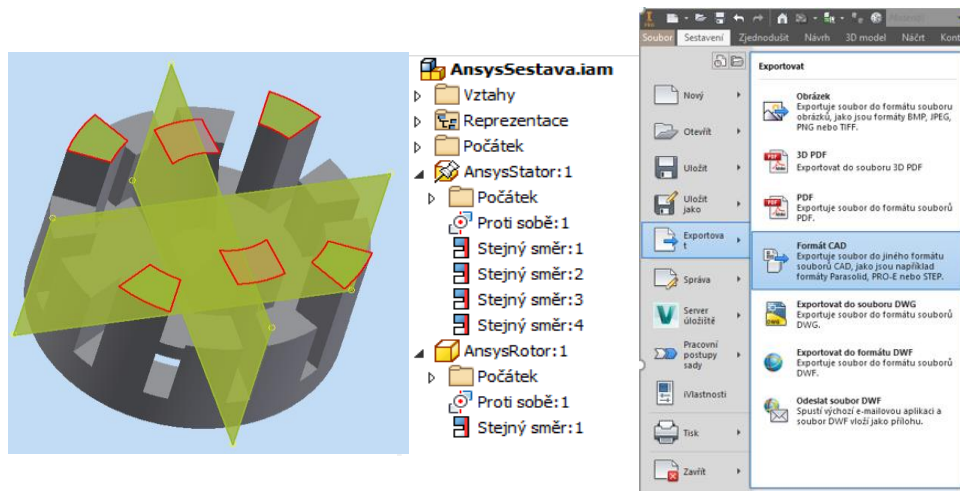
6) Vysunutí 3



Obr. 67. Rotor - vysunutí 3

P1.3. Sestavení 3D modelu míchadla a export

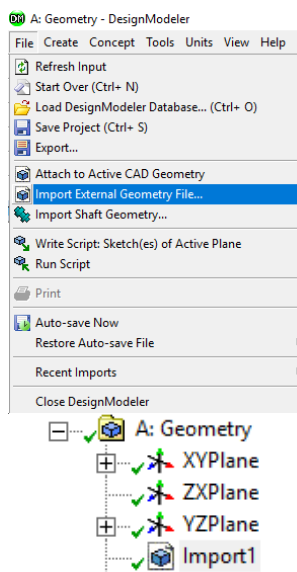
Pomocí vazeb je vytvořena kompletní 3D sestava míchadla složená ze dvou částí STATOR a ROTOR. Kompletní sestava byla následně vyexportována v CAD formátu STEP (.stp), jak je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 68a,b. Tvorba 3D modelu a export a) postup „vazbení“ rotorové a statorové části b) export

P1.4. Postup tvorby 3D modelu kapaliny - FLUID

Nejprve je zapotřebí importovat externí geometrii reálného dispergačního zařízení ve formátu STEP (.stp) do softwaru Ansys (DesignModeler), viz následující obrázek.

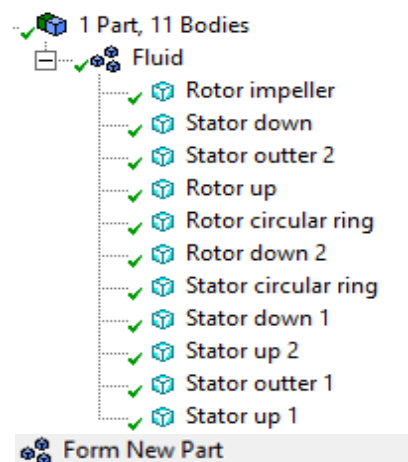


Obr. 69. Importování geometrie reálného dispergačního

Následně je vytvořen „kontrolní válcový fluid“, do kterého je pomocí funkce „Boolean“ vyříznuta geometrie reálného dispergátoru. Tím pádem vznikl požadovaný 3D model kapaliny (tj. fluid), ve kterém proudí kapalina.

Tento objem je dále pomocí funkce „Slice“ rozdělen na geometricky jednodušší dílčí části (nejlépe válcového charakteru), aby bylo možné vygenerovat co nejkvalitnější síť v dalším kroku. Reálně je mezi rotorem a statorem mezikruží („circular ring“) o tloušťce 1 mm na průměru, fiktivní plocha řezu je vedena přesně v polovině tohoto mezikruží. Celkově je fluid rozdělen na jedenáct částí, které jsou ve finále ještě zformovány do jednoho celku (tj. „part“) pomocí funkce „Form New Part“. Je to z toho důvodu, aby program, generující síť (Mesh), bral fluid jako jedno těleso.

Výše zmíněné rozdělení fluidu je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 70. Rozdělení objemu (fluidu) na 11 částí zformované do jednoho celku (part)
(Pozn.: „Stator Outter 2“ byl nakonec potlačen (funkce „Supress“) z důvodu snížení počtu
elementů, a tím pádem i snížení finálního výpočtového času simulace.

Celkově se zde tedy vyskytuje 10 dílčích částí celého objemu.)

P1.5. Postup tvorby sítě

Před začátkem generování elementů jsou nejprve nastaveny globální podmínky pro tvorbu sítě. Zejména výchozí nastavení vytváření sítě („Defaults“).

Další globální nastavení se týká dimenzování (tzv. Sizingu). Zde je zvolen potřebný styl síťování, velikost elementů, vyhlazování, přechody, úhel rozpětí, atd. Přičemž při zvolené metodě „one-by-one“³ (vlastní název) je ponechána výchozí velikost elementů („default“), jelikož se většina položek bude postupně měnit podle potřeby sítě.

Následující obrázek znázorňuje zvolené globální nastavení pro vytváření sítě, které je možné vytisknout přímo v pracovním prostředí (Mesh) pomocí funkce „Report Preview“.

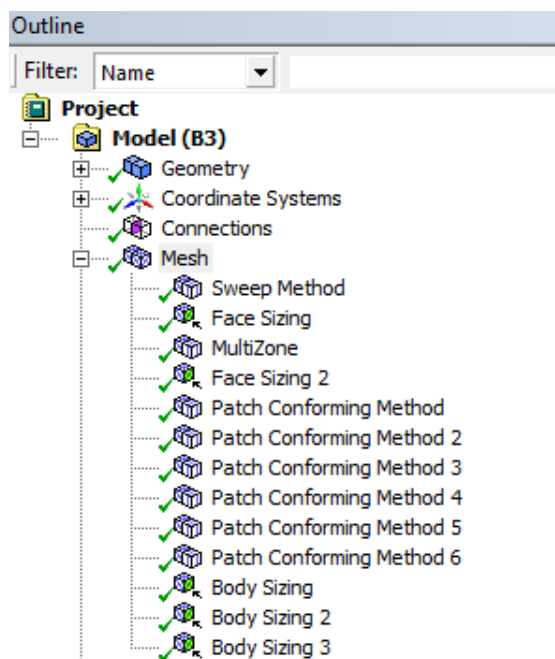
Object Name	Mesh	Assembly Meshing	
State	Solved	Method	None
Display		Patch Conforming Options	
Display Style	Body Color	Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Defaults		Patch Independent Options	
Physics Preference	CFD	Topology Checking	No
Solver Preference	Fluent	Advanced	
Relevance	0	Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Sizing		Shape Checking	CFD
Use Advanced Size Function	On: Curvature	Element Midside Nodes	Dropped
Relevance Center	Fine	Straight Sided Elements	
Initial Size Seed	Active Assembly	Number of Retries	0
Smoothing	Medium	Extra Retries For Assembly	Yes
Transition	Slow	Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Span Angle Center	Fine	Mesh Morphing	Disabled
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)	Defeaturing	
Min Size	Default (5,9156e-003 mm)	Pinch Tolerance	Default (5,3241e-003 mm)
Max Face Size	Default (0,591560 mm)	Generate Pinch on Refresh	No
Max Size	Default (1,18310 mm)	Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Growth Rate	2,0	Defeaturing Tolerance	Default (2,9578e-003 mm)
Minimum Edge Length	8,4357e-002 mm		
Inflation			
Use Automatic Inflation	None		
Inflation Option	Smooth Transition		
Transition Ratio	0,272		
Maximum Layers	5		
Growth Rate	1,2		
Inflation Algorithm	Pre		
View Advanced Options	No		

Obr. 71. Globální nastavení pro vytváření sítě (Report Preview)

³ Potlačení všech dílčích částí objemu a postupné generování sítě v každé části objemu (tzv. „jedna po druhé“). V každé části je tedy možné využít jinou metodu tvorby, zejména tvar a velikost elementu.

Za daného předpokladu, že z hlediska obtížnosti tvorby sítě patří geometrie modelu k náročnějším, je tedy zvolen výše vysvětlený postup vytváření sítě one-by-one. Tento postup byl zvolen z důvodu nutné redukce počtu elementů v síti, jelikož při klasickém postupu by byl počet elementů v řádech milionů, a tím pádem neúnosný finální výpočtový čas numerické simulace.

Na následujícím obrázku je zobrazen postup vytváření sítě touto metodou.



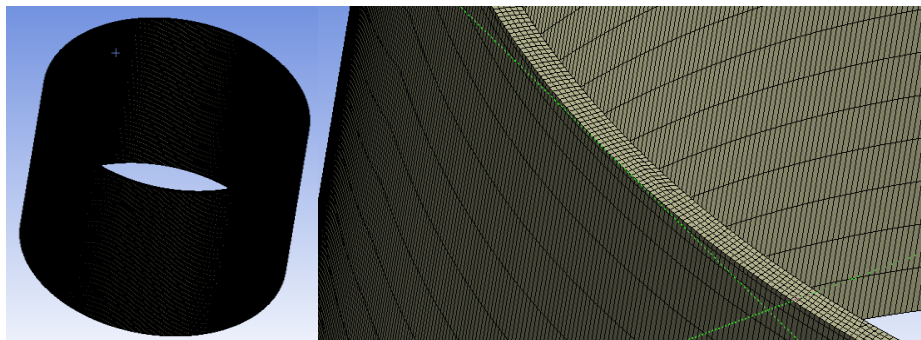
Obr. 72. Postup vytváření sítě

Nejdůležitější oblastí celého dispergačního zařízení je statorové a rotorové mezikruží („circular ring“). Dochází zde k hlavní dispergaci, kde je největší smykové napětí kapaliny. Tudíž síťování začíná od těchto dvou dílčích částí objemu, kde je také zvolena jemnější síť elementů z důvodu přesnějšího výpočtu. Celková mezera mezi státorem a rotujícím míchadlem činí pouhých 0,5 mm na poloměru. Je zapotřebí, aby se v této mezeře vyskytovalo alespoň 10 elementů pro přesnější výpočet, tudíž 1 element bude velký pouhých 0,05 mm.

Při vytváření sítě metodou one-by-one byl postup následující:

1) Statorové mezikruží („Stator circular ring“)

Tato část objemu je válcového charakteru, tudíž je zde využita možnost síťování metodou „Sweep“, která je pro numerickou simulaci nejpřesnější. Dále byl také zvolen určitý „Face sizing“.



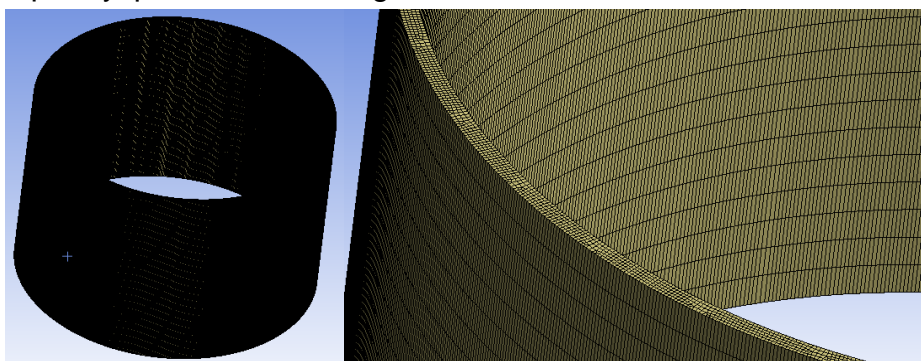
Obr. 74. Stator circular ring – ukázka sítě

Details of "Sweep Method" - Method		Details of "Face Sizing" - Sizing	
Scope		Scope	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body	Geometry	2 Faces
Definition		Definition	
Suppressed	No	Suppressed	No
Method	Sweep	Type	Element Size
Element Midside Nodes	Use Global Setting	<input type="checkbox"/> Element Size	5, e-002 mm
Src/Trg Selection	Manual Source and Target	Behavior	Soft
Source	1 Face	<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
Target	1 Face	<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
Free Face Mesh Type	Quad/Tri	<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (5,9156e-003 mm)
Type	Element Size		
<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	0,45 mm		
Sweep Bias Type	No Bias		
Element Option	Solid		
Constrain Boundary	No		

Obr. 73. Zobrazení nastavení Sweep a Face sizing

2) Rotorové mezikruží („Rotor circular ring“)

V této dílčí části již nebylo možné použít metodu Sweep z důvodu navazujících sousedních geometricky složitějších obrazců, nicméně je zde použita metoda „Multizone“, která je obdobně kvalitní. Opět byl použit Face sizing.



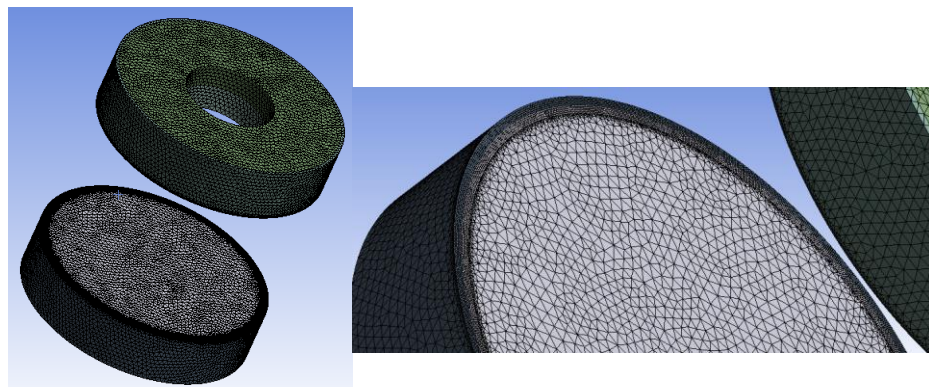
Obr. 75. Rotor circular ring – ukázka sítě

Details of "MultiZone" - Method		Details of "Face Sizing 2" - Sizing	
Scope		Scope	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body	Geometry	2 Faces
Definition		Definition	
Suppressed	No	Suppressed	No
Method	MultiZone	Type	Element Size
Mapped Mesh Type	Hexa	<input type="checkbox"/> Element Size	5,e-002 mm
Surface Mesh Method	Program Controlled	Behavior	Soft
Free Mesh Type	Not Allowed	<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
Element Midside Nodes	Use Global Setting	<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
Src/Trg Selection	Manual Source	<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (5,9156e-003 mm)
Source Scoping Method	Geometry Selection		
Source	2 Faces		
Sweep Size Behavior	Sweep Element Size		
<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	0,45 mm		
Advanced			
Preserve Boundaries	Protected		
Mesh Based Defeaturing	Off		
Minimum Edge Length	4,0379 mm		
Write ICEM CFD Files	No		

Obr. 76. Zobrazení nastavení Multizone a Face sizing

3) „Rotor up“; „Rotor down“; „Stator up 1, 2“; „Stator down 1, 2“

Na všechny tyto části objemu míchadla byla použita metoda „Patch Conforming Method“, pro kterou je potom následně nastaven určitý „Body Sizing“.



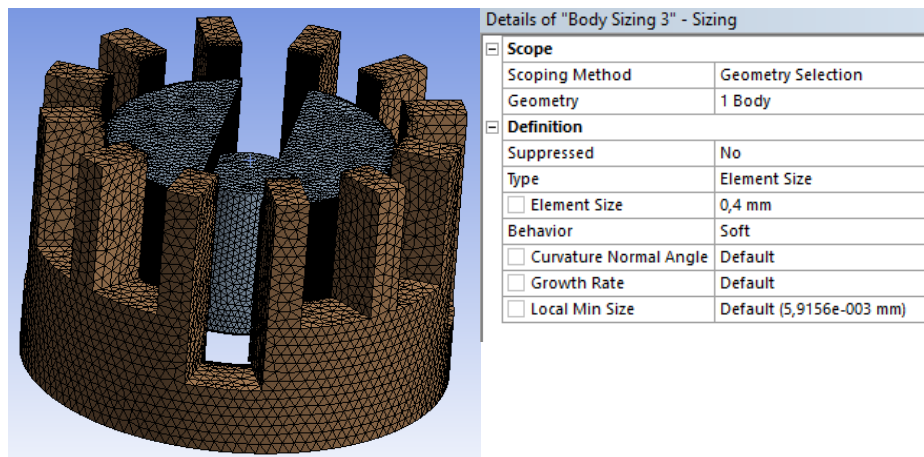
Obr. 77. Rotor up; Rotor down; Stator up 1, 2; Stator down 1, 2 – ukázka sítě

Details of "Patch Conforming Method" - Method		Details of "Body Sizing" - Sizing	
Scope		Scope	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body	Geometry	4 Bodies
Definition		Definition	
Suppressed	No	Suppressed	No
Method	Tetrahedrons	Type	Element Size
Algorithm	Patch Conforming	<input type="checkbox"/> Element Size	0,35 mm
Element Midside Nodes	Use Global Setting	Behavior	Soft
		<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
		<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
		<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (5,9156e-003 mm)

Obr. 78. Zobrazení nastavení Patch Conforming Method a Body sizing

4) „Rotor impeller“; „Stator outer 1“

V tomto případě jsou dílčí části mnohem členitější a geometricky složitější než předchozí, proto je zde zvolen pouze určitý Body sizing a pro generování elementů „Automatic Method“.

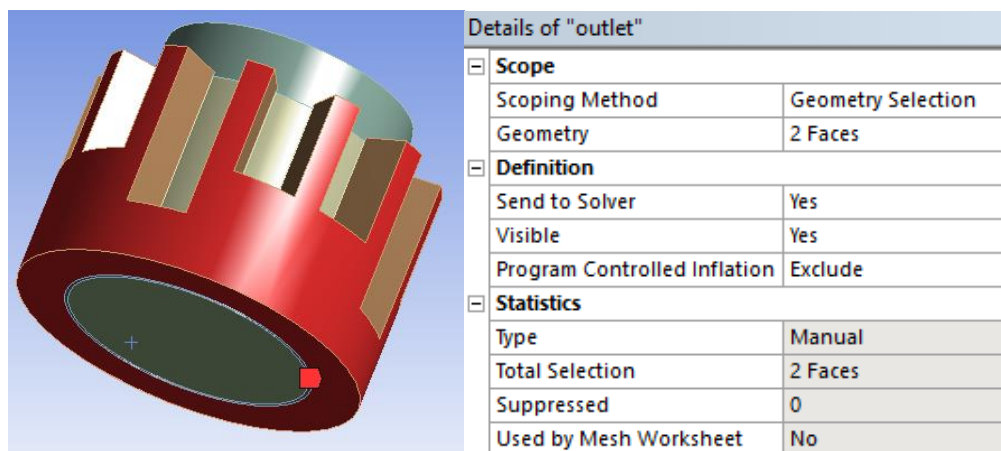


Obr. 79. Rotor impeller; Stator outer 1 - ukázka sítě a nastavení Body sizing

P1.6. Specifikace ploch a objemů

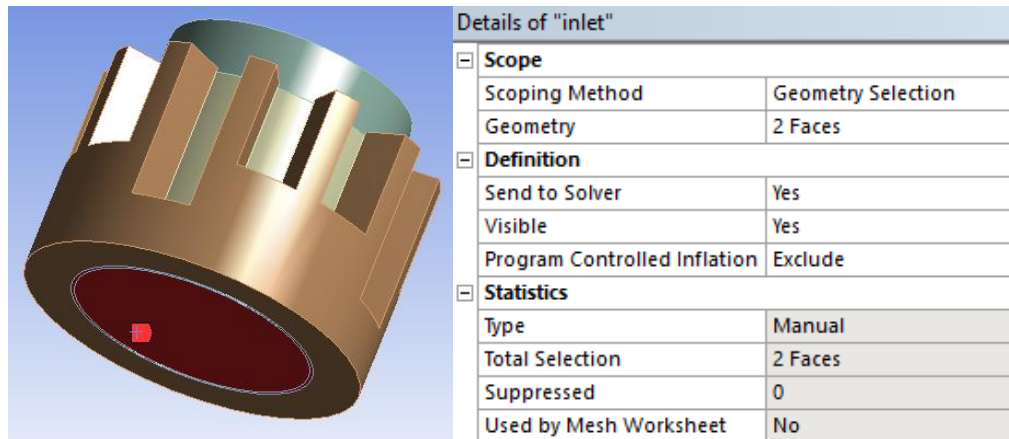
V celém simulovaném objemu se vyskytuje celkem šest skupin ploch a objemů (vyznačeno červeně), které je třeba určitým způsobem pojmenovat:

1) Plochy výstupu („outlet“)



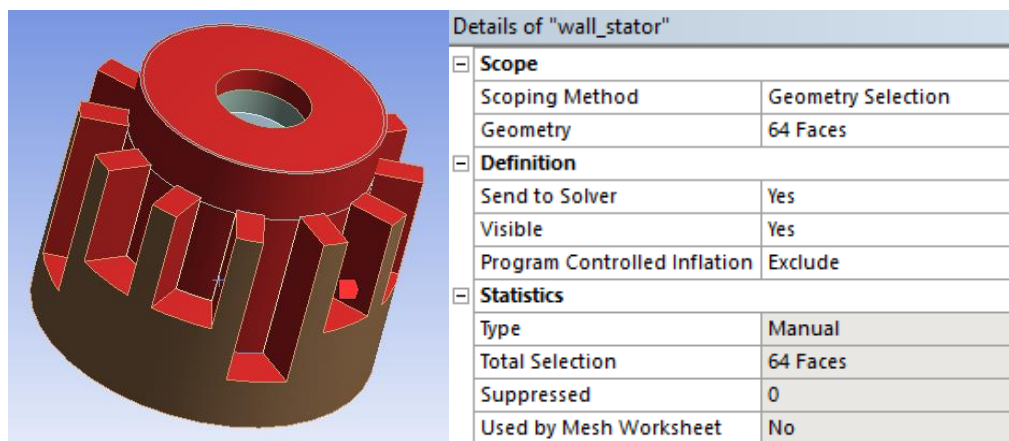
Obr. 80. Plochy výstupu z dispergačního zařízení (outlet)

2) Plochy vstupu („inlet“)



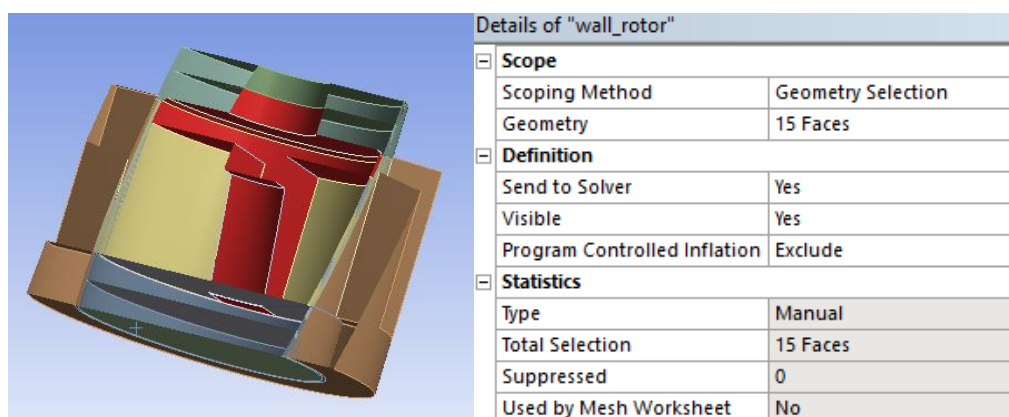
Obr. 81. Plochy vstupu do dispergačního zařízení (inlet)

3) Plochy statorové části („wall_stator“)



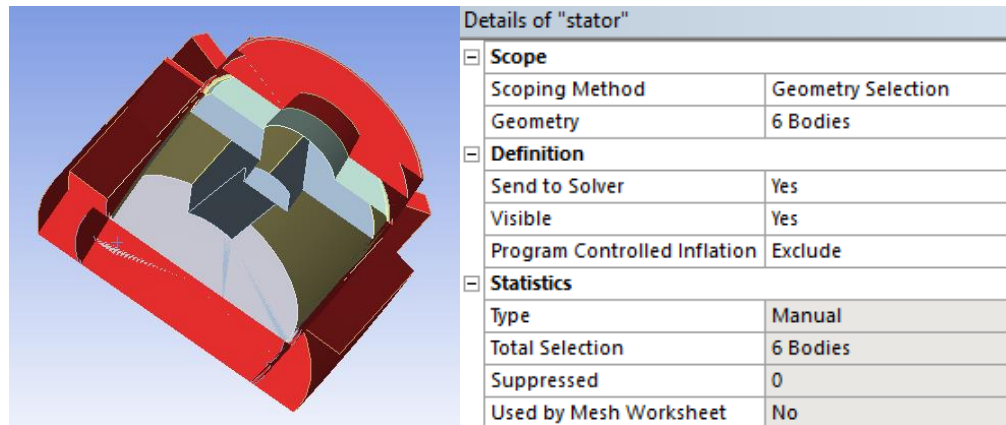
Obr. 82. Plochy statorové části (wall_stator)

4) Plochy rotorové části („wall_rotor“)



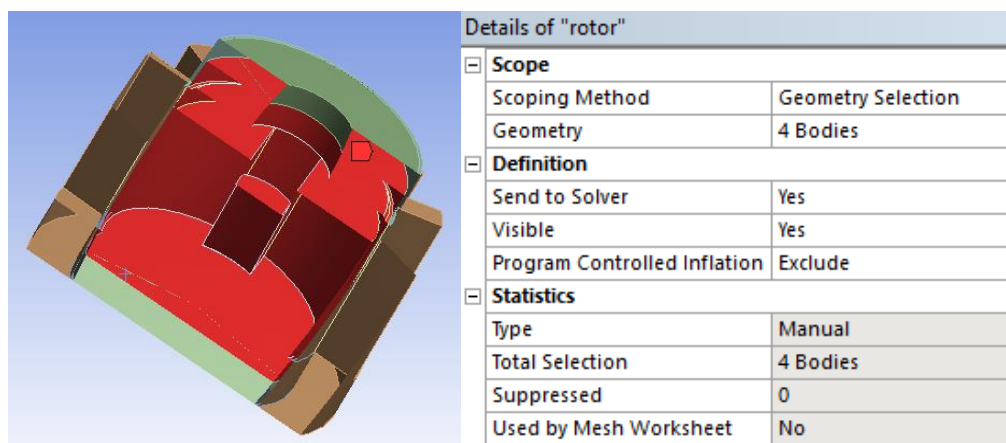
Obr. 83. Plochy rotorové části (wall_rotor)

5) Statorové objemy („stator“)



Obr. 84. Statorové objemy (stator)

6) Rotorové objemy („rotor“)



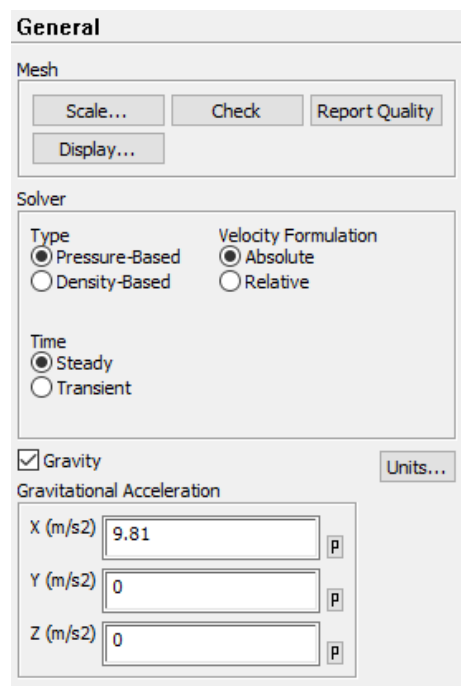
Obr. 85. Rotorové objemy (rotor)

P1.7. Specifikace podmínek pro numerickou simulaci

1) Všeobecná nastavení („General“)

Zde je nastavena předpokládaná výpočtová základna řešitele *Fluent* založená na změně tlaku („Pressure-Based“). Dále použití absolutních rychlostí („Absolute“), ustáleného času („Steady“) a především gravitačního zrychlení v ose „X“ („Gravity“).

V této části je dále také možno zobrazit rozměry celého objemu pomocí funkce „Scale“ a dále výhodná funkce „Check“, která uživateli umožňuje zkontrolovat celkový stavu modelu, okrajových podmínek, ale především také stav sítě. Například uživateli nabízí možnost zlepšení vytvořené sítě. „Report Quality“ potom vypisuje shrnutí informací funkce Check. V poslední řadě funkce „Display“, která zobrazuje různé části geometrie pro lepší orientaci.



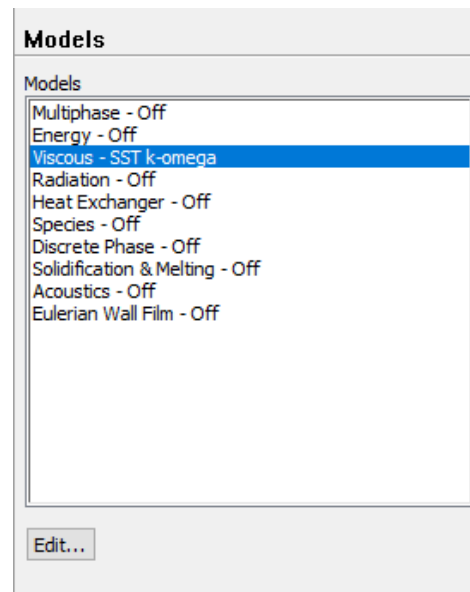
Obr. 86. Všeobecná nastavení (General)

2) Výpočtový model („Models“)

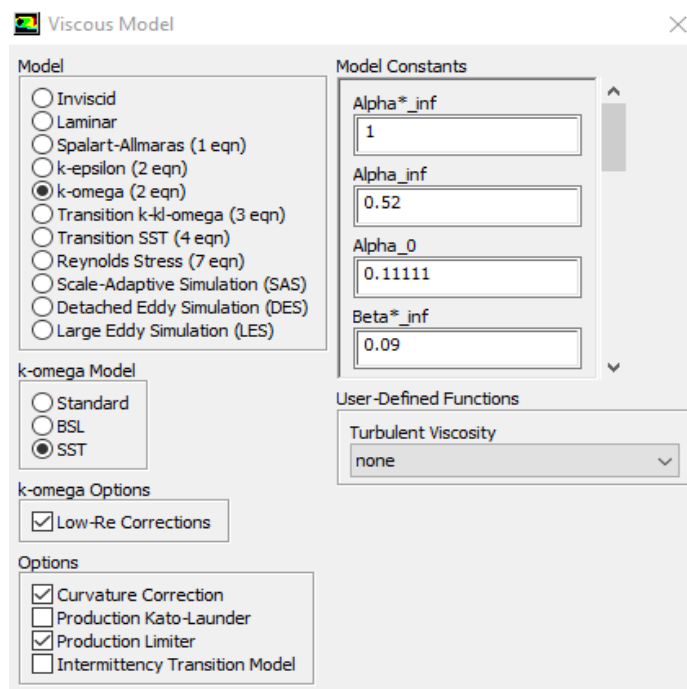
S ohledem na tířnost prostorů oblastí proudění v dispergačním zařízení, je zvolen model „k-omega (2eqn)“. Tento model je většinou využíván na proudění kapaliny v blízkosti stěny, zatímco model „k-epsilon (2eqn)“ je využíván na proudění kapaliny dál od stěny.

Předpokládán je turbulentní režim proudění, kde převládají turbulentní síly a to zejména pro čistou vodu. Pro tento předpoklad je zvolený výpočtový model k-omega (2eqn) zcela vyhovující.

Na druhou stranu, v případě glycerinu, lze očekávat plouživý režim proudění, kde převládají plouživé síly. Pro tento případ by zvolený výpočtový model k-omega (2eqn) nemusel zcela odpovídat realitě, a tudíž by se lišily výsledky numerické simulace od experimentálního měření.



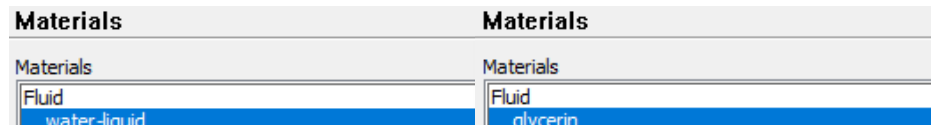
Obr. 88. Výběr výpočtového viskózního modelu (Viscous - SST k-omega)



Obr. 87. Nastavení viskózního modelu k-omega (2 eqn)

3) Látka kapaliny („Materials“)

U glycerinu je v kolonce „Create/Edit...“ manuálně zvolena nižší hodnota dynamické viskozity μ ($0.45 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Je to z důvodu napodobení podmínek experimentálního měření, kde je vlivem vyšších teplot snížena viskozita pracovní kapaliny. Původně byla hodnota dynamické viskozity μ ($0.799 \text{ Pa}\cdot\text{s}$).



Obr. 90. Výběr z databáze kapalin

Create/Edit Materials

Name: water-liquid | Material Type: fluid | Order Materials by: Name

Chemical Formula: h2o<|> | Fluent Fluid Materials: water-liquid (h2o<|>) | Mixture: none

Properties:

- Density (kg/m³): constant | 998.2
- Viscosity (kg/m-s): constant | 0.001003

Name: glycerin | Material Type: fluid | Order Materials by: Name

Chemical Formula: c3h8o3 | Fluent Fluid Materials: glycerin (c3h8o3) | Mixture: none

Properties:

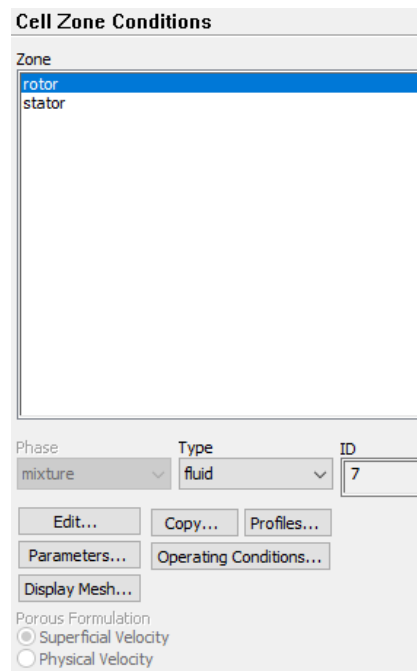
- Density (kg/m³): constant | 1259.9
- Viscosity (kg/m-s): constant | 0.45

Buttons: Change/Create, Delete, Close, Help

Obr. 89. Výběr z databáze kapalin – fyzikální vlastnosti kapalin

4) Podmínky pro objemy („Cell Zone Conditions“)

V předchozích kapitolách je již zmíněno, že je celý objem obecně rozdělen na dvě části stator a rotor. V tomto kroku je nejprve vybrán druh objemu. Lze to provést v kolonce „Type“, kde je pro rotorovou i statorovou část vybrán typ objemu „fluid“, viz následující obrázek.

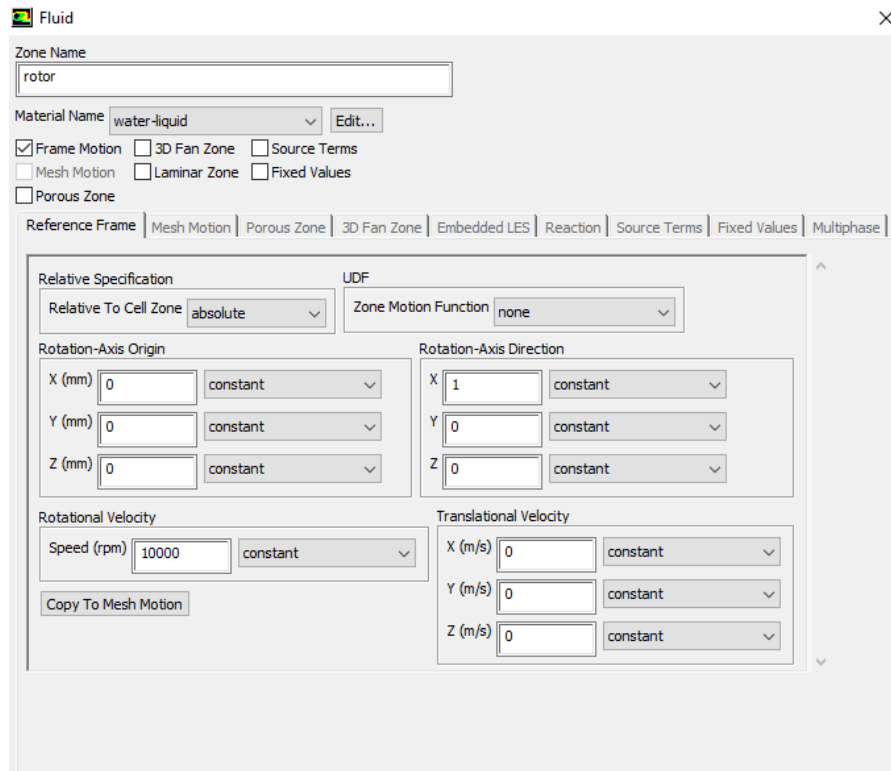


Obr. 91. Zobrazení výběru typu objemu

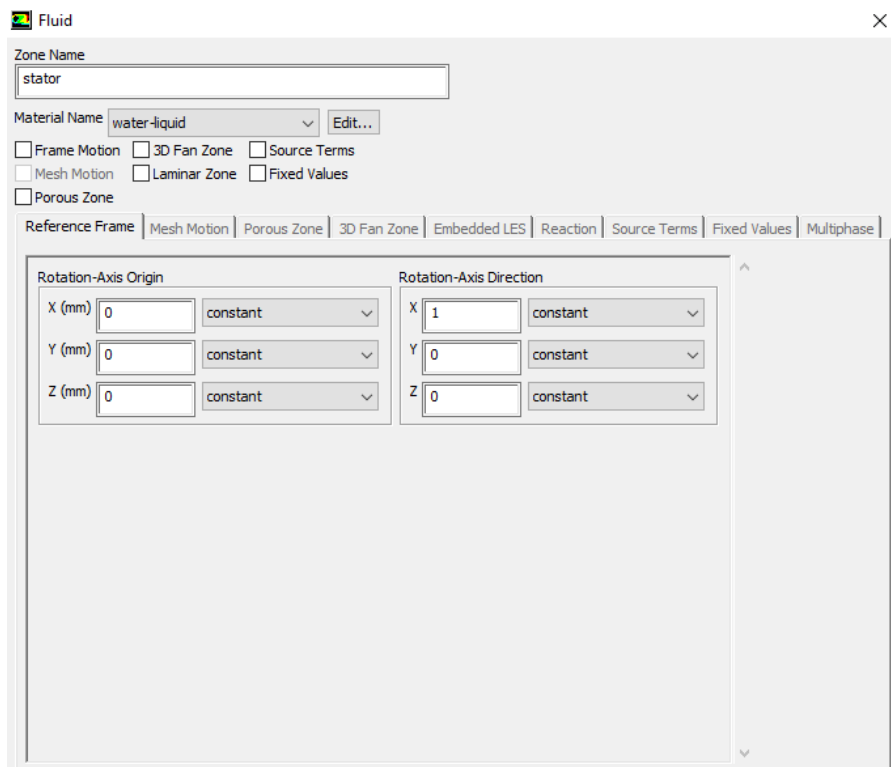
Dalším krokem je pro metodu MRF přidělit funkce objemům a to je provedeno v kolonce „Edit“.

- „rotor“ je dle názvu logicky rotující částí, a to kolem osy „X“ (nastaveno „1“ a „0“). Je tedy nutno zaškrtnout „Frame Motion“ a absolutní pohyb buněk („Relative to cell zone - absolute“). Pro všechny simulace obou látek kapaliny je zvolena rychlost otáčení 10 000 *rpm* („Rotates per Minute“, tzn. *ot/min*).
- „stator“ je nehybný. Nastaven je stejně bez zaškrtnutí „Frame motion“.

Vše je zobrazeno na následujících obrázcích.



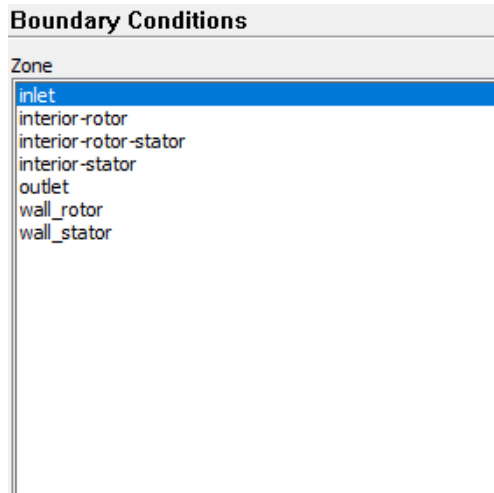
Obr. 93. Nastavení MRF pro rotorovou část (rotor)



Obr. 92. Nastavení MRF pro statorovou část (stator)

5) Okrajové podmínky („Boundary Conditions“)

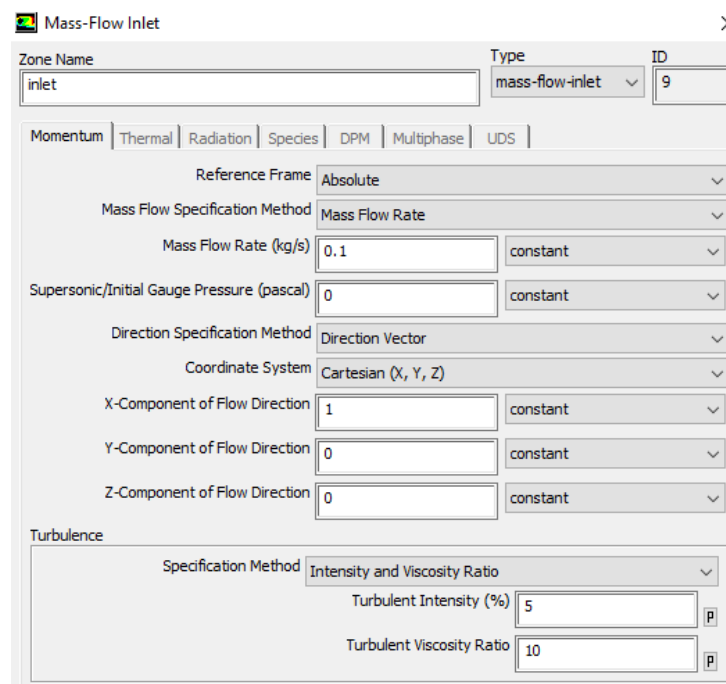
Na následujícím obrázku je zobrazen výpis všech množin ploch, které mají každá své identifikační číslo (ID). Tyto množiny ploch je potřeba dále definovat pomocí kolonky „Type“ a „Edit“.



Obr. 94. Výpis množin ploch

- Vstupní plochy („inlet“)

Pro tyto plochy je odhadem zvolen vstupní hmotnostní tok („mass-flow-inlet“) 0,1 kg/s, vše ostatní je ponecháno defaultní, viz následující obrázek.



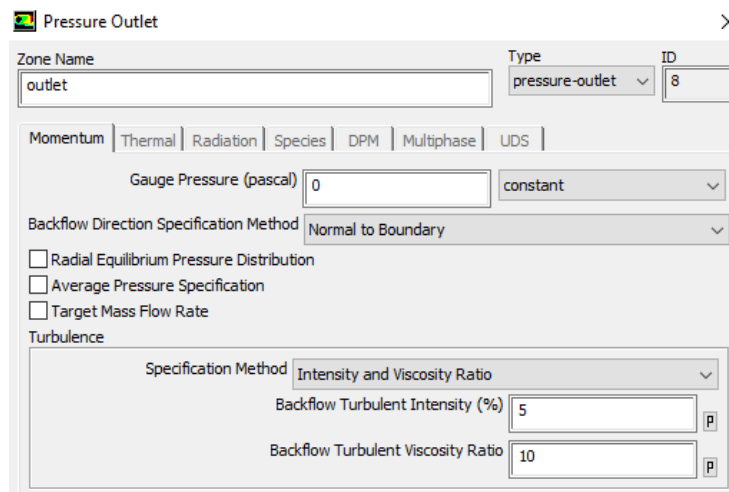
Obr. 95. Nastavení pro vstupní plochy (inlet)

- Vnitřní plochy na rozhraní („interior“)
Plochy („interior-rotor“, „interior-rotor-stator“, „interior-stator“) tvoří rozhraní mezi objemy stator - rotor a jsou automaticky nastaveny jako typ interior. Jejich ID je taktéž automaticky vygenerováno, viz následující obrázek.



Obr. 96. Vnitřní plochy tvořící rozhraní (interior)

- Výstupní plochy („outlet“)
Na výstupních plochách je nastavena metodika výpočtu založená na změně tlaku („pressure-outlet“), další nastavení je ponecháno defaultní, viz následující obrázek.



Obr. 97. Nastavení pro výstupní plochy (outlet)

- Stěny rotoru („wall_rotor“)
Pro stěny rotoru je „Type“ nastaven jako stěna („wall“). Další důležité nastavení je specifikace, že se tyto stěny pohybují („Moving Wall“) absolutně vůči systému („Absolute“) a že tento pohyb je rotační („Rotational“). Dále je opět nastavena rychlost otáčení, tj. 10 000 rpm a osa rotace „X“. Další nastavení je ponecháno defaultní, viz následující obrázek.

Zone Name: wall_rotor, Type: wall, ID: 11, Adjacent Cell Zone: rotor

Wall Motion: Stationary Wall, Moving Wall

Motion: Relative to Adjacent Cell Zone, Absolute, Speed (rpm): 10000

Rotation-Axis Origin: X (m): 0, Y (m): 0, Z (m): 0

Rotation-Axis Direction: X: 1, Y: 0, Z: 0

Shear Condition: No Slip, Specified Shear, Specularity Coefficient, Marangoni Stress

Wall Roughness: Roughness Height (m): 0, Roughness Constant: 0.5, both set to constant

Obr. 98. Nastavení pro stěny rotoru (wall_rotor)

- Stěny statoru („wall_stator“)

Pro stěny statoru je „Type“ taktéž nastaven jako stěna („wall“). Zde je důležitá specifikace nastavení, že se tyto stěny nepohybují („Stationary Wall“). Další nastavení je ponecháno defaultní, viz následující obrázek.

Zone Name: wall_stator, Type: wall, ID: 10, Adjacent Cell Zone: stator

Wall Motion: Stationary Wall, Moving Wall

Motion: Relative to Adjacent Cell Zone

Shear Condition: No Slip, Specified Shear, Specularity Coefficient, Marangoni Stress

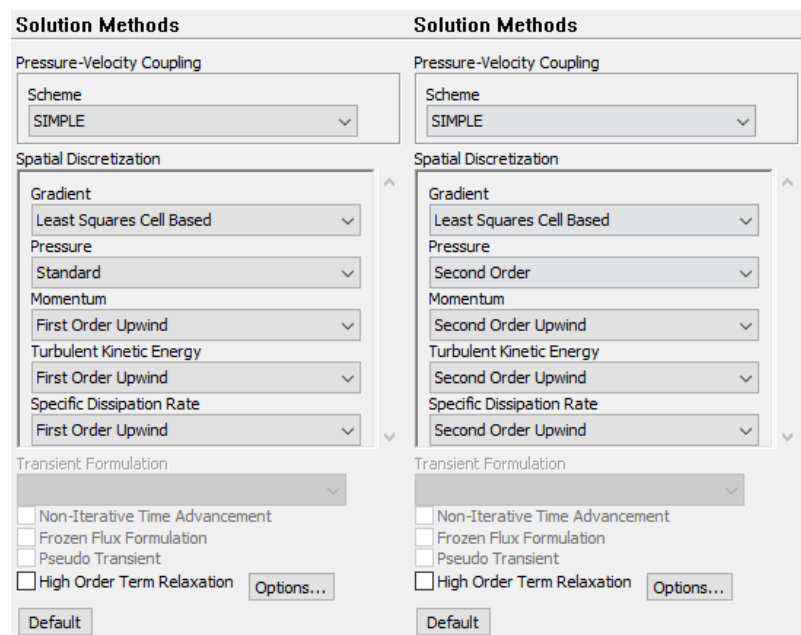
Wall Roughness: Roughness Height (mm): 0, Roughness Constant: 0.5, both set to constant

Obr. 99. Nastavení pro stěny rotoru (wall_stator)

6) Výpočtové metody („Solution Methods“)

V tomto kroku je zvolen prostý přístup k výpočtu („SIMPLE“) z hlediska vztahu rychlosti a tlaku („Pressure-Velocity Coupling“). Dále je v kartě prostorová diskretizace („Spatial Discretization“) vybrán určitý řád přesnosti a to buďto první („First Order“), nebo druhý („Second Order“).

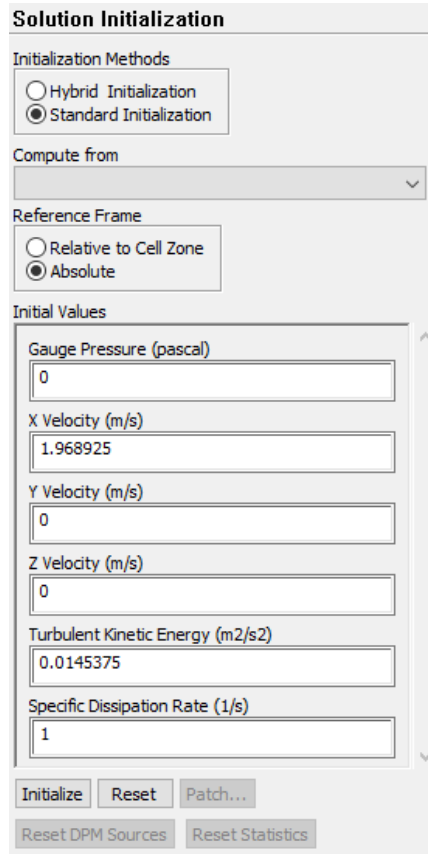
Pozn.: Nejdříve je provedena simulace s prvním řádem přesnosti. Poté následuje simulace s druhým řádem přesnosti, která pro konvergenci využívá data z předchozí simulace, což umožňuje vypočítat přesnější výsledky. Pro závěrečné porovnání experimentu s numerickou simulací, jsou logicky brána v potaz především data s druhým řádem přesnosti.



Obr. 100. Nastavení specifikace výpočtové metody

7) Inicializace řešení („Solution Initialization“)

Zde je nastavena standardní inicializační metoda („Standard Initialization“) s defaultním nastavením. Tu je nutno provést, ale jen před simulací prvního řádu („First Order“). Pokud by byla provedena i před simulací druhého řádu („Second Order“), byla by data pro lepší konvergenci zcela ztracena, tudíž by druhý řád postrádal smysl.



Solution Initialization

Initialization Methods

Hybrid Initialization
 Standard Initialization

Compute from

Reference Frame

Relative to Cell Zone
 Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)
0

X Velocity (m/s)
1.968925

Y Velocity (m/s)
0

Z Velocity (m/s)
0

Turbulent Kinetic Energy (m²/s²)
0.0145375

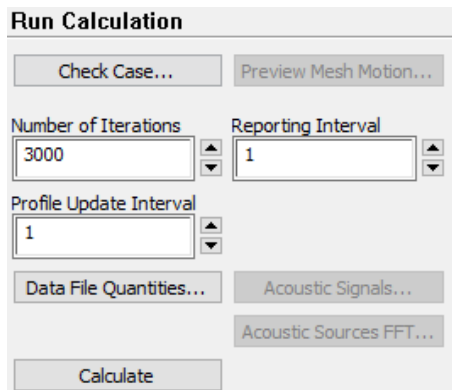
Specific Dissipation Rate (1/s)
1

Initialize Reset Patch...
Reset DPM Sources Reset Statistics

Obr. 101. Nastavení inicializační metody

8) Spuštění simulace

Poslední krokem před spuštěním samotné simulace je nastavení počtu iterací, po kterých je předpokládána konvergence řešení. Pro všechny čtyři simulace je nastaven počet iterací na 3000, nicméně v případě vazkého glycerinu (převládají vazké síly) je konvergující řešení předpokládáno dříve (pod 1000). V této části je dále možné ještě jednou zkontrolovat celý případ („Check Chase“) a poté pomocí tlačítka „Calculate“ přejít k startu simulace.



Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Number of Iterations Reporting Interval
3000 1

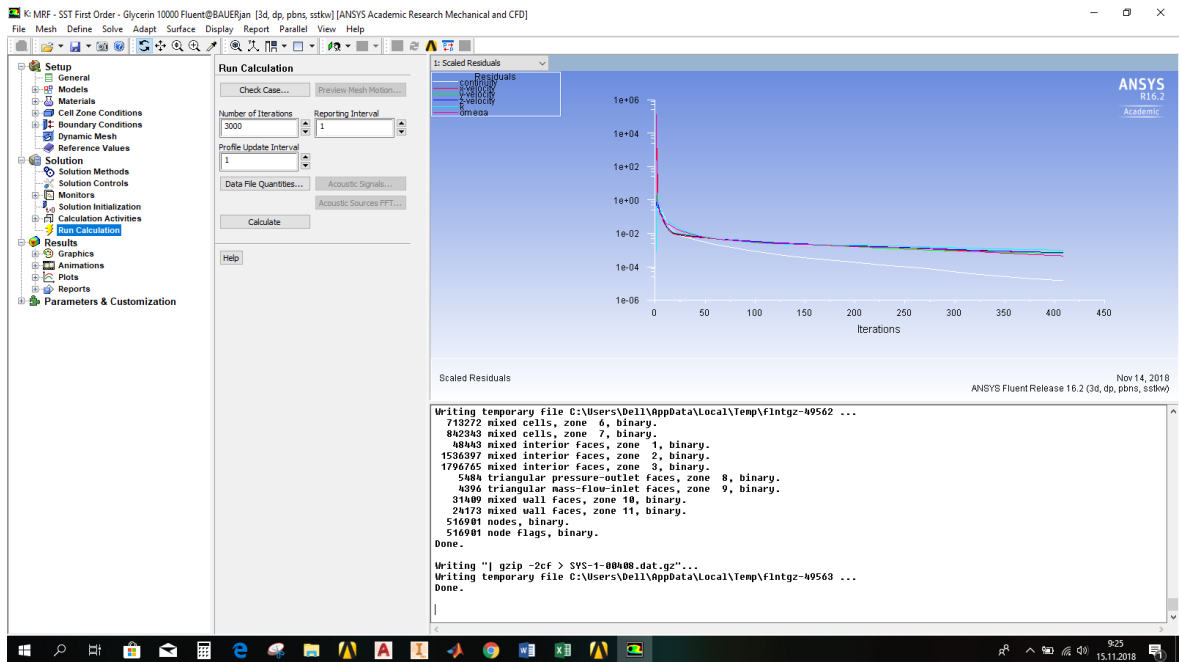
Profile Update Interval
1

Data File Quantities... Acoustic Signals...
Acoustic Sources FFT...

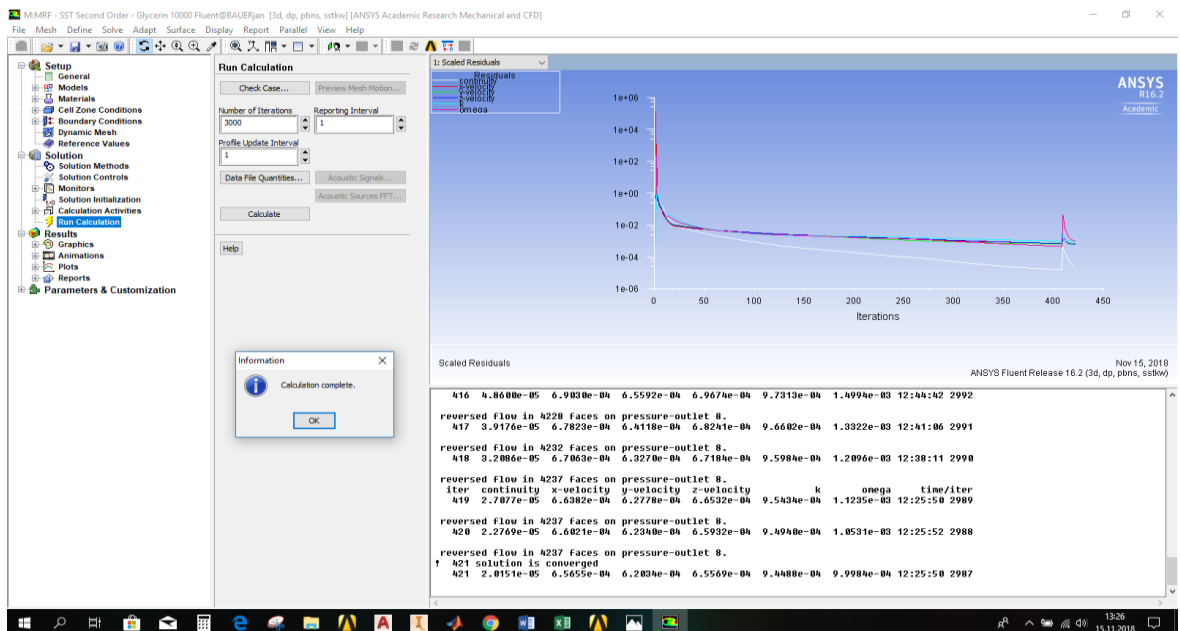
Calculate

Obr. 102. Zobrazení finálního okna před kalkulací

Pro představu návaznosti konvergencí jsou na následujících obrázcích znázorněny průběhy numerických simulací pro glycerin.



Obr. 103. Výsledky simulace s prvním řádem přesnosti (First Order)

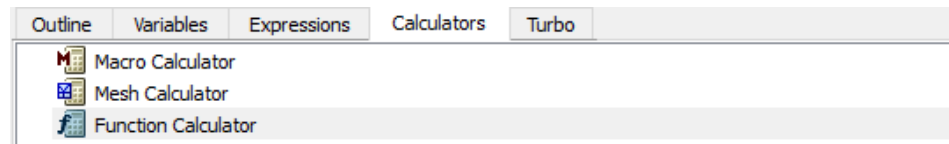


Obr. 104. Výsledky simulace s druhým řádem přesnosti (Second Order)

Pozn.: Na výše uvedeném obrázku je vidět, že konvergující řešení u simulace „MRF - SST Second Order - Glycerin 10000“ nastalo již po 421 iteracích.

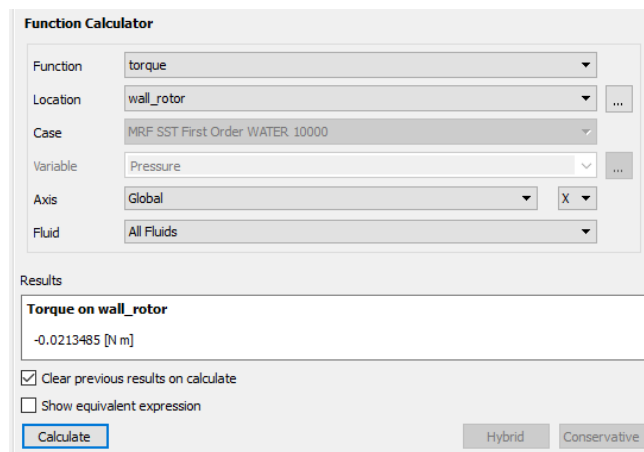
P1.8. Vyhodnocení krouticího momentu

Krouticí moment M_k lze vypočítat pomocí funkce „Calculators“, dále potom „Function Calculator“, jak je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 105. Postup výpočtu krouticího momentu M_k pomocí funkce Function Calculator

Podle nastavení, uvedeného na následujícím obrázku, je vypočten krouticí moment M_k („Calculate“) na ose „X“ v celém objemu („All Fluids“) na stěnách rotorové části („wall_rotor“). Jeho hodnota je uvedena v okně výsledků (Results).



Obr. 106. Nastavení pro výpočet krouticího momentu M_k

Pozn.: Na výše uvedeném obrázku je pouze ilustrativně zobrazen postup pro „MRF SST First Order WATER 10000“. Pro zbývající tři simulace je nastavení totožné a hodnoty všech krouticích momentů jsou uvedeny v tabulce v kapitole 4.4.1.



P2. Příloha 2 - Experimentální měření

P2.1. Měření dynamické viskozity

Postup měření dynamické viskozity je následující:

1) Příprava měřicí soustavy

Nejprve je sestavena temperační nádoba (po správném složení zespodu vodotěsná), která je složena z temperačního válce, stacionárního válce s odnímatelným bajonetovým dnem a pojistného vodotěsného uzávěru. K této nádobě jsou pomocí převlečného upínacího systému připojeny dvě temperační hadice. V těchto hadicích proudí voda z termostatu o určité teplotě, která je nastavena v řídicí části termostatu, a tím zajišťuje požadovanou teplotu měřené kapaliny v temperační nádobě. Dále je z nádoby k hlavě viskozimetru připojen termočlánek (Pt100), který pro ještě jednu kontrolu měří teplotu kapaliny v nádobě (hlavní teplota je uvažována z termostatu - přesnější údaj).

Pozn.: V topné části termostatu se vyskytuje čidlo kontrolující stav hladiny temperující destilované vody. Tuto hladinu je třeba dodržovat, jinak přístroj nefunguje správně a hlásí chybu.

2) Nalítí měřené kapaliny

Pomocí plastové kádinky je odměřeno přibližně 70 ml měřené kapaliny, která je posléze opatrně vлита shora do temperační nádoby (konkrétně do stacionárního válce s vodotěsným dnem)

3) Zajištění rotačního válce

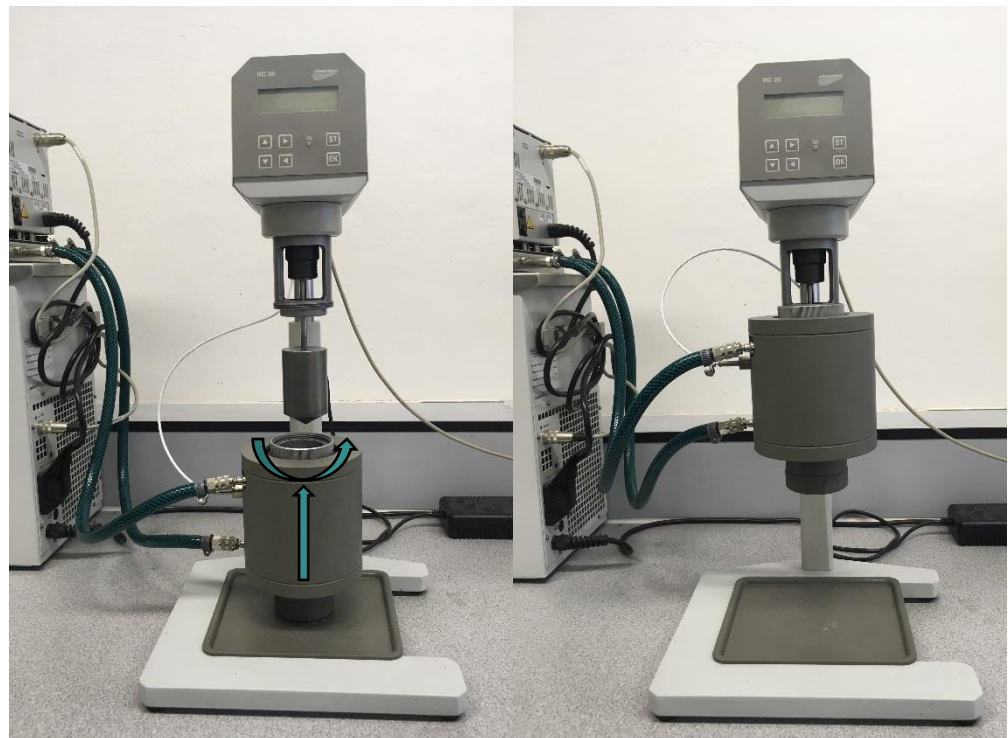
Do hlavy rotačního viskozimetru je pomocí převlečného bajonetového upínacího systému vložen rotační válec.

Pozn.: Pro kontrolu korektního upnutí válec, musí válec „zacvaknout“.

4) Dokončení měřicí soustavy (rotační viskozimetr - termostat)

Pro dokončení finální podoby měřicí soustavy je vsunuta kompletní temperační nádoba do svislého rotačního válece (již upevněného v hlavě viskozimetru). Poté je napevno spojena s hlavou viskozimetru pomocí úchytného závitu (jedná se o soustavu dvou sousých válců).

Pozn.: V případě glycerinu bude kapalina (z důvodu vyšší viskozity) při zasouvání klást větší odpor než 50% vodný roztok glycerinu.



Obr. 107. Měřicí soustava dynamické viskozity (rotační reometr - termostat)

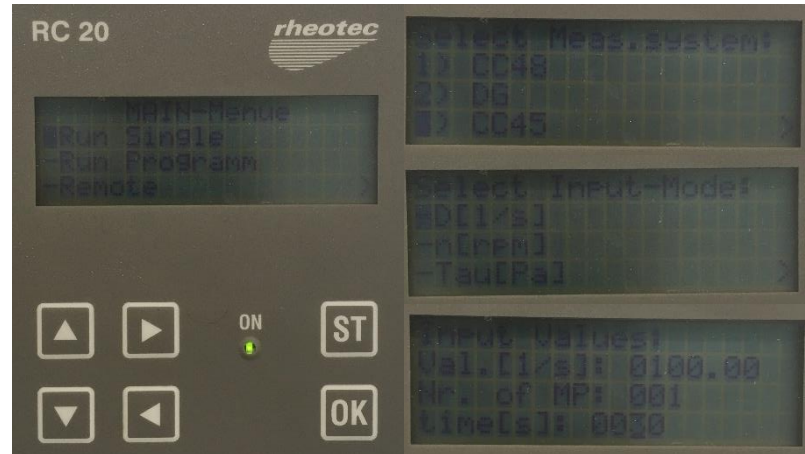
6) Nastavení rotačního viskozimetru

Před zahájením měření dynamické viskozity je pomocí šipek nastaveno několik vstupních parametrů. V prvním kroku je v hlavním menu („MAIN-Menu“) zvolena funkce pro 1 měření („Run Single“). V dalším kroku nastavení je vybrán měřicí systém („Select Measuring system“), tedy rotační prvek viskozimetru („válec CC48“). Následuje výběr módu vstupního parametru („Select Input-Mode“), kde je vybrána smyková rychlost D [1/s].



V posledním kroku nastavení jsou definovány parametry vstupního módu („Input Values“). Je to smyková rychlost, počet opakování („Number of Multiple“) a především délka měření („time“) t [s].

Postup tohoto kroku je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 108. Postup nastavení rotačního viskozimetru