



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Procesní charakteristiky míchadel Visco-Jet

Process Characteristics of Visco-Jet agitator

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Alexander KOLOMIETS

Studijní program: N 2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301T026 PROCESNÍ TECHNIKA
Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Konzultant: Ing. Jan Skočilas, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kolomiets** Jméno: **Alexander** Osobní číslo: **396728**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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 míchadel Visco-Jet

Název diplomové práce anglicky:

Process characteristics of Visco-Jet agitator

Pokyny pro vypracování:

Analyzujte proudění v míchané vsádce s míchadlem typu Visco-Jet. Zaměřte se zejména na zmapování integrálních procesních parametrů potřebných pro návrh průmyslových míchacích zařízení s těmito míchadly. Podrobně se zaměřte na:

1. Zhodnocení využití tohoto typu míchadla pro průmyslové aplikace z hlediska principu vyvození toku v míchané vsádce.
2. CFD simulace proudění v míchané vsádce tvořené homogenní kapalinou.
3. Proveďte základní experimenty pro zhodnocení výsledků numerických simulací.

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce a vlastní řešerše

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:

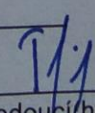
Ing. Jan Skočilas Ph.D., ústav procesní a zpracov. techniky FS

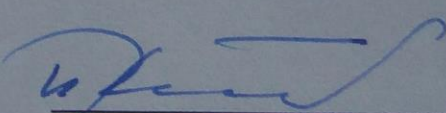
Datum zadání diplomové práce: **10.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.06.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

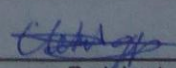

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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.

24.-04-2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

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

V Praze dne:

Alexander Kolomiets

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce, prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D., za jeho podporu, za udělené rady při jejím vypracování. Dále děkují konzultantovi práce, Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D., za cenné rady při jejím zpracování a čas strávený na konzultacích. V neposlední řadě děkuji Ing. Jiřímu Moravcovi, Ph.D. za pomoc při měření, své rodině a přátelům za jejich podporu během studia.

Anotační list

Jméno autora:	Alexander Kolomiets
Název DP:	Procesní charakteristiky míchadel Visco-Jet
Anglický název:	Process Characteristics of Visco-Jet agitator
Rok:	2017
Studijní program:	N 2301 Strojní inženýrství
Obor studia:	2301T026 Procesní technika
Ústav:	12118 Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Vedoucí DP:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jan Skočilas, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran 43
	počet obrázků 32
	počet tabulek 16
	počet příloh 1
Jazyk práce:	Český

Anotace: Tato práce se zabývá určením příkonové charakteristiky a charakteru proudění míchadla Visco Jet. Práce obsahuje výsledky dvou experimentů a CFD simulace míchání čtyř modelů proudění.

Klíčová slova: Míchání, míchadlo, Visco Jet, CFD, příkonová charakteristika

Abstract: This work is focused on the determination of the power number and flow characteristics of the Visco Jet agitator. The paper contains results of two experiments and a CFD simulation of the mixing of four flow models.

Keywords: Mixing, agitator, Visco Jet, CFD, power number

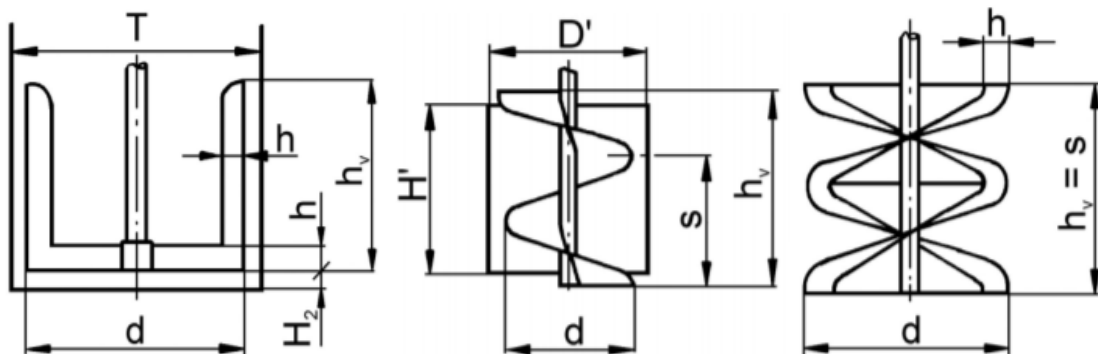
Obsah

1 Úvod.....	8
2 Rešerše.....	10
2.1 Pomaloběžná míchadla	10
2.1.1 Kotvové míchadlo	11
2.1.2 Pásové míchadlo.....	11
2.1.3 Šroubové míchadlo.....	12
2.2 Míchadlo Visco Jet.....	12
3 Provozní charakteristiky.....	14
4 Numerické řešení	15
4.1 Laminární oblast.....	15
4.2 Přechodná oblast	15
4.3 Turbulentní oblast	15
4.3.1 RANS metoda.....	16
4.3.2 LES metoda	17
4.3.3 DNS metoda.....	17
5 Teorie	18
6 Volba modelu pro výpočet.....	19
6.1 Laminární model	19
6.2 Standard k- ϵ model	19
6.3 Standard k- ω model	20
6.4 k-kl- ω Transition Model	21
7 Definice úlohy	24
8 Experimentální část.....	26
8.1 Vizuální experiment	26
8.2 Měření krouticího momentu.....	27

8.2.1 Kalibrace	28
8.2.2 Měření	30
9 CFD simulace míchání	32
9.1 Tvorba modelu	32
9.2 Úprava geometrie	33
9.3 Tvorba sítě	34
9.4 Nastavení simulace	36
9.5 Simulace	37
9.5.1 Simulace laminárního modelu	37
9.5.2 Simulace Standard k- ϵ modelu	38
9.5.3 Simulace Standard k- ω modelu	39
9.5.4 Simulace k-kl- ω Transition modelu	40
9.6 Výsledky simulace	41
10 Výsledky	43
10.1 Popis proudění	43
10.2 Vyhodnocení příkonového čísla ze simulace	43
10.3 Vyhodnocení příkonového čísla z experimentu	45
11 Diskuze	47
11.1 Porovnání proudění	47
11.2 Porovnání $Po = f(Re)$	47
11.2.1 Interval konfidence	48
12 Závěr	50
Seznam použitých symbolů	51
Seznam použité literatury	52

1 Úvod

Míchání je jedním z klíčových procesů pro výrobu plastů, fermentace, vytvoření disperzních roztoků a emulzí, potravinářský, chemický, farmaceutický průmysl a mnoho dalších. V dnešní době existuje spousta způsobů míchání, a míchacích zařízení. Zvláštním případem je míchání vysokoviskózních kapalin. Tento proces je poměrně těžký a energeticky náročný, protože je potřeba vyvolat velký krouticí moment pro překročení sil vazkého tření uvnitř kapaliny a vytvoření pohybu. Při tomto pohybu musí být přítomné velké axiální síly pro dobré promíchávání a tento proces musí probíhat za nejkratší čas. Z těchto důvodů probíhá míchání vysoko viskózních látek v laminárním režimu za malých otáček míchadla. Typickým zařízením je kotvové, šroubové a pásové míchadlo (viz. Obr.1). Tyto míchadla mají velkou plochu lopatek a jejich průměr je o málo menší než průměr míchané nádoby (u kotvového míchadla je poměr průměru nádoby ku průměru míchadla roven 1,15, u pásového je 1,05), proto způsobují velké zatížení na ložiska, motor a potřebují velké množství energie.



Obr. 1 Kotvové, šroubové a pásové míchadlo [1]

V dnešní době jedním z hlavních směru rozvoje průmyslu je snižování spotřeby energie, a to včetně míchacích procesů. Proto se neustále objevují nové typy míchadel, jedním z nich je míchadlo typu Visco Jet, které vynalezl Kurt Walter Wyss v roce 1989 [2]. V dnešní době vyrábí tento typ zařízení německá firma VISCO JET® GmbH, která popisuje svůj výrobek jako vysoce efektivní a s menší, v porovnání s ostatními typy míchadel, energetickou spotřebou [3], což potvrzuje neustálé rozšíření produktu po celém světě. Sice se míchadlo objevilo v roce 1989, doteď nejsou popsány jeho příkonová charakteristika, oblast proudění, ve které pracuje míchadlo, a charakter toku kapaliny.

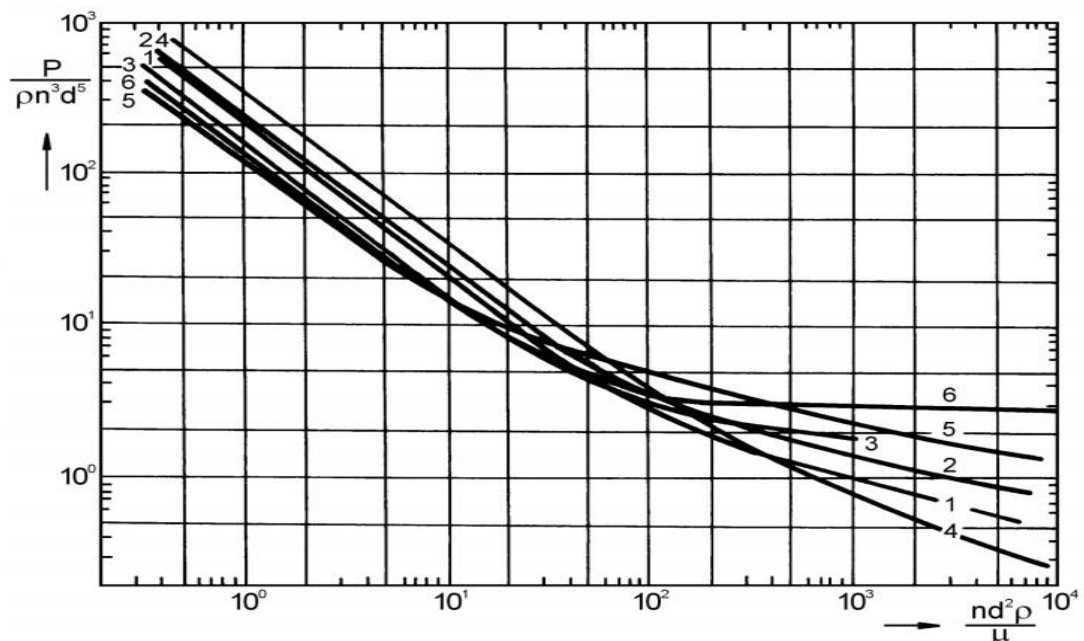
Popis charakteristik může stát základním bodem pro podrobnější analýzu míchadla (průtokové číslo, rychlost proudění a závislost charakteristik na geometrie) a pro volbu optimálního míchadla. Cílem této práce je stanovení příkonové charakteristiky a charakteru toku pomocí experimentů a numerické simulace míchání vsádky. Numerická simulace probíhala v programu ANSYS Fluent. Po simulaci z výchozích dat byla sestavena závislost příkonového čísla na Reynoldsovem čísle a taky grafické znázornění proudění vsádky uvnitř lopatky. Dále bylo provedeno porovnání dat z měření a simulace. Cílem porovnání je ověření možnosti nahrazení experimentu simulací a stanovení optimálního simulačního modelu.

2 Rešerše

Viskozita je fyzikální veličina, která popisuje vnitřní tření kapaliny, vyvolané pohybem molekul proti sobě. Rozlišujeme dva typy viskozity. Dynamická viskozita popisuje odpor kapaliny vůči vlastnímu pohybu a má jednotky Pa.s. Kinematická viskozita je podílem dynamické viskozity a hustoty kapaliny a má jednotky m^2s^{-1} . Kapaliny s vysokou viskozitou se nazývají látky, které mají dynamickou kapalinu v rozsahu 0,1 až několik tisíc Pa.s. Takovými látkami jsou například laky, zubní pasty, gely, čokoláda, máslo atd. Pro míchaní kapalin s vysokou viskozitou se používá speciální míchadla anebo v poslední době rychloběžná míchadla typu Visco Jet.

2.1 Pomaloběžná míchadla

Nejpoužívanější typ míchadel, které pracují v rozsahu otáček 0 až 100 min^{-1} . Hlavními typy jsou kotvové, šroubové a pásové míchadla. Průměr takových míchadel je skoro stejný s průměrem nádoby (80 až 95 % průměru nádoby). Příkonové charakteristiky pomaloběžných míchadel jsou znázorněny na obrázku 2.

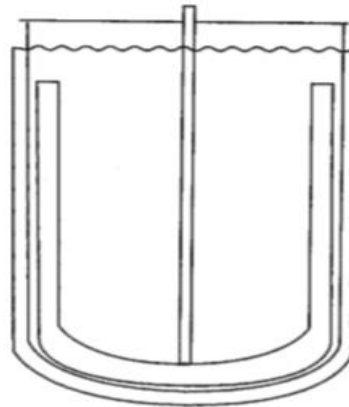


1 – kotvové míchadlo (CVS 69 1014), 2 – šroubové míchadlo s usměrňovacím válcem (CVS 69 1028), 3 – šroubové míchadlo umístěné excentricky, 4 – pásové míchadlo (CVS 69 1029), 5 – listové míchadlo (CVS 60 1016), 6 – čtyřnásobné lopatkové míchadlo umístěné excentricky

Obr.2 Příkonové charakteristiky pomaloběžných míchadel [1]

2.1.1 Kotvové míchadlo

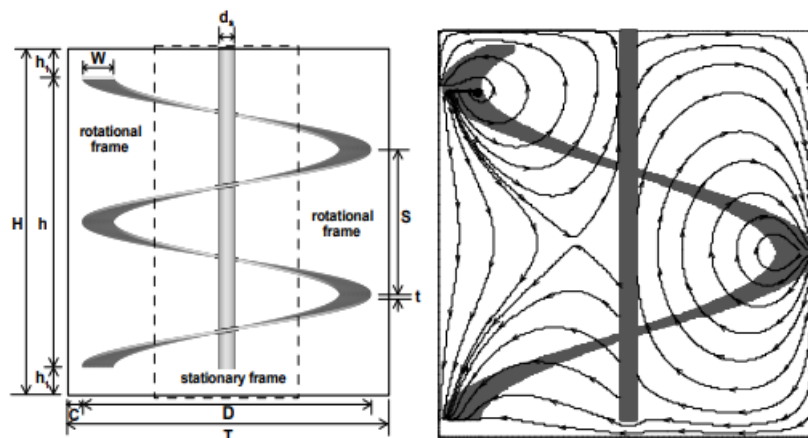
Je to míchadlo, které má tvar písmena „U“ (viz. Obr. 3). Používá se pro míchání kapalin s viskozitou 5 až 50 Pa.s. [4]. Tok vsádky je tangenciální. Míchadlo vyvolává velký kroučící moment a potřebuje zesílení lopatek proti jejich ohybu, což zvyšuje vlastní hmotnost míchadla a jeho energetickou spotřebu.



Obr. 3 Kotvové míchadlo [4]

2.1.2 Pásové míchadlo

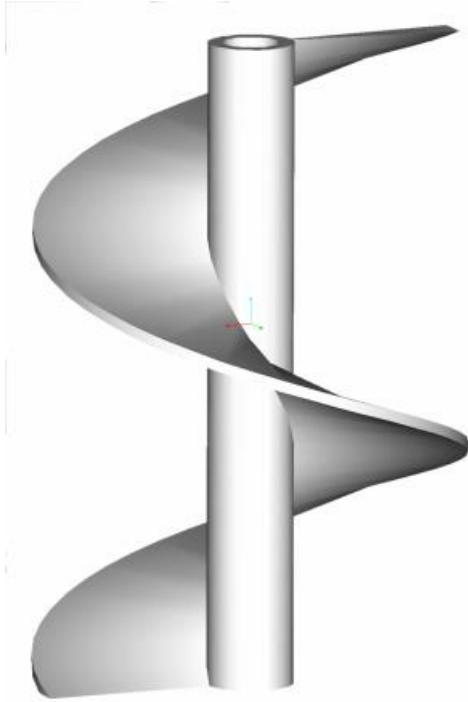
Míchadlo, které má lopatku ve tvaru pásu spirály (viz. Obr. 4 a). Rozsah otáček je jednotky až desítky za minutu. Charakter toku je složitý a představuje několik uzavřených smyček (viz. Obr. 4 b). Nevýhodou tohoto zařízení je vysoká energetická náročnost a složitost čištění.



Obr. 4 a) Pásové míchadlo, 4 b) Charakter toku kapaliny [5]

2.1.3 Šroubové míchadlo

Míchadla tohoto typu mají tvar šroubovice (viz. Obr. 5). Míchání probíhá ve vertikálním směru. Rozsah otáček je jednotky až desítky za minutu. Jako u předchozích variant, nevýhodou je vysoká energetická náročnost a velká hmotnost zařízení.



Obr. 5 Šroubové míchadlo [1]

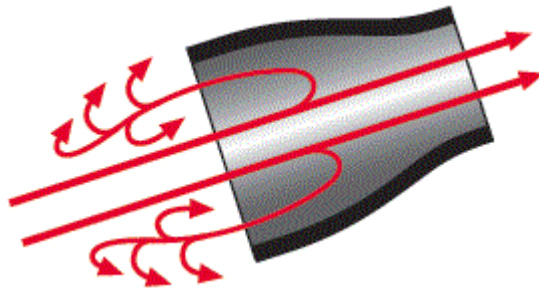
2.2 Míchadlo Visco Jet

Míchadlo Visco Jet má speciální geometrie představující dvoukuželový náboj, se kterým jsou spojené tři lopatky pomocí válcových ramen. Každá lopatka se představuje usečený rotační kužel s válcovými segmenty na vstupní a výstupní části lopatky (viz. Obr. 6). Masoud Rahimi a kolegové z univerzity Razi a Kuwait ve své práci experimentálně stanovily závislost optimálního příkonu a axiálního průtoku na poměru vstupního a výstupního otvoru a zjistily, že ideální poměr je roven 0,5 [6]. Lopatky jsou skloněny vůči středu míchadla. Kurt W. Wyss v patentu uvádí uhel sklonu v rozsahu 10° až 20° v závislosti na uhlu kužele [2]. Společnost Heidolph Instruments na svých internetových stránkách uvádí doporučený poměr průměrů nádoby a míchadla je 1,7 až 2,5 [7].



Obr. 6 Míchadlo Visco Jet [3]

Princip práce je založen na dynamickém proudění vsádky. Za malých otáček kapalina vtéká skrz větší otvor dovnitř lopatky a vystupuje z menšího otvoru s vyšší rychlostí. Část této kapaliny je zachycená následující lopatkou a celý proces se opakuje. Za vysokých otáček začíná převažovat dynamický tlak a část vsádky se začíná otáčet ve směru otáčení míchadla. Pro lepší pochopení na obr. 7 je znázorněno proudění uvnitř lopatky.



Obr. 7 Směr proudění kapaliny uvnitř lopatky míchadla [3]

3 Provozní charakteristiky

Úkolem této práce je definování provozních charakteristik míchadla. Základními parametry popisujícími míchací zařízení jsou příkon, příkonové číslo, krouticí moment a Reynoldsovo číslo.

Reynoldsovo číslo nám ukazuje, zda míchaní probíhá v laminárním nebo turbulentním režimu. Pro míchací zařízení se tento parametr stanoví podle vzorce:

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\mu} \quad (3.1)$$

Krouticí moment se stanoví experimentálně, pomocí speciálních měřicích přístrojů.

Příkon míchadla spočítáme podle vzorce:

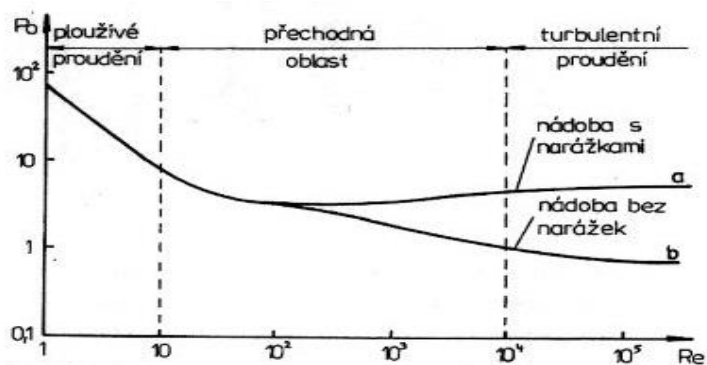
$$P = 2Mk\pi n \quad (3.2)$$

Vypočtený příkon pak převedeme na bezrozměrnou hodnotu, kterou známe jako „Příkonové číslo“. Tento parametr stanovíme podle vzorce:

$$Po = \frac{P}{n^3 d^5 \rho} \quad (3.3)$$

Příkonové číslo umožňuje nám navrhnout míchadlo stejného typu na základě znalosti požadovaného příkonu otáček a hustoty kapaliny.

Po určení všech parametru sestrojíme graf závislosti příkonového čísla na Reynoldsovem čísle. Tato závislost se nazývá Příkonová charakteristika míchadla. Typický tvar této závislosti v logaritmických souřadnicích je na obr. 8.



Obr. 8 Příkonová charakteristika míchadla [8]

4 Numerické řešení

Numerické řešení závisí na režimu proudění kapaliny. Pohyb kapaliny můžeme popsat pomocí Navier-Stokesove rovnice ve tvaru:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{f} \quad (4.1)$$

A rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.2)$$

Každou rovnici pak rozepíšeme dle složek zvoleného souřadnicového systému. Pro náš případ (cylindrická nádoba je souosá s míchadlem) použijeme cylindrické souřadnice ve tvaru $[r, \varphi, z]$. Pro další výpočty potřebujeme stanovit oblast proudění.

4.1 Laminární oblast

Laminární oblast je charakterizovaná prouděním kapaliny ve vrstvách, které se navzájem nemísí. Proudění probíhá při malých rychlostech a mezi vrstvami se předpokládá platnost Newtonova zákona vazkého tření:

$$\tau = \mu \frac{d\vec{u}}{dz} \quad (4.3)$$

4.2 Přechodná oblast

Přechodná oblast může být popsána jako oblast, ve které kapalina začíná měnit svůj pohyb z laminárního na turbulentní. V této oblasti se začínají vznikat víry.

4.3 Turbulentní oblast

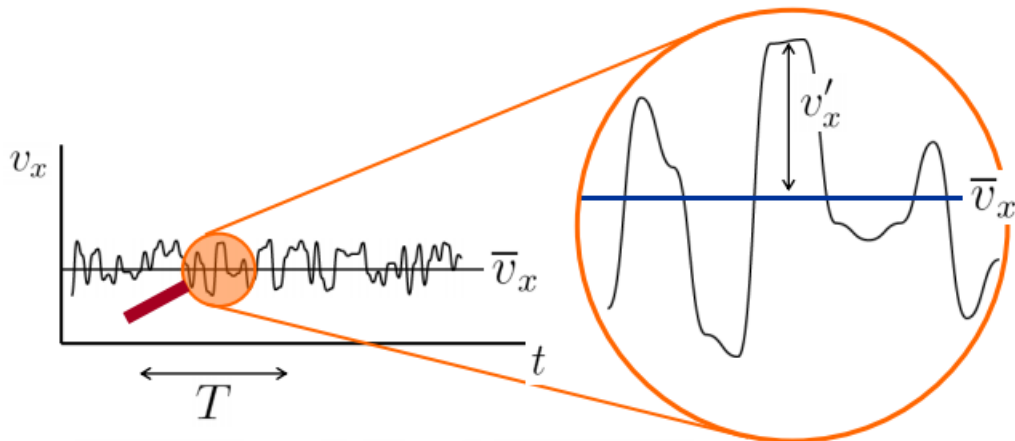
Turbulentní oblast je charakterizovaná vznikem vírů a promícháváním vrstev kapaliny. Částice tekutiny nemají konstantní rychlost, proudění není stacionární. Pro turbulentní

režim existuje několik variant řešení. Nejznámějšími varianty jsou RANS, LES a DNS metody.

4.3.1 RANS metoda

Nejběžnější metodou je RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) rovnice. Princip této metody založen na tom, že při turbulentním proudění kapaliny existuje fluktuace rychlosti (viz obr. 9). Pro výpočet se spočítá střední hodnota rychlosti a střední hodnota fluktuace podle rovnic:

$$\bar{v}_x = \frac{1}{T} \int_0^T v_x dt, \quad \overline{v'_x} = \frac{1}{T} \int_0^T v'_x dt \quad (4.4)$$



Obr. 9 Fluktuace rychlosti při turbulentním proudění [9]

Časové zprůměrování rychlosti pak vložíme do Navier-Stokesove rovnice a po úpravě dostaneme:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{\vec{u}}}{\partial t} + \bar{\vec{u}} \cdot \nabla \bar{\vec{u}} \right) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \cdot \bar{\vec{u}} - \rho \nabla \cdot (\overline{\vec{u}'\vec{u}'}) + \rho \vec{f} \quad (4.5)$$

Kde složka $-\rho \nabla \cdot (\overline{\vec{u}'\vec{u}'})$ se nazývá Reynoldsovo (turbulentní) napětí, které musíme modelovat. Tato metoda je nejméně časově náročná z uvedených metod, klade nejnižší nároky na kvalitu sítě a jedná se o stacionární úlohu (právě díky časovému průměrování).

4.3.2 LES metoda

Další metodou výpočtu je LES (Large Eddy Simulation). Tato metoda umí počítat velké turbulentní víry. Malé víry jsou odstraněny pomocí filtrace (jejich kinetická energie je přepočtena na disipované teplo) a jsou řešeny pomocí subgridních modelů. Tato metoda je náročná na výpočetní techniku a čas, ale ukazuje lepší výsledky než RANS.

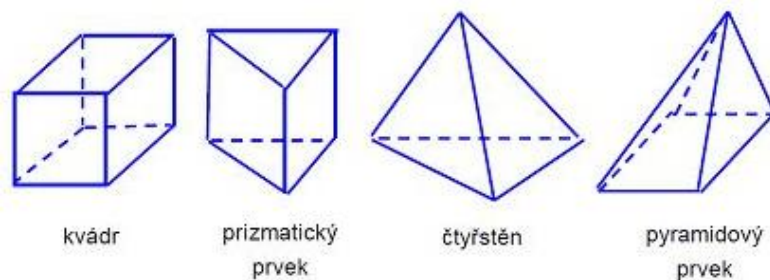
4.3.3 DNS metoda

Poslední metodou výpočtu turbulence je metoda přímé numerické simulace (Direct Numerical Simulation – DNS). Nemodeluje turbulenci, ale řeší všechny víry, včetně nejmenších. Tato metoda potřebuje velmi jemnou síť, přičemž počet buněk narůstá s rostoucím Reynoldsovým číslem $N_{DNS} \approx Re^{9/4}$ [10]. Dalším problémem je nutnost používat velmi jemný časový krok. Z těchto důvodů se tato metoda používá pouze ve výzkumu.

Z důvodu omezení počtu elementů a nutnosti získání výsledků v celém rozsahu otáček pro náš případ byla zvolena RANS metoda.

5 Teorie

Sestava rovnic zvolených modelu má přesné řešení, pokud geometrie systému je prostá a Reynoldsovo číslo je malé. Řešení sestavy rovnic pro složitou geometrii vyžaduje speciální metody. Nejpoužívanější metodou je metoda konečných objemů. Je založena na tom, že celá řešená oblast se rozdělí pomocí sítě na malé objemy ve tvaru čtyřstěnu, jehlanů atd. (viz. Obr. 10). Soustava rovnic se řeší pro každý uzel, stěnu a střed elementů.



Obr. 10 Základní tvary elementů [11]

Hodnoty složek rychlosti jsou umístěny ve středu objemů, hodnoty na stěnách se rovnají hodnotám ve středu objemu, který leží vlevo od stěny (protiproudá interpolace 1. řadu) nebo se získávají interpolací hodnot ležících ve středu sousedních buněk (protiproudá interpolace 2. řadu). Čím menší jsou elementy, tím lepší jsou výsledky a tím menší je odchylka řešení. Velký počet elementů a iterací vyžaduje speciální výpočetní středisko pro řešení proudění kapaliny v zadaném objemu. Takže je potřeba grafického znázornění výchozích dat. Nejlepšími programy jsou ANSYS CFX, ANSYS Fluent, Autodesk Simulation CFD, OpenFOAM. Pro náš případ byl zvolen ANSYS Fluent. Tento program je schopen zpracovávat 2D a 3D úlohy proudění a řešit turbulence pomocí RANS a LES metod. Má možnost zobrazovat výchozí data ve formě čísel, grafů, obrázků a animace. Výhodou je možnost importovat geometrie, vytvořenou v programech Autodesk Inventor, AutoCAD, SolidWorks atd.

6 Volba modelu pro výpočet

Pro správnou volbu rovnic potřebujeme předem stanovit pracovní oblast pro naše míchadlo. Spočítáme Reynoldsovo číslo (dle rovnice č. 3.1) pro celý rozsah otáček. Hodnoty Reynoldsova čísla v závislosti na otáčkách jsou znázorněny v tab. 1.

Tab. 1 Reynoldsovo číslo v závislosti na otáčkách

$n[\text{min}^{-1}]$	Re [-]
200	32,5
300	48,7
450	73,1
500	81,2
600	97,4
700	113,7

Jak je vidět z tabulky, míchadlo pracuje na hranici oblasti plouživého proudění a přechodné oblasti. Z tohoto důvodu zvolíme několik variant řešení pro porovnání.

6.1 Laminární model

Laminární režim řeší soustavu rovnic (Navier-Stokes a rovnice kontinuity). Tento model byl zvolen, protože přechodná oblast není dokonale popsána a není zjištěno, v jakém poměru jsou turbulentní a laminární proudy a je-li možné zanedbat vliv turbulence. Výhodou je jednoduchost a snadná konvergence výsledků. Nevýhodou je vysoká pravděpodobnost nepřesnosti výsledků pro přechodnou oblast proudění. Laminární model byl zvolen spíše s ohledem na vyzkoušení metodiky tvorby celkového výpočetního modelu a rychlého dosažení výsledků.

6.2 Standard k-ε model

Model standart k-ε patří ke dvourovnicovým modelům. Je to semi-empirický model, který navrhly Launder a Spalding v roce 1974. Předpokládá se, že proudění je plně

turbulentní a lze zanedbat vliv viskozity kapaliny. Řeší se rovnice kinetické energie turbulence k a disipace kinetické energie ε :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + (-\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}) \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (-\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6.2)$$

kde

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2}) \quad (6.3)$$

$$\varepsilon = - \frac{dk}{dt} \quad (6.4)$$

$$\mu_t = \rho C_\eta \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6.5)$$

$C_1, C_2, C_\eta, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ jsou konstanty modelu. Hodnoty konstant jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Hodnoty konstant pro k - ε model

C_1	C_2	C_η	σ_k	σ_ε
1,44	1,92	0,09	1	1,3

Výhodou modelu je dostatečná přesnost pro simulaci průmyslových aplikací, stabilita výpočtu a snadná konvergence, avšak model je hůře použitelný pro výpočet systému se silně zakřivenou geometrií a proudy se silnou separací.

6.3 Standard k - ω model

Tento model patří ke dvourovnicovým modelům turbulence. Jde o empirický model, který navrhnul D. C. Wilcox v roce 1988. Model používá kinetickou energii turbulence k , avšak místo disipace kinetické energie se zavedla nová proměnná – specifická disipace energie ω . Hodnoty k a ω se stanoví podle rovnic:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \left(-\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) - \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} \left(-\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) - \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (6.7)$$

kde

$$\mu_t = \rho \alpha^* \frac{k}{\omega} \quad (6.8)$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2}) \quad (6.9)$$

$$\omega \approx \frac{\varepsilon}{k} \quad (6.10)$$

$\beta^*, \beta, \alpha, \alpha^*, \sigma_k, \sigma_\omega$ jsou konstanty modelu, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Hodnoty konstant pro k- ω model

α	α^*	β	β^*	σ_k	σ_ω
0,52	1	0,072	0,09	2	2

Výhodou modelu je vysoká přesnost v blízkosti stěny a při malých hodnotách Reynoldsova čísla. Model velice dobře řeší vnitřní proudy a je použitelný pro silně zakřivenou geometrii. Nevýhodou je malá přesnost modelu ve volném objemu.

6.4 k-kl- ω Transition Model

Tento model navrhly Walters a Cokljat v roce 2008. Je to modifikace k- ω modelu, kde se používá upravené rovnice pro výpočet k a ω a je zavedená třetí rovnice pro výpočet kinetické energie laminárního proudění.

„Klíčovým prvkem kT-kl- ω přechodového modelu navrženého Waltersem a Cokljatem [7] je využití laminární kinetické energie pro modelování nízkofrekvenčních předběžných fluktuací. Koncept laminární kinetické energie byl původně navržen Maylem a Schulzem [26], aby popsal vývoj velkých amplitudových proudových předběžných fluktuací, které vedou k přechodu obtoku. Ačkoli dynamika laminární kinetické energie není v

současnosti plně pochopena, řada vědců jasně ukázala, že selektivita hraniční vrstvy na určité volné proudové vířivé stupnice a zesílení nízkofrekvenčních poruch v mezní vrstvě středním stříhem jsou Rozhodující pro proces přechodu. Kromě toho bylo prokázáno, že růst laminární kinetické energie je lineární vzhledem k Reynoldsovu číslu proudu a koreluje s nízkofrekvenčními normálními výkyvy turbulence volného proudu [27,28]. Tato pozorování naznačují, že by mohl být koncipován fenomenologický přechodový model založený na vhodných měřítkových parametrech schopných modelovat flukтуаční růst výkyvů s nízkofrekvenčním proudem nahoru.

Přechodový model kT - kL - ω zahrnuje tyto známé vlastnosti přechodu hraniční vrstvy na transportní rovnici pro kL s výrobním termínem kvůli přirozenému přechodu, který je vhodně vyjádřen jako funkce Reynoldsova čísla na základě lokální deformační rychlosti [10]. kT - kL - ω přechodový model také obsahuje koncepci smykového úkrytu, který se používá k označení tlumení dynamiky turbulencí v tenkých oblastech s vysokou vířivostí, jako je přechodová hraniční vrstva [29]. V podstatě laminární oblasti hraniční vrstvy odpovídají tlumenému stavu turbulentního roztoku, což má za následek řadu tlumících funkcí pro modelování laminárních oblastí v přechodovém modelu kT - kL - ω . Navíc model zahrnuje přirozený odhad přechodu tím, že zahrnuje předpoklad, že poruchy spojené s vlnami T - S lze modelovat pomocí časového rozmezí, které je úměrné inverzi vorticity. Nakonec kritérium pro přechod na přírodní hraniční vrstvu je funkcí poměru časového období T - S k časovému rozmezí molekulární difúze [7]. Wang a Gaster [30] ukázali, že přechodná Reynoldsova čísla v důsledku zpětně orientovaných kroků korelují s N -faktory získanými z LST. To naznačuje, že přirozený přechod lze modelovat pomocí přístupů zesílení vln / stability. Podle LST a experimentálních pozorování je známo, že takzvaná porucha prvního režimu (tj. Dvourozměrné TS vlny v nestlačitelných tocích) je primární příčinou nestability, zatímco účinek druhého rušení módu je prominentní ve vysokém Ma protéká. Pro reprodukci přechodového chování v hypersonických tocích jsou do modelu přechodu kT - kL - ω zavedeny nestabilní režimy.“ [12]

Rovnice pro výpočet [12]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k_T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k_T u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] + \rho(k_T \omega + P_{kT} + R_{BP} + R_{NAT} + D_T) \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k_L) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k_L u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right] + \rho(P_{kL} - R_{BP} - R_{NAT} - D_L) \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \rho \left[C_{\omega 1} \frac{\omega}{k_T} P_{kT} - C_{\omega 2} \omega^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{C_{\omega R}}{f_W} - 1 \right) \frac{\omega}{k_T} (R_{BP} + R_{NAT}) + C_{\omega 3} f_\omega \alpha_T f_W^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d^3} \right] \end{aligned} \quad (6.13)$$

kde

P_{kT} a P_{kL} jsou podmínky produkce turbulentní a laminární kinetické energie.

D_T a D_L jsou podmínky okolostěnné disipace energie.

R_{BP} a R_{NAT} popisují převod energie z k_L do k_T .

α_T je turbulentní difuzivita

f_W a f_ω jsou koeficienty tlumení

$C_{\omega 1}$, $C_{\omega 2}$, $C_{\omega 3}$, σ_k , σ_ω jsou konstanty modelu.

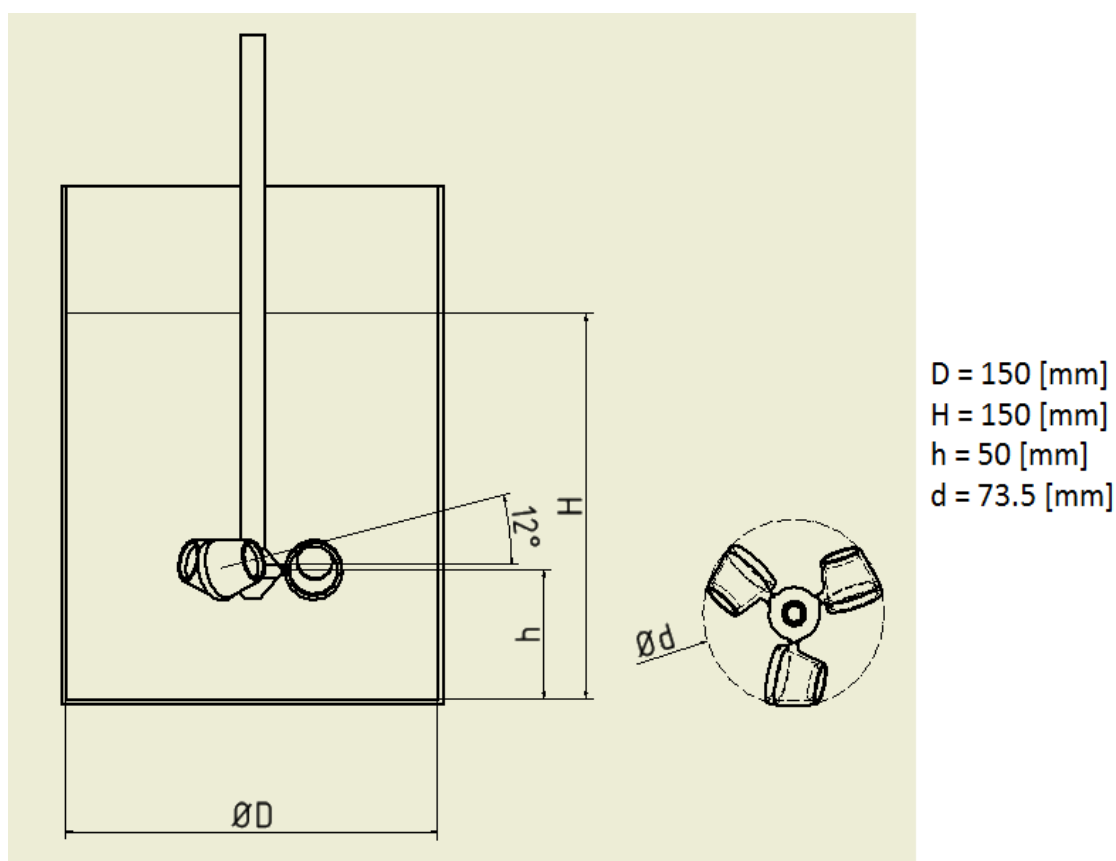
Tab. 4 Hodnoty konstant pro k-kl- ω Transition Model

$C_{\omega 1}$	$C_{\omega 2}$	$C_{\omega 3}$	σ_k	σ_ω
0,44	0,92	0,3	1	1,17

Model k-kl- ω má stejné výhody, jako k- ω model, a navíc je dobře použitelný pro výpočty v přechodné oblasti.

7 Definice úlohy

Míchání probíhá v otevřené skleněné nádobě s plochým dnem. Průměr nádoby je 150 mm. Poměr mezi průměrem nádoby a průměrem míchadla je 2,04 což leží v požadované oblasti. Míchadlo je umístěno v takové výšce nade dnem, aby vzdálenost mezi dnem nádoby a osou lopatky byla 50 mm. Míchadlo je umístěno na hřídeli o průměru 10 mm. Rozsah otáček je 200, 300, 450, 500,600 a 700 min^{-1} . Základní schéma úlohy je znázorněna na obrázku 11.

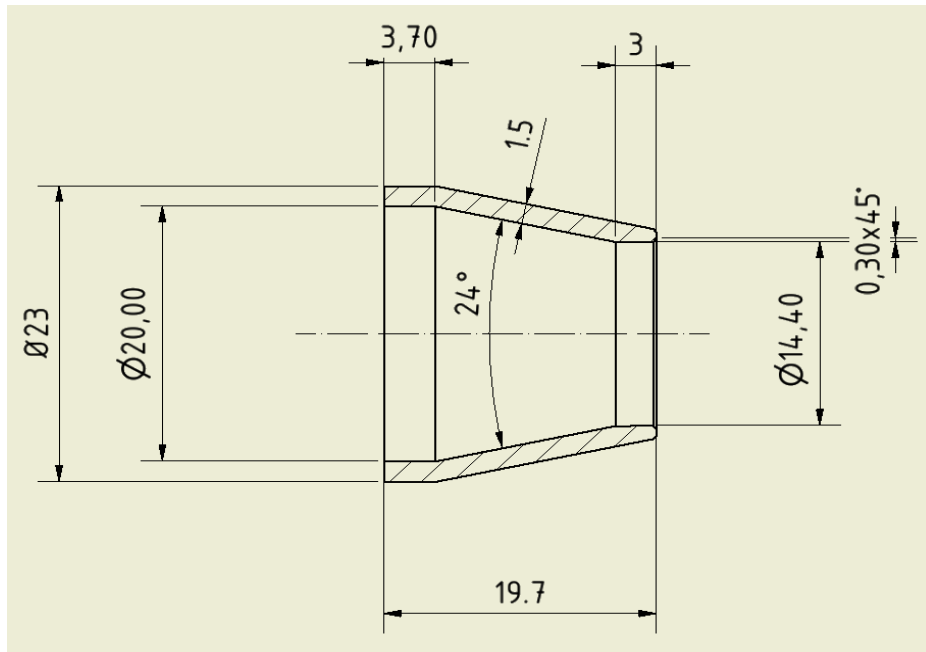


Obr. 11 Schéma úlohy

Pro danou úlohu se používá glycerin – čirá newtonská kapalina. Výška hladiny vsádky se rovná průměru nádoby. Hodnoty viskozity a hustoty byly změřeny v laboratoři rotačním viskozimetrem a pyknometrem. Teplota glycerinu při měření byla 30,5 °C.

Pro stanovení provozních charakteristik je používáno míchadlo o průměru 73,5 mm. Poměr mezi vstupním a výstupním otvorem je 0,72. Vnitřní uhel kužele je 12°. Lopatky jsou skloněny o 12° vůči středu míchadla. Každá lopatka je připojena ke středu pomocí ramene válcového tvaru o průměru 4 mm. Pro spojení míchadla a hřídele se používá

závit typu M8. Materiál míchadla je konstrukční ocel. Parametry lopatky míchadla jsou znázorněny na obrázku 12.



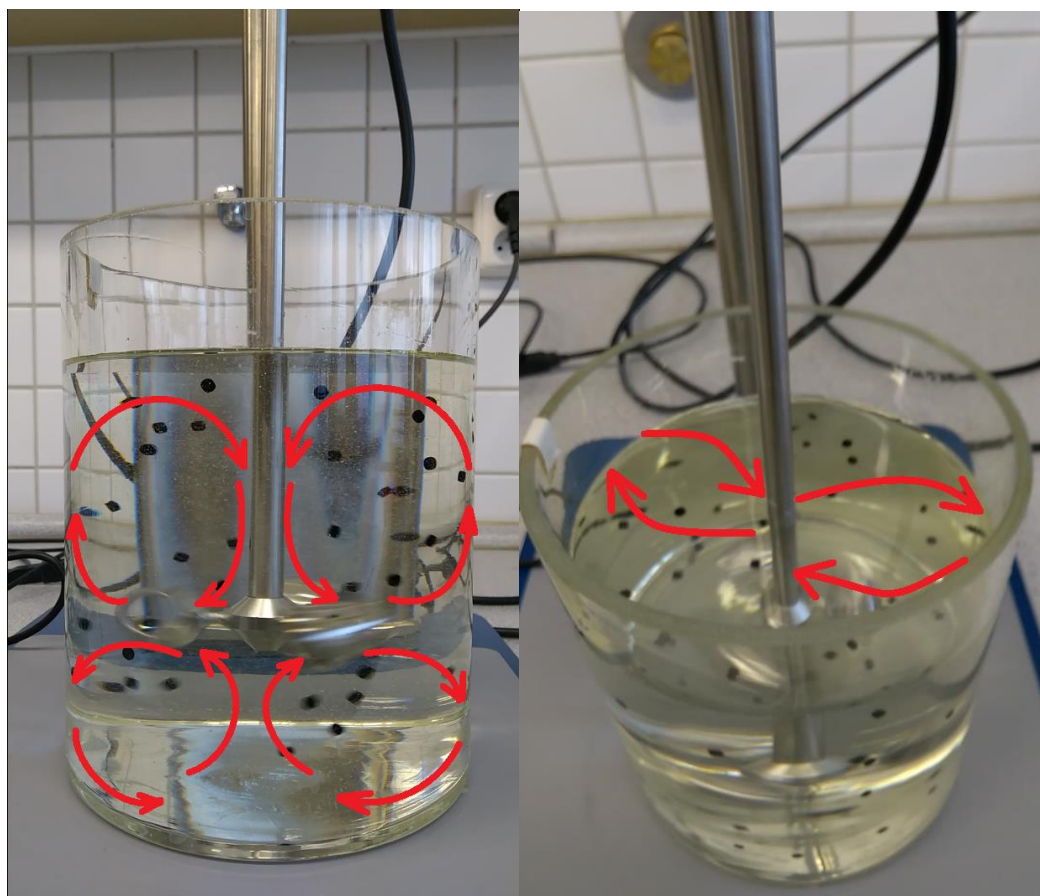
Obr. 12 Základní rozměry lopatky

8 Experimentální část

Při řešení úlohy byly provedeny dva experimenty: experimentální míchání pro vizuální hodnocení směru toku vsadky a experimentální měření kroučícího momentu. Vlastnosti glycerinu, naměřené po experimentálnímu měření momentu byly použity při numerické simulace.

8.1 Vizuální experiment

Cílem experimentu bylo vizuální stanovení směru proudění kapaliny. Byl použit glycerin s dynamickou viskozitou $1,22 \text{ Pa s}$ a hustotou 1273 kg m^{-3} . Vlastnosti glycerinu byly změřeny pomocí rotačního viskozimetru (Rheotec RC20 CC48, sousé válce) a pyknometru při teplotě 21°C . Pro lepší vizuální hodnocení byly použity PVC kuličky o průměru 5 mm . Míchadlo bylo umístěno pomocí hřídele na speciálním stroje a ponořeno do vsadky v průhledné nádobě. Průběh experimentu je znázorněn na obrázku 13.

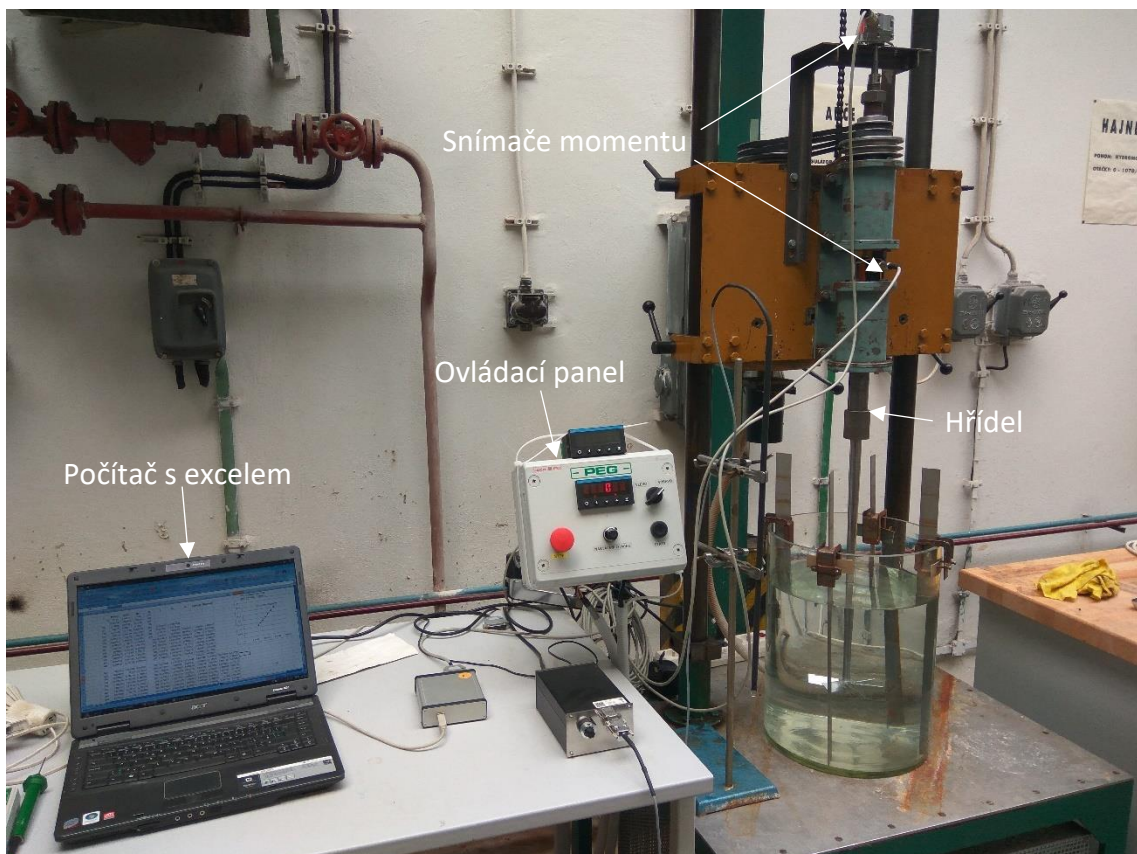


Obr. 13 Míchání vsadky

Během experimentu bylo stanoveno, že kapalina se otáčí ve stejném směru, jako míchadlo. Charakter toku kapaliny je radiální. Poblíž stěny kapalina má výrazně menší rychlost než míchadlo. Plastové částice radiálním tokem pohybují směrem od lopatek ke stěně pak pohybují směrem k centru nádoby a jsou urychlovány. Proudění uvnitř lopatek se nepodařilo pozorovat. Lepší znázornění experimentu je na video (CD: příloha 1).

8.2 Měření krouticího momentu

Měření krouticího momentu probíhalo na speciální stanici. Stanice se skládá z rámu, elektromotoru a hřídele, na kterém jsou umístěny snímače krouticího momentu (SIEMENS 1xp8001-1). Elektromotor a hřídel jsou spojeny pomocí řemenového převodu. Nastavení otáček je pomocí regulátoru umístěného na ovládacím panelu (viz. Obr. 14). Stanice měří v rozsahu 0 až 5 Nm.



Obr. 14 Měřicí stanice

Snímače předávají informace v milivoltech do počítače v excel soubor. Pomocí speciálně vytvořené závislosti hodnoty z milivolt jsou převedeny na Nm. Před měřením je potřeba provést kalibrace zařízení.

8.2.1 Kalibrace

Kalibrace se prováděla pomocí šestilopátkového míchadla se šikmými lopatkami a nádoby s narážkami (viz. Obr. 15). Toto míchadlo bylo použito z důvodu znalosti jeho příkonové charakteristiky a turbulentního režimu proudění, ve kterém příkonové číslo je konstantní. Příkonové číslo pro toto míchadlo v turbulentním režimu je 1,7.



Obr. 15 Šestilopátkové míchadlo a nádoba s narážkami

Snímače měření síly, vyvolanou krouticím momentem pomocí tenzometrického můstku. Výstupní napětí postupuje do excelu a dále je převedeno na krouticí moment podle rovnice:

$$M_k = AU + b \quad (8.1)$$

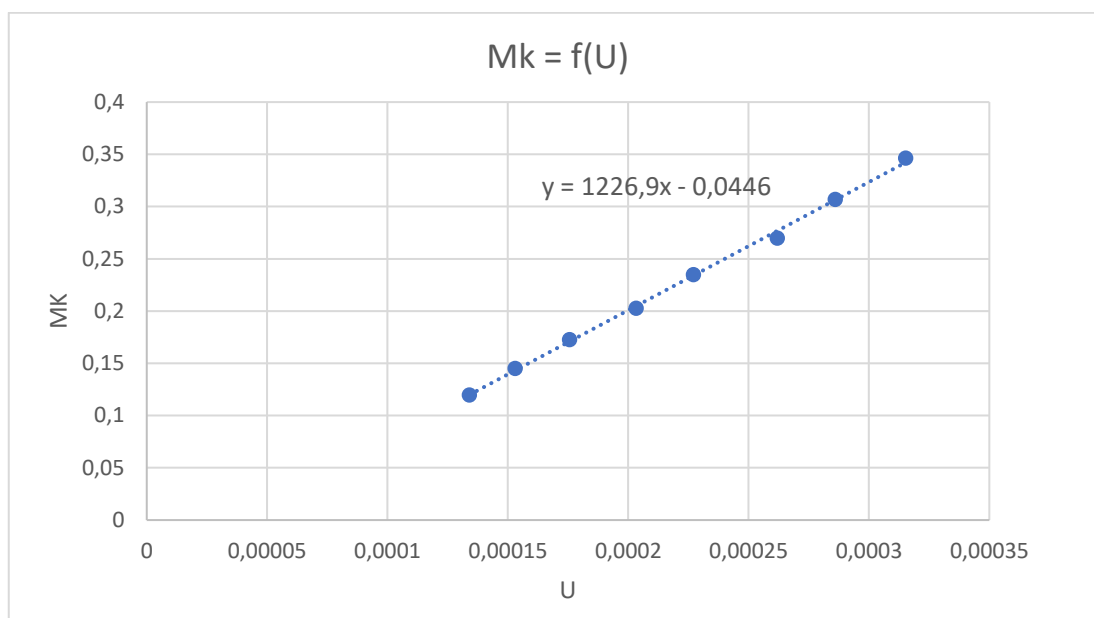
Kde

Mk je krouticí moment

U je napětí

A, b jsou převodní konstanty

Příkonové číslo, získané z naměřeného krouticího momentu (podle rovnic č. 3.2 a 3.3) se porovnávalo s teoretickou hodnotou. Pokud mezi hodnotami byl velký rozdíl, z teoretické hodnoty byl spočítán krouticí moment. Po vypočtu momentů pro všechny otáčky byla sestavena grafická závislost krouticího momentu na napětí (viz. Obr. 16).



Obr. 16 Závislost Mk na U

Z grafu byly odečteny převodní konstanty a zpětně dosaženy do rovnice č. 8.1 v excel. Dále následovalo měření pro kontrolu. Kalibrace se prováděla až po dosažení odchylky hodnot v řadu 10^{-3} m. Hodnoty odchylek jsou znázorněny v tabulce 5.

Tab. 5 Hodnoty U , M_k , a odchylek v závislosti na otáčkách

n [min^{-1}]	U [V]	$M_{k\text{exp}}$ [N.m]	$M_{k\text{výpočet}}$ [N.m]	Odchylka [N.m]	Odchylka [%]
360	0,000114	0,092679	0,097057	0,00348	4,5
400	0,000134	0,117504	0,119834	0,0023	1,9
440	0,000153	0,140891	0,14501	0,00418	2,8
480	0,000176	0,168582	0,172585	0,004	2,3
520	0,000203	0,202375	0,202561	0,00019	0,09
560	0,000227	0,231573	0,234936	0,00336	1,4
600	0,000262	0,274424	0,269711	0,00471	1,7
640	0,000286	0,303886	0,306886	0,003	0,98
680	0,000315	0,339686	0,346461	0,00678	1,96

Po kalibraci byla stanovena průměrná hodnota odchylky podle vzorce:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i}{N} \quad (8.2)$$

Kde

$\bar{\delta}$ je průměrná hodnota

δ_i je hodnota odchylky pro i -té měření

N je počet měření

Průměrná hodnota odchylky kalibračního měření od teoretického výpočtu je 0,00366 N.m neboli 1,98 % což se považuje za dobrý výsledek.

8.2.2 Měření

Po kalibraci bylo provedeno měření krouticího momentu (viz. Obr. 17). Měření probíhalo v rozsahu otáček 200 až 700 min^{-1} . Dynamická viskozita použitého glycerinu je 0,695 Pa s, hustota je 1256,3 kg m^{-3} .



Obr. 17 Proces měření

Snímač krouticího momentu měří napětí s vlastní odchylkou. Výsledné hodnoty napětí, odchylky a krouticího momentu jsou znázorněny v tabulce 6.

Tab. 6 Změřený krouticí moment v závislosti na otáčkách

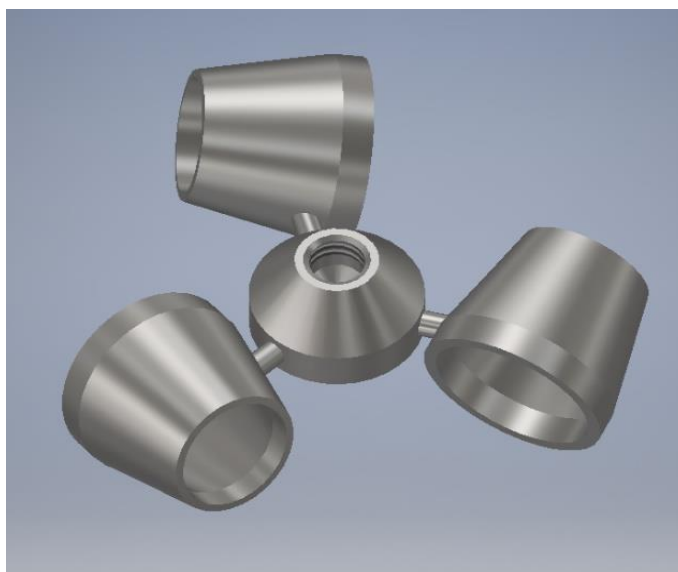
n [min⁻¹]	U [V]	Odchylka U [V]	Odchylka [%]	Mk [Nm]
200	5,18944E-05	4,23132E-05	81,5	0,0168
250	5,98141E-05	3,1913E-05	53,4	0,0265
300	6,86025E-05	5,6141E-06	8,2	0,0373
350	7,93709E-05	1,33641E-05	16,8	0,0505
400	9,0007E-05	9,40068E-06	10,4	0,0636
450	0,000104274	8,19817E-06	7,9	0,0811
500	0,000115928	6,68721E-06	5,8	0,0953
550	0,000128006	6,04363E-06	4,7	0,1101
600	0,000142543	6,05547E-06	4,2	0,1280
650	0,00015119	6,05652E-06	4,0	0,1386
700	0,000163434	5,5825E-06	3,4	0,1536

9 CFD simulace míchání

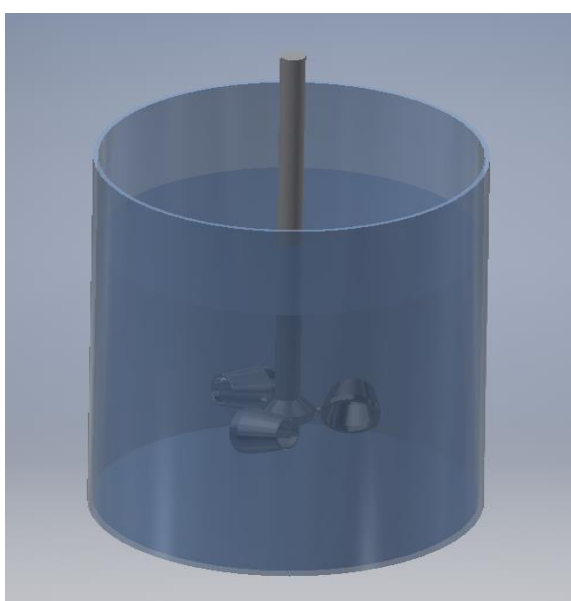
Po experimentálním měření byla provedena simulace míchání kapaliny míchadlem Visco Jet. Numerická část obsahovala následující kroky: tvorba modelu, úprava geometrie, tvorba sítě, nastavení parametrů a simulace.

9.1 Tvorba modelu

Pro simulace byl vytvořen 3D model míchadla Visco Jet, včetně nádoby a vsádky v programu Autodesk Inventor. Modely jsou znázorněny na obr. 18 a 19.



Obr. 18 3D Model míchadla Visco Jet

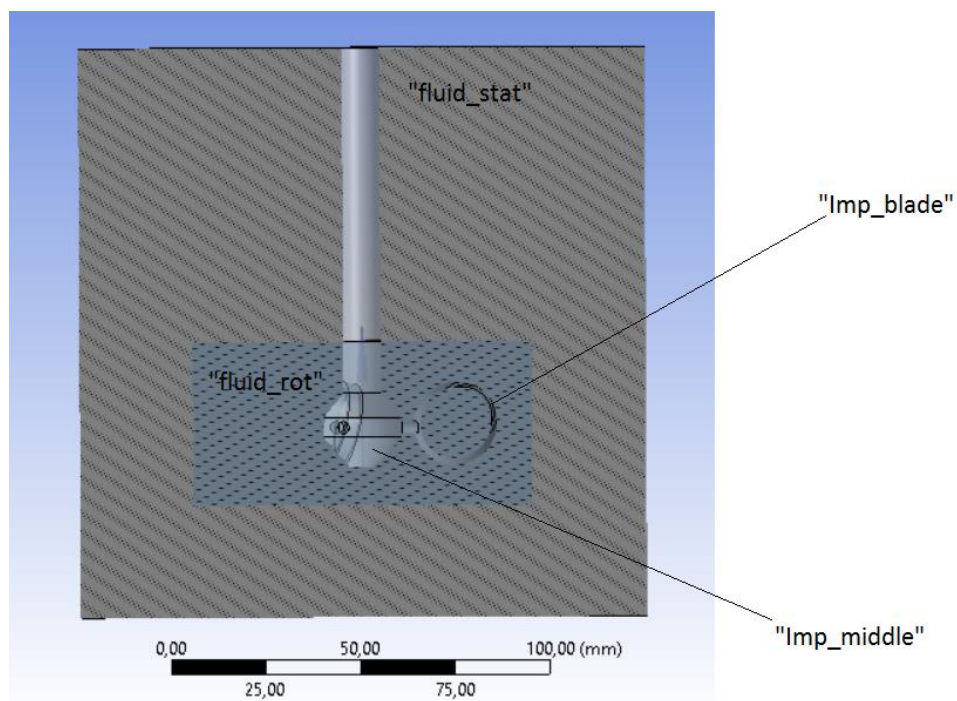


Obr. 19 Model míchadla včetně nádoby a vsádky.

Míchadlo má složitou geometrii, a proto byl model upraven na zjednodušený tvar – byly odstraněny zkosení na vstupních a výstupních otvorech trysek a zaoblení na spojení ramen s lopatkami a nábojem. Tyto zjednodušení byly provedeny z toho důvodu, že tyto prvky nemají žádný vliv na proces míchání (neboli tento vliv je tak malý, že jej můžeme zanedbat) ale podstatně zhoršují kvalitu sítě. Drsnost povrchu míchadla je také zanedbatelná. Pro následující kroky byl model importován do pracovního prostředí ANSYS Workbench.

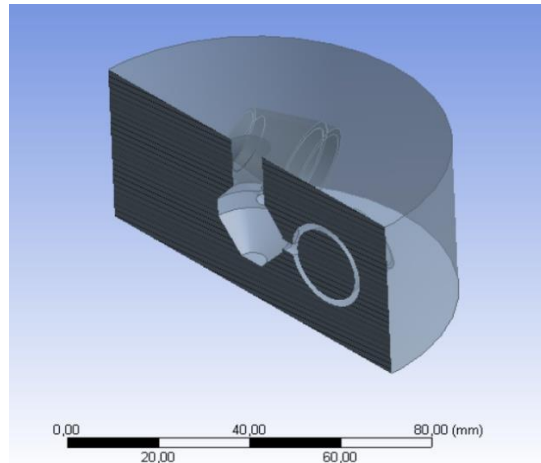
9.2 Úprava geometrie

Následujícím krokem je zpracování geometrie, vytvořené v programu Autodesk Inventor. Nádoba nebyla potřebná pro vytvoření sítě a simulace a z tohoto důvodu byla odstraněna. Pro simulaci pohybu potřebujeme objekt, který bude vykonávat rotace a objekt, který zůstane v stacionárním stavu, proto kapalný objem byl rozdělen na dvě části. Malý objem kolem míchadla představuje tzv. „rot“, zbývající část představuje „stator“ (viz ob. 20).



Obr. 20 Rozdělení objemu na části

Program Fluent pracuje s kapalným prostředím, proto nepotřebuje pevné součásti. Míchadlo a hřídel byly zpracovány pomocí příkazu „subtract“, a na jejich místě se objevily prázdné oblasti, které budou obtékány kapalinou (viz obr. 21). Model s upravenou geometrií byl přesunut do pracovního prostředí ANSYS Mesh.



Obr. 21 Prázdné oblasti míchadla a hřídele

9.3 Tvorba sítě

Před tvorbou sítě potřebujeme nastavit okrajové podmínky pro každou sekci. Tvorba jmenovaných hranic umožňuje určit podmínky pro každou geometrii, a to pomáhá při analýze specifických oblastí simulace. Jednotlivé oblasti byly klasifikovány jako „wall“ a „interior“. Stěny můžeme nastavit jako „Moving wall“, které pak tvoří rotační pohyb, nebo „Stationary wall“ představující bariéru, přes kterou kapalina nemůže procházet. Komponenty typu „interior“ představují objemy, mezi kterými může proudit kapalina. Popis jednotlivých oblastí je ukázán v tabulce 7.

Tab. 7 Pojmenované oblasti

Název	Popis	Okrajová podmínka
imp_middle	Náboj míchadla	Moving wall
imp_blade	Lopatky míchadla	Moving wall
fluid_rot	Objem v oblasti míchadla	Interior
fluid_stat	Vnější objem kapaliny	Interior
wall fluid_stat	(stěna nádoby)	Stationary wall

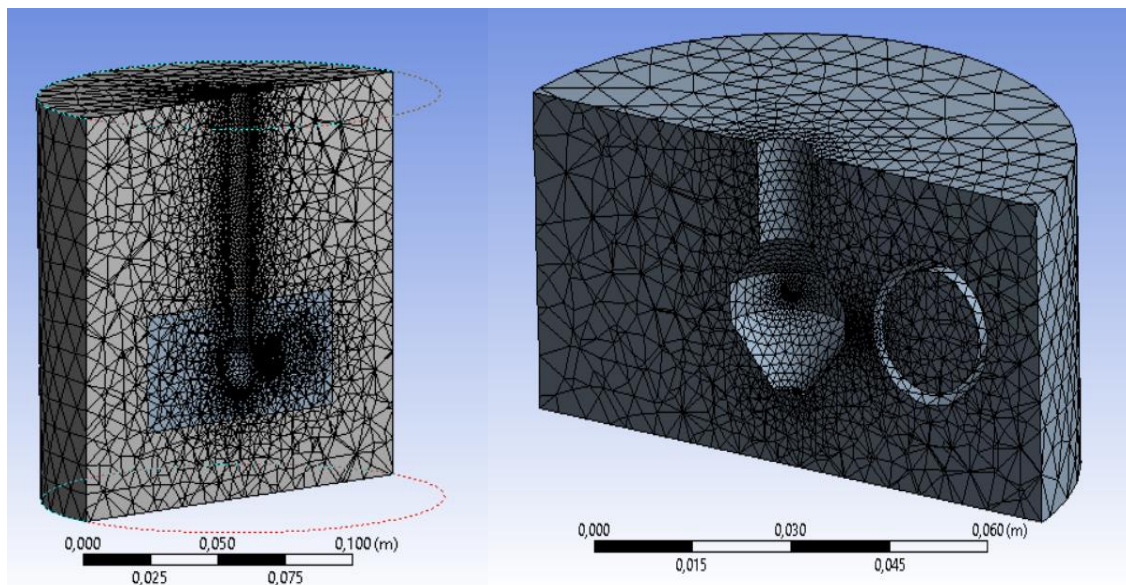
Důležitým parametrem sítě je kvalita. Síť rozděljuje pracovní objem na soustavu elementů. Při řešení úloh se složitou geometrií, se mohou některé elementy zdeformovat. Deformace jednotlivých elementů může značně ovlivnit přesnost řešení. Existují dvě řešení pro zlepšení kvality sítě. První varianta je změna tvaru elementů. Toto řešení není stabilní a změna tvaru může také vést ke zhoršení kvality. Druhou variantou je změna velikosti elementů a zvětšení jejich počtů. Nevýhodou druhého řešení je časová náročnost: větší počet elementů potřebuje více času na simulace. Čas simulace taky závisí na výkonu počítače. Při řešení úloh musíme volit mezi časem a kvalitou řešení.

Pro hodnocení kvality sítě v ANSYS Mesh existuje parametr „skewness“, který udává hodnotu deformace elementů v rozsahu od 0 do 1, kde 0 znamená, síť je bez deformace, 1 znamená, že síť je úplně zdeformovaná.

Při tvoření sítě se uvažovali následující podmínky:

1. Řešení úlohy probíhalo na vlastním počítači s nainstalovanou studentskou verzí ANSYS, která omezuje počet elementů na maximální hodnotu 500 000.
2. Rozměry nádoby a míchadla jsou v řádech 0,15 m, což předpokládá malý počet elementů, dostatečný pro simulace.
3. Máme k dispozici 4 modely proudění a 6 variant otáček, celkem je potřeba provést 24 simulace. Existuje časová náročnost úlohy.

S ohledem na tyto podmínky byla vytvořena síť, která obsahuje 158 838 tetragonálních elementů. Střední hodnota „skewness“ je 0,31. Maximální hodnota je 0,79, což se považuje za dostatečné. Výhodou sítě je, že nejmenší elementy jsou v oblasti lopatek míchadla, zatímco největší elementy jsou v oblasti „fluid_stat“ (viz. Obr. 22). Tato síť sice není vysoce kvalitní, ale časově nenáročná a stáčí pro první pokusy.



Obr. 22 Síť tvořena v Mesh

9.4 Nastavení simulace

Vytvořená síť byla importovaná do pracovního prostředí Fluent 17.2, kde byla zkontrolována a připravena pro simulace. Pro řešení úlohy byl použit MRF (Multiple Reference Frame) model. Je to pseudostatická aproximace, ve které se jednotlivé buňky zóny pohybují různými rotační / translační rychlostmi. Tento přístup je vhodný tehdy, když tok na hranici mezi těmito zónami je téměř jednotný ("smíšený ven"). Model je dobře použitelný pro systémy rotor-stator, je jednoduchý a časově nenáročný.

Při nastavení simulace se zjistil problém s volbou směru otáčení objemu „fluid_rot“. Podle stránek výrobce, kapalina teče skrz lopatky míchadla a to znamená, že míchadlo a kapalina by se měli otáčet v opačném směru vůči sobě. Podle patentu Kurta Wyssa, za pracovních otáček by se měla kapalina za převažování dynamického tlaku točit stejným směrem, jako míchadlo. Pro řešení tohoto problému byly použity obě varianty a podle výsledku se rozhodovalo, která je správná. Po nastavení směru otáčení byly postupně provedeny simulace všech čtyř modelů turbulence pro všechny otáčky a byly stanoveny hodnoty krouticích momentů. Simulace s nastavením otáčení „fluid_rot“ v protisměru otáčení míchadla ukázaly osmkrát menší krouticí moment, než experiment a tím pádem toto řešení je považováno za nesprávné.

9.5 Simulace

Po přípravě a nastavení parametrů byly provedeny simulace jednotlivých modelů. Bylo vypnuto omezení přesnosti řešení pro každý počítaný parametr a simulace probíhala až po stabilizaci konvergence výsledků. Průběh simulace pro jednotlivé modely je popsán v následujících podkapitolách.

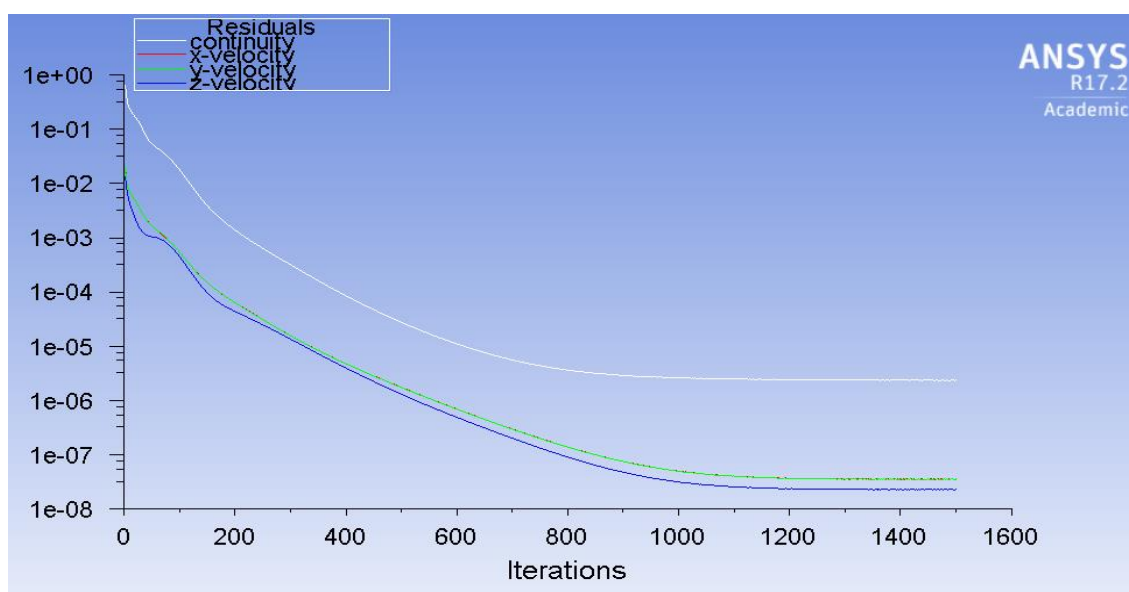
9.5.1 Simulace laminárního modelu

Odchylky počítaných parametrů se stabilizovaly po 1500 iteracích (viz. Obr. 23). Hodnoty odchylek jsou znázorněny v tabulce 8.

Tab. 8 Odchylky jednotlivých parametrů

Continuity	$2,3678 \times 10^{-6}$
x-složka rychlosti	$3,5506 \times 10^{-8}$
y-složka rychlosti	$3,5568 \times 10^{-8}$
z-složka rychlosti	$2,2968 \times 10^{-8}$

Jak je vidět z tabulky, hodnoty odchylek se pohybují v řádech 10^{-6} až 10^{-8} , což je velice dobrý výsledek oproti standardnímu nastavení řádu přesnosti na 10^{-3}



Obr. 23 Průběh konvergence laminárního modelu.

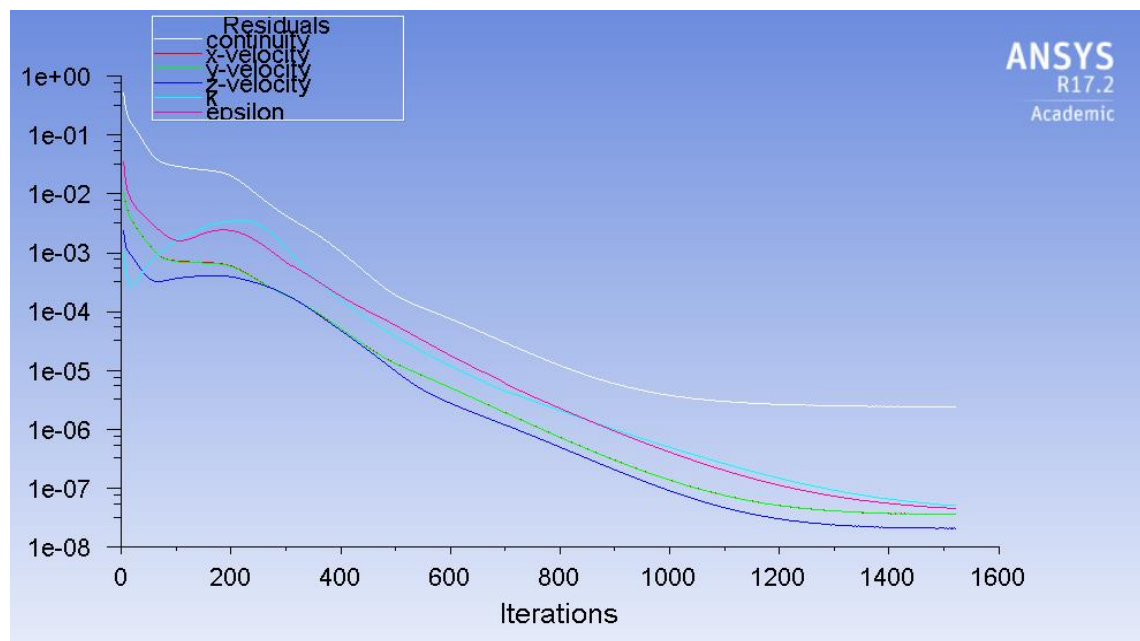
9.5.2 Simulace Standard k-ε modelu

Model Standard k-ε dosáhla stabilizací odchylek parametrů po 1500 iteracích (viz. Obr. 24). Hodnoty odchylek jsou znázorněny v tabulce 9.

Tab. 9 Odchylky jednotlivých parametrů

Continuity	$2,4097 \times 10^{-6}$
x-složka rychlosti	$3,6082 \times 10^{-8}$
y-složka rychlosti	$3,5950 \times 10^{-8}$
z-složka rychlosti	$2,0966 \times 10^{-8}$
k	$5,0803 \times 10^{-8}$
ε	$4,5558 \times 10^{-8}$

Jak je vidět z tabulky, hodnoty odchylek se pohybují v řádech 10^{-6} až 10^{-8} , což je velice dobrý výsledek oproti standartnímu nastavení řádu přesnosti na 10^{-3}



Obr. 24 Průběh konvergence Standard k-ε modelu

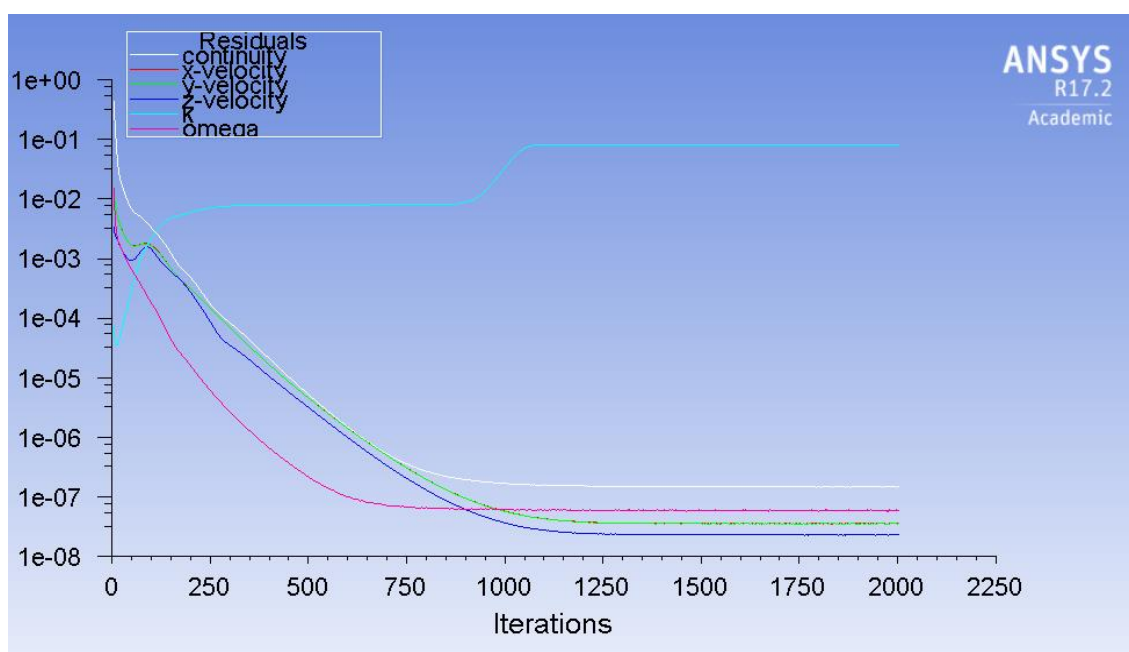
9.5.3 Simulace Standard k- ω modelu

Model Standard k- ω dosáhla stabilizací odchylek parametrů po 1500 iteracích (viz. Obr. 25). Hodnoty odchylek jsou znázorněny v tabulce 10.

Tab. 10 Odchylky jednotlivých parametrů

Continuity	$1,4811 \times 10^{-7}$
x-složka rychlosti	$3,6222 \times 10^{-8}$
y-složka rychlosti	$3,5809 \times 10^{-8}$
z-složka rychlosti	$2,3273 \times 10^{-8}$
k	$8,1595 \times 10^{-2}$
ω	$5,9484 \times 10^{-8}$

Since odchylky rychlosti a specifické disipace energie se pohybují v řádu 10^{-8} , kinetická energie turbulence má oproti předchozímu modelu poměrně velkou chybu v řádu 10^{-2} , což může ovlivnit výsledky simulace.



Obr. 25 Průběh konvergence Standard k- ω modelu

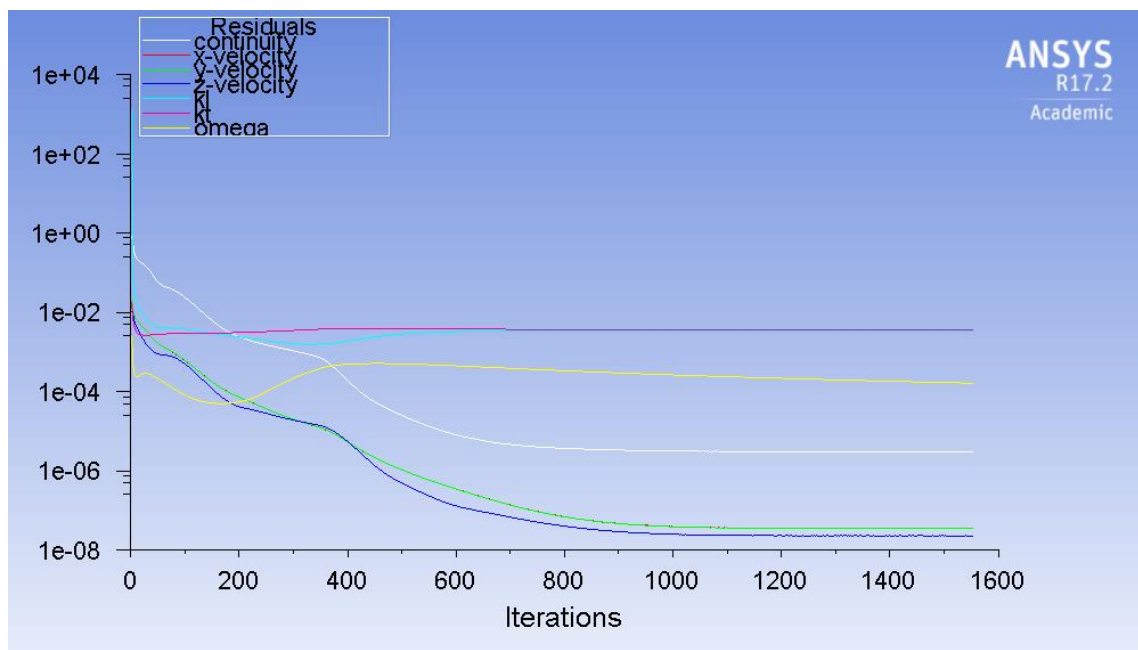
9.5.4 Simulace k-kl- ω Transition modelu

Model k-kl- ω Transition dosáhla stabilizací odchylek parametrů po 1500 iteracích. Hodnoty odchylek jsou znázorněny v tabulce 11. Průběh konvergence je znázorněn na obrázku 26.

Tab. 11 Odchylky jednotlivých parametrů

Continuity	$3,0189 \times 10^{-6}$
x-složka rychlosti	$3,5946 \times 10^{-8}$
y-složka rychlosti	$3,5552 \times 10^{-8}$
z-složka rychlosti	$2,3001 \times 10^{-8}$
kl	$3,3978 \times 10^{-3}$
k	$3,5397 \times 10^{-3}$
ω	$1,6412 \times 10^{-4}$

Jako předchozí, má k-kl- ω Transition model velkou odchylku v řadu 10^{-3} pro kinetickou energii turbulence a kinetickou energii laminárního proudění. Navíc se objevila velká odchylka specifické disipace energie v řadu 10^{-4} . Takové chyby mohou velice ovlivnit výsledky simulace.

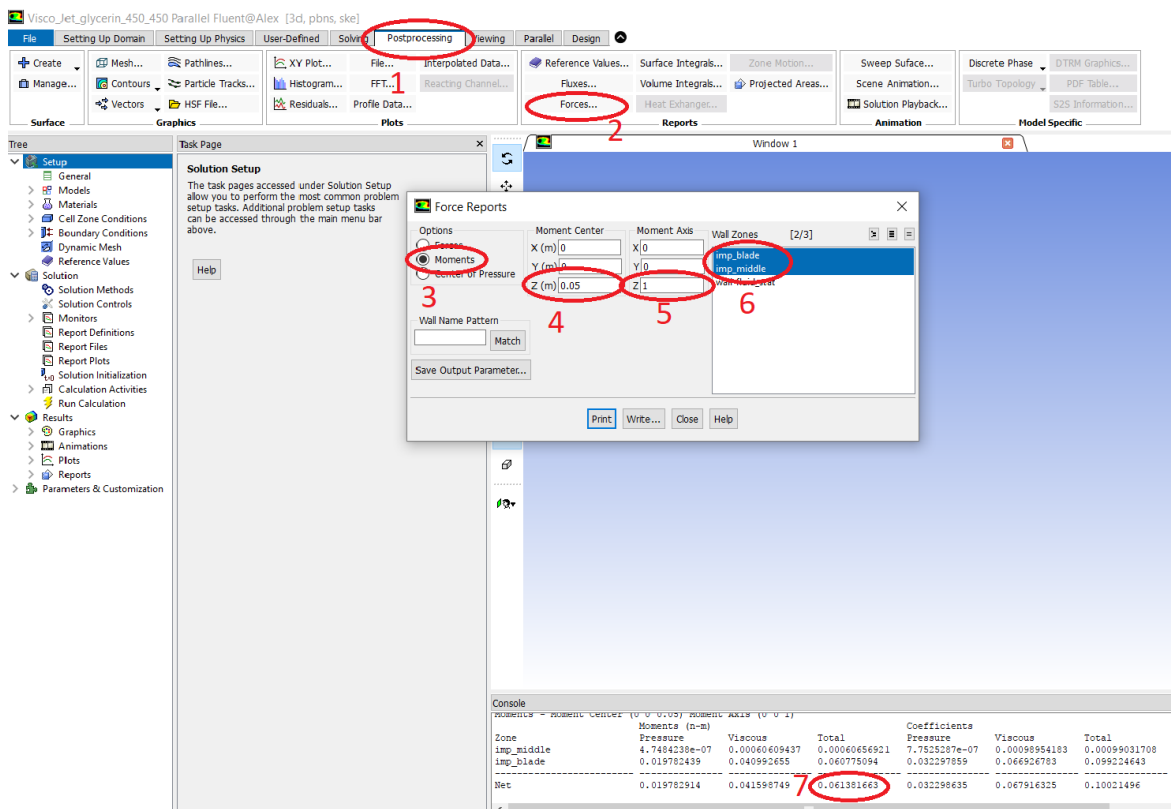


Obr. 26 Průběh konvergence k-kl- ω Transition modelu

9.6 Výsledky simulace

Hlavním úkolem simulací byl výpočet krouticího momentu pro porovnání s experimentem. Program Fluent automaticky počítá krouticí moment a pro jeho zjištění je potřeba splnit následující kroky (viz. Obr. 27):

1. Zvolit složku „Postprocessing“ v menu programu.
2. Najít složku „Reports“ a zmačknout tlačítko „Forces“.
3. Otevře se dialogové okno „Forces reports“, ve kterém je potřeba zvolit „Moments“.
4. Ve složce „Moment Center“ nastavit u osy „Z“ výšku 0.05 m.
5. Ve složce „Moment Axis“ nastavit u osy „Z“ místo 0 číslo 1.
6. Ve složce „Wall Zones“ zvolit „imp_blade“ a „imp_middle“.
7. Zmačknout tlačítko „Print“. Výsledky se objeví v konzoli.



Obr. 27 Postup při hledání krouticího momentu

Použité kroky byly udělány pro každý model a pro celý rozsah měření. Výsledné hodnoty krouticího momentu jsou ukázaný v tabulce 12.

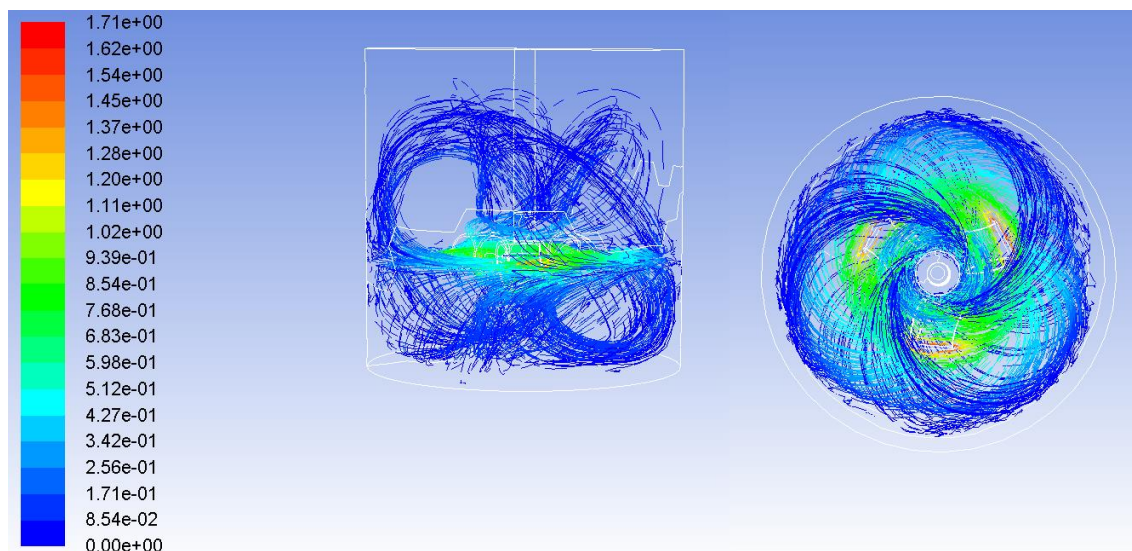
Tab. 12 Hodnoty krouticího momentu v závislosti na otáčkách

n [min⁻¹]	M_k [Nm]			
	Laminar	Standart k-ε	Standard k-ω	k-kl-ω
200	0,0156	0,0155	0,0156	0,0156
300	0,0300	0,0312	0,0300	0,0300
450	0,0585	0,0614	0,0584	0,0584
500	0,0695	0,0732	0,0624	0,0627
600	0,0940	0,0995	0,0939	0,0836
700	0,1213	0,1289	0,1212	0,1068

10 Výsledky

10.1 Popis proudění

Simulace míchání ukázala výsledky, které jsou shodné s vizuálním experimentem. Míchadlo vyvolává radiální pohyb kapaliny, který je znázorněn na obr. 28.



Obr. 28 Znáznornění proudu kapaliny

V oblasti blízko stěny má vsádka výrazně menší rychlost než míchadlo a stejný směr proudění s míchadlem. V oblasti míchadla kapalina teče skrz lopatky a z důvodu sklonu lopatek je smíchána s postupujícími radiálními proudy. Vzhledem k lopatkám, oblast v blízkosti míchadla má opačný směr proudění.

10.2 Vyhodnocení příkonového čísla ze simulace

Podle rovnic č. 3.1, 3.2 a č. 3.3 spočítáme hodnoty Reynoldsova a příkonového čísla. Jako příklad použijeme výpočet pro laminární model a 200 min^{-1} .

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\mu} = \frac{\frac{200}{60} \cdot 0,0735^2 \cdot 1253,6}{0,695} = 32,5$$

$$P = 2Mk\pi n = 0,0156 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{200}{60} = 0,327 \text{ W}$$

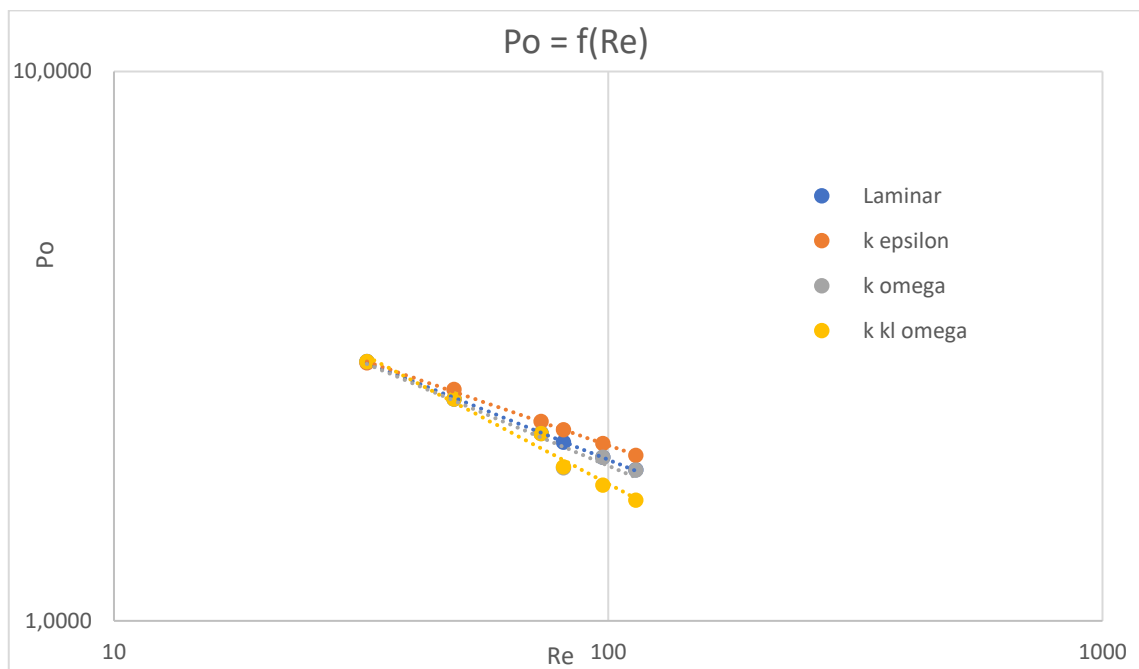
$$Po = \frac{P}{n^3 d^5 \rho} = \frac{0,327}{\left(\frac{200}{60}\right)^3 \cdot 0,0735^5 \cdot 1256,3} = 3,28$$

Výsledné hodnoty příkonového čísla pro každý model jsou znázorněny v tabulce 13.

Tab. 13 Hodnoty příkonového čísla

Re	Laminar	Standart k-ε	Standard k-ω	k-kl-ω
32,5	3,28	3,26	3,28	3,28
48,7	2,80	2,92	2,80	2,80
73,1	2,43	2,55	2,43	2,43
81,2	2,34	2,46	2,10	2,10
97,4	2,20	2,32	2,19	1,95
113,7	2,08	2,21	2,08	1,83

Po výpočtu příkonového čísla vytvoříme závislost Po na Reynoldsovem čísle a dosadíme jí do grafu v logaritmických souřadnicích (viz. Obr. 29).



Obr. 29 Závislost Po na Re pro různé modely.

Jak je vidět z grafu, míchadlo pracuje na hranici oblasti plouživého proudění. Závislost Po na Re můžeme proložit přímkou a popsat rovnici ve tvaru:

$$Po = BRe^b \quad (10.1)$$

Hodnoty parametrů B a b jsou ukázány v tabulce 14.

Tab. 14 Hodnoty parametrů

Parametry	Laminar	Standart k-ε	Standard k-ω	k-kl-ω
<i>B</i>	10,398	8,790	10,995	15,832
<i>b</i>	-0,362	-0,312	0,379	-0,475

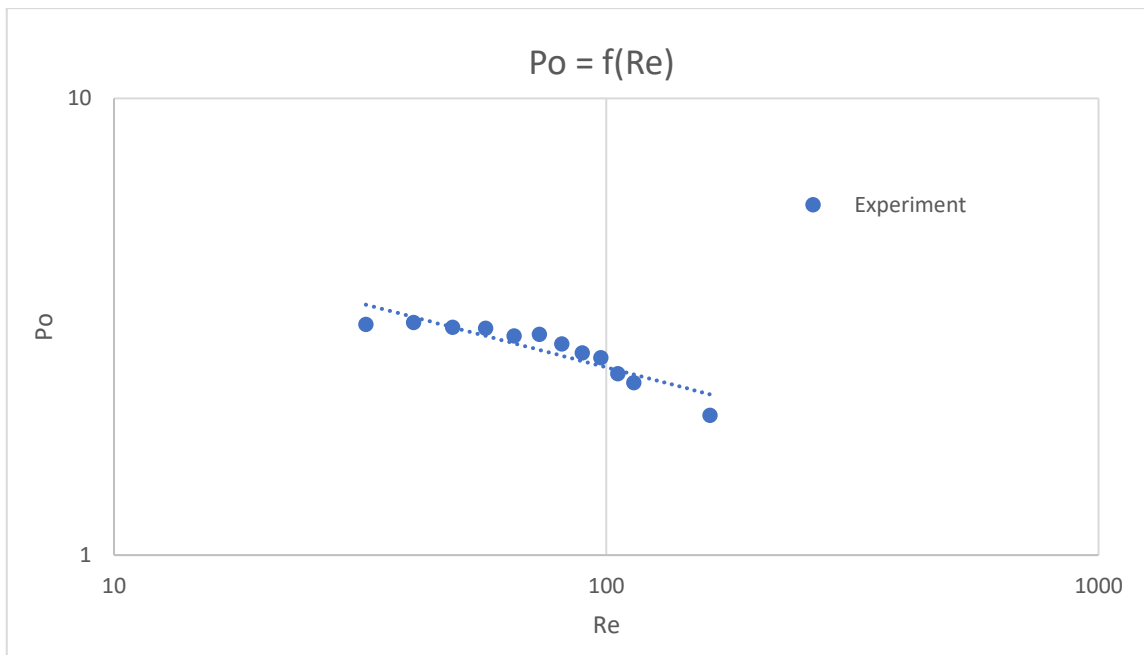
10.3 Vyhodnocení příkonového čísla z experimentu

Stejně operace pro hodnocení Po provedeme s hodnotami krouticího momentu z experimentu. Hodnoty příkonového čísla jsou ukázány v tabulce 15.

Tab. 15 Hodnoty Po a Re z experimentu

Re	Po
32,5	3,20
40,6	3,23
48,7	3,15
56,8	3,14
64,96	3,02
73,1	3,04
81,2	2,90
89,3	2,77
97,4	2,70
105,6	2,49
113,7	2,38
162,4	2,02

Vytvoříme závislost Po na Re a dosadíme do grafu v logaritmických souřadnicích. Závislost Po na Re je uvedena na obr. 30.



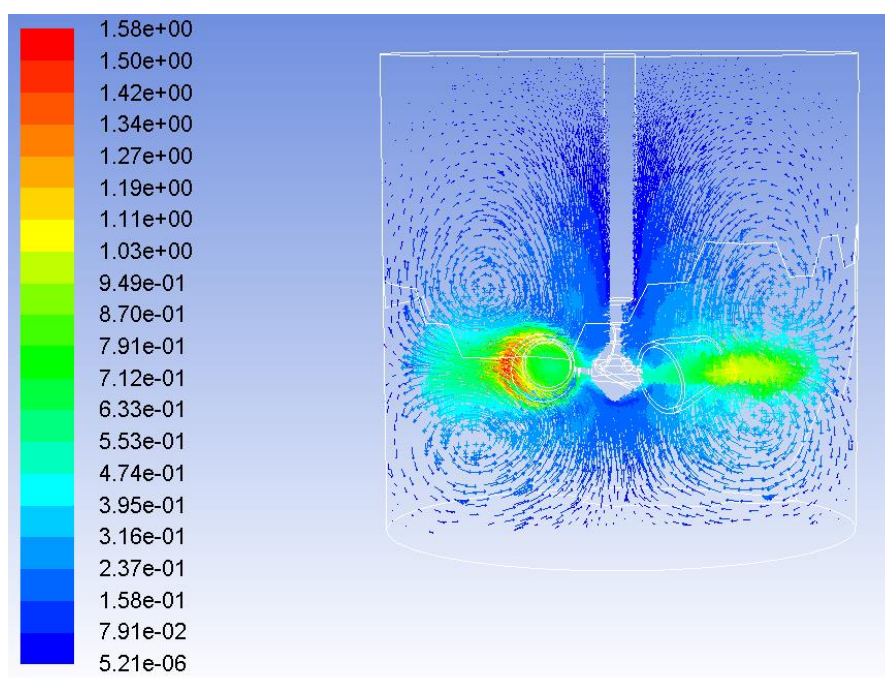
Obr. 30 Závislost Po na Re z experimentu

Jak je patrné z grafu, experiment potvrzuje, že míchadlo pracuje na hranici oblasti plouživého proudění. Hodnoty parametrů charakteristické rovnice jsou: $B = 9,396$ a $b = -0,281$

11 Diskuze

11.1 Porovnání proudění

Při porovnání obrázku ze simulace a video z experimentu (CD: příloha 1) je vidět, že charakter proudění je shodný. Sice během experimentu nepodařilo se vyhodnotit proudění kapaliny skrz lopatky míchadla, radiální smyčky a směr proudění vsádky v blízkosti stěn potvrzují podobu simulace a experimentu. Výsledný tvar toku je uveden na obrázku 31.



Obr. 31 Výsledný tvar toku kapaliny

11.2 Porovnání $Po = f(Re)$

Pro porovnání příkonových čísel, stanovených ze simulací a experimentálně, vypočteme hodnoty odchylek podle rovnice:

$$\delta = \left| \frac{Po_{exp} - Po_{sim}}{Po_{exp}} \right| \times 100 \quad (11.1)$$

Kde

Po_{exp} je příkonové číslo z experimentálního měření

Po_{sim} je příkonové číslo ze simulace

δ je odchylka

Hodnoty jednotlivých odchylek jsou uvedeny v tabulce 16.

Tab. 16 Hodnoty odchylek modelů od experimentálně stanovených hodnot Po

Po_{exp}	Odchylky [%]			
	Laminar	Standart k- ϵ	Standard k- ω	k-kl- ω
3,2	2,5	1,9	2,5	2,5
3,2	11	7,5	11,1	11,1
3,0	20,2	16,2	20,3	20,3
2,9	19,4	15,1	27,6	27,3
2,7	18,7	14,0	18,8	27,7
2,4	12,6	7,2	12,7	23,1

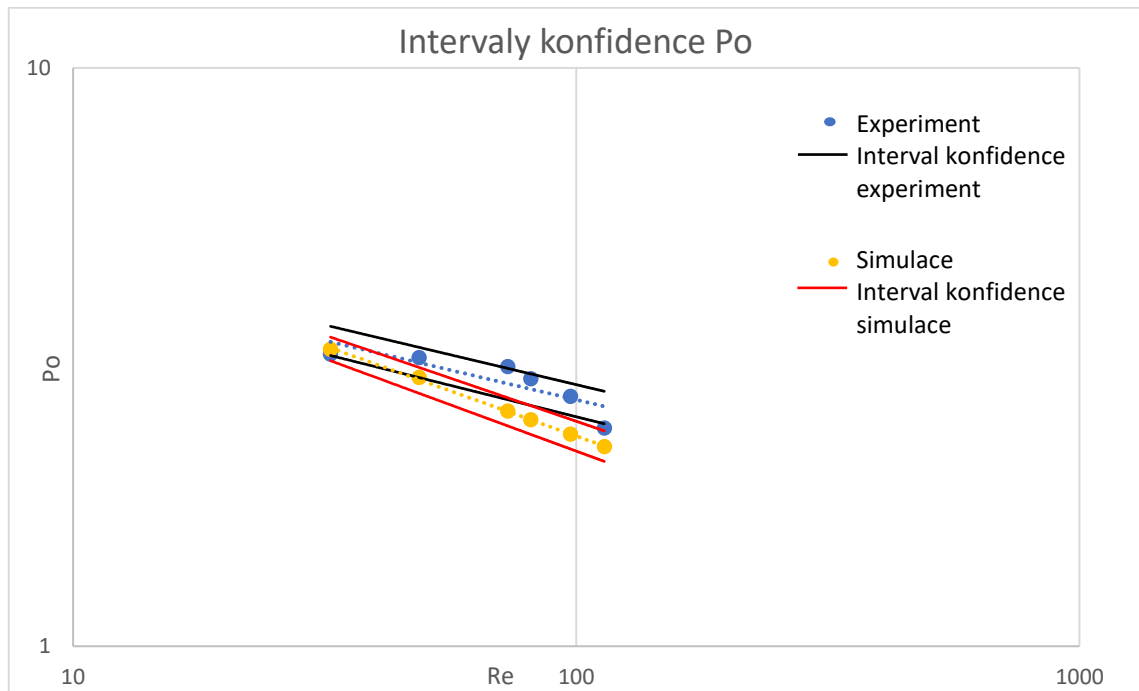
Nejhorší výsledky ukazují metody k-omega a k-kl-omega, které mají odchylky až 27 %. Taková velká chyba může být způsobena kvalitou sítě anebo složitou geometrií. Obě metody se stabilizovali po 1500 iteracích. Zatímco hodnoty rychlostí mají reziduální odchylky v řádu 10^{-8} kinetická laminární energie a kinetická energie turbulence mají odchylky v řádu 10^{-3} , což se považuje za velkou chybu. Metoda k-kl-omega má navíc odchylku specifické disipace kinetické energie v řádu 10^{-4} .

Nejlepší výsledky má metoda k-epsilon, kterou použijeme pro následující porovnání. Dalším způsobem porovnání bude metoda intervalu konfidence.

11.2.1 Interval konfidence

Pod pojmem interval konfidence (též interval spolehlivosti) se představuje oblast, ve které by měla ležet hledaná charakteristika. Pravděpodobnost tohoto předpokladu je

95 %. Pro naše porovnání byly sestaveny intervaly pro numerické řešení a experiment (viz. Obr. 32).



Obr. 32 Intervaly konfidence 95 %

Z důvodu rozptylu experimentálních hodnot podél přímky, konfidenční intervaly obou variant se prolínají v počátku, ale pak se oddalují. Hlavními příčinami neshody jsou:

1. Měřicí stanice není schopná měřit malé krouticí momenty s dostatečnou přesností. Jak bylo uvedeno dříve v tabulce 6, sice odchylka napětí pro otáčky 300 až 700 min^{-1} ukazuje maximální hodnotu 16,8 %, pro počáteční otáčky 200 a 250 min^{-1} chyba je 81,5 % a 53,4. Vzhledem k lineární závislosti krouticího momentu na napětí a přímé úměrnosti příkonového čísla a momentu, chyba měření velice ovlivňuje příkonovou charakteristiku.
2. Další příčinou rozdílu hodnot může být malý počet elementů v síti. Sice metoda k-epsilon ukazuje nejlepší výsledky a má nejlepší konvergence (reziduální odchylky měřených hodnot jsou na úrovni 10^{-6} až 10^{-8}), hrubá síť, zvláště v oblasti lopatek míchadla může zhoršit kvalitu výsledků.
3. Vlastnosti glycerinu byly změřeny po ukončení experimentu, ale teplota kapaliny se měnila v průběhu měření, což může způsobit další odchylky hodnot.
4. Kvalitu měření může ovlivnit taky vibrace hřídele.

12 Závěr

Úkolem práce bylo popsání příkonové charakteristiky míchadla typu Visco Jet a určení toku kapaliny při míchání.

- V první části práce byla popsána teorie numerického výpočtu míchání a byly zvoleny, s ohledem na rozsah Reynoldsova čísla, čtyři modely pro výpočet: Laminární, Standart $k-\epsilon$, Standard $k-\omega$ a Transition $k-kl-\omega$.
- Ve druhé části práce byly provedeny experimenty s míchadlem typu Visco Jet o průměru 73.5 mm. Cílem prvního experimentu bylo vizuální hodnocení toku kapaliny během míchacího procesu. Ve druhém experimentu bylo provedeno měření krouticího momentu v rozsahu otáček 200 až 700 min^{-1} .
- Ve třetí části práce byly provedeny numerické simulace míchání za použitím čtyř zvolených modelů. Pro numerickou simulaci se používal program ANSYS Fluent. Během simulace se zjistilo, že modely Standard $k-\omega$ a Transition $k-kl-\omega$ mají poměrně velké odchylky hodnot kinetické energie, což způsobilo následné zhoršení kvality výsledků.
- Ve čtvrté části práce byly stanoveny příkonové charakteristiky z experimentu a numerického řešení. Po určení charakteristik bylo zjištěno, že míchadlo pracuje na hranici oblasti plouživého proudění.
- V páté části práce bylo provedeno porovnání experimentálního měření a numerického řešení. Během porovnání se zjistilo, že největší rozdíl od experimentu mají Standard $k-\omega$ a Transition $k-kl-\omega$ modely, zatímco Standart $k-\epsilon$ ukázal nejlepší výsledky. Směr toku a charakter proudění (radiální) jsou stejné jak pro experiment, tak i pro numerické řešení. Sice Standart $k-\epsilon$ model se nejvíce shoduje s experimentem, metoda konfidenčních intervalů ukázala, že simulace a měření nemají společnou oblast dat v intervalech 95 %. Příčinami pro takové výsledky jsou hrubá síť, nepřesnost měření, vyvolaná tím, že měřicí stanice není určena pro měření malých krouticích momentů. Pro přesnější výsledky je potřeba zvýšit kvalitu sítě a provést vizualizaci proudění pomocí PIV (Particle Image Velocimetry) metody a měření rychlostí proudění pomocí LDA (Laser Doppler Anemometry) metody.

Seznam použitých symbolů

d	průměr	[m]
k	kinetická energie turbulence	[m ² .s ⁻²]
n	otáčky	[min ⁻¹]
p	statický tlak	[Pa]
t	čas	[s]
u	rychlost	[m.s ⁻¹]
ε	disipace kinetické energie	[m ² .s ⁻³]
μ	dynamická viskozita	[Pa.s]
μ _t	turbulentní viskozita	[Pa.s]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
τ	smykové napětí	[Pa]
ω	specifická disipace energie	[s ⁻¹]

Seznam použité literatury

- [1] Rieger, F., Novák, V., Jirout, T.: Hydromechanické procesy I. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 209 s. ISBN 80-01-03283-8.
- [2] WYSS, Kurt W. *APPARATUS FOR THE MIXING OF FLUIDS, IN PARTICULAR PASTY MEDIA AND A PROCESS FOR ITS OPERATION*. 1991. USA. 5,037,209 Foreign Application Priority Data. Uděleno Feb. 3, 1989. Zapsáno Aug. 6, 1991.
- [3] Visco Jet® Rührsysteme GmbH. *Visco Jet* [online]. Daimlerstr. 1 79761 Waldshut-Tiengen Germany [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <http://www.viscojet.com/en/>
- [4] PAUL, Edward L., Victor A. ATIEMO-OBENG a Suzanne M. KRESTA. *Handbook of industrial mixing: science and practice*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience. ISBN 04-712-6919-0.
- [5] TSUI, Yeng-Yung a Yu-Chang HU. Flow Characteristics in Mixers Agitated by Helical Ribbon Blade Impeller. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2014, 5(3), 416-429. DOI: 10.1080/19942060.2011.11015383. ISSN 1994-2060. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19942060.2011.11015383>
- [6] RAHIMI, Masoud, Saeideh AMRAEI and Ammar Abdulaziz ALSAIRAFI. Experimental and computational fluid dynamics modeling of mixing by Visco-jet impellers. *Korean J. Chem. Eng.* 2011(28(6), 1372-1379. DOI: 10.1007/s11814-010-0522-y.
- [7] Products. *Heidolph* [online]. Schwabach, Germany [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <http://www.heidolph-instruments.com/products/overhead-stirrers-from-heidolph-powerful-stirring/impellers-for-the-heidolph-overhead-stirrer/visco-jet-impellers-for-overhead-stirrers-from-heidolph-powerful-stirring/>
- [8] Měření příkonu míchadla při míchání suspenzí – návod. [online] www.fs.cvut.cz/cz/u218/pedagog/PREDMETY/4rocnik/zks/powersus/psunavod.html
- [9] Uploads. [Http://uchi.vscht.cz](http://uchi.vscht.cz) [online]. [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/turbulentni.proudeni.pdf>

[10] VLČEK, Petr. *MODELOVÁNÍ TURBULENTNÍHO PROUDĚNÍ*. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, email: Petr.Vlcek@fs.cvut.cz. Vedoucí práce prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

[11] doc. Ing. Mgr. Jiří Maxa, Ph.D. *Výuka Cax systémů na Ústavu elektrotechnologie* [online]. Technická 10 616 00 Brno [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2921317/>

[12] QIN, Y.P., C. YAN, Z.H. HAO a L. ZHOU. A laminar kinetic energy transition model appropriate for hypersonic flow heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017(107), 1054–1064. DOI: 0017-9310/.