

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**Hydrodynamicky optimalizovaná  
míchadla pro technologie čištění a  
úpravy vod**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Praha 2021  
Vedoucí práce:

Bc. Jakub Nováček  
prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nováček** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **435366**  
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:

**Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla pro technologie čištění a úpravy vod**

Název diplomové práce anglicky:

**Hydrofoil impeller for technology for water treatment**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte literární, patentovou a průmyslovou rešerši zaměřenou na hydrodynamicky optimalizovaná míchadla. Definujte požadavky na procesní parametry těchto typů míchadel.
2. Popište metodiku optimalizace tvaru lopatek hydrodynamicky optimalizovaných míchadel vhodných pro technologie úpravy a čištění odpadních vod, tj. pro míchání nízkoviskózních vsádek.
3. Navrhněte vlastní tvar lopatek těchto míchadel, zpracujte jeho 3-D model a zajistěte výrobu prototypu metodou 3-D tisku.
4. Na základě vlastních experimentů, nebo numerických simulací, porovnejte základní procesní parametry navrženého míchadla se standardizovanými míchadly a ostatními hydrodynamicky optimalizovanými míchadly, pro která jsou data k dispozici v literatuře.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní literární, patentové a průmyslové rešerše.

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: **21.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **14.02.2021**

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

  
prof. Ing. Tomáš Jirout, 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.

\_\_\_\_\_  
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

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D. za odbornou pomoc a panu doc. Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za konzultace a pomoc při tvorbě simulací.

## ANOTAČNÍ LIST

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Jméno autora:</b>         | Jakub  |
| <b>Příjmení autora:</b>      | Nováček  |
| <b>Název práce česky:</b>    | Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla pro technologie čištění a úpravy vod  |
| <b>Název práce anglicky:</b> | Hydrofoil impeller for technology for water treatment  |
| <b>Akademický rok:</b>       | 2020/2021  |
| <b>Jazyk práce:</b>          | český  |
| <b>Ústav:</b>                | 12118 Procesní a zpracovatelské techniky   |
| <b>Studijní program:</b>     | (N2301) Strojní inženýrství  |
| <b>Vedoucí práce:</b>        | prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.   |
| <b>Anotace:</b>              | <p>Tato diplomová práce se zabývá návrhem nového míchadla a následnou simulací jeho základních charakteristik do aplikací pro čištění a úpravu vod. Nejprve je provedena rešerše a teoretický úvod. Následuje návrh vlastního míchadla a postup při tvorbě CFD simulace. Nakonec je provedeno porovnání čerpacích účinností standardizovaných míchadel s navrhovaným míchadlem.</p>                                    |
| <b>Annotation:</b>           | <p>This diploma thesis focuses on design of a new impeller and subsequent simulation of its basic characteristics in applications for water treatment. Firstly a search and a theoretical introduction are performed. The following is the design of new impeller and procedur for creating CFD simulation. Finally a comparison of pumping efficiencies of standardized impellers with new impeller is performer.</p> |

**Klíčová slova:**

Axiální míchadlo, Hydrodynamicky optimalizované míchadlo, Příkon míchadla, Čerpací výkonnost, Čerpací účinnost míchadla, CFD simulace

**Keywords:**

Axial impeller, Hydrofoil impeller, Power consumption of impeller, Pump performance, Pump efficiency of impeller, CFD simulation

# 1 Obsah

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod.....  | 8  |
| 2. Teoretická část .....  | 9  |
| 2.1. Základní principy míchání, teorie míchání .....                | 9  |
| 2.1.1. Hydrodynamika .....  | 9  |
| 2.1.2. Příkon rotačních míchadel .....                              | 11 |
| 2.1.3. Homogenizace .....   | 13 |
| 2.1.4. Doba homogenizace.....                                       | 13 |
| 2.1.5. Čerpací účinky míchadla .....                                | 14 |
| 2.2. Základní typy míchání.....                                     | 15 |
| 2.2.1. Hydraulické míchání.....                                     | 15 |
| 2.2.2. Pneumatické míchání .....                                    | 16 |
| 2.2.3. Míchání v potrubí.....                                       | 16 |
| 2.2.4. Mechanické míchání .....                                     | 16 |
| 2.3. Průmyslová rešerše míchadel .....                              | 18 |
| 2.3.1. Míchadla vhodná k homogenizaci .....                         | 18 |
| 2.3.2. Míchadla vhodná k flokulaci .....                            | 22 |
| 2.3.3. Míchadla vhodná k suspenzi.....                              | 23 |
| 3. Popisná část.....  | 24 |
| 3.1. Procesní parametry .....                                       | 24 |
| 3.2. Optimalizace lopatek.....                                      | 25 |
| 4. Návrh vlastního míchadla .....                                   | 28 |
| 5. Experimentální stanovení procesních charakteristik míchadla..... | 32 |
| 5.1. Geometrie míchadla .....                                       | 32 |
| 5.1.1. Úprava geometrie.....  | 33 |
| 5.2. Meshing.....   | 35 |
| 5.3. Numerická chybovost sítě .....                                 | 38 |
| 5.3.1. Simulace.....  | 39 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 5.3.2.                                    | Metoda výpočtu MRF (Multiple Reference Frame): ..... | 40 |
| 5.3.3.                                    | Výsledky numerické chybovosti.....                   | 41 |
| 5.4.                                      | Výsledky simulace .....                              | 43 |
| 5.4.1.                                    | Příkonové číslo míchadla.....                        | 43 |
| 5.4.2.                                    | Čerpací účinky míchadla .....                        | 44 |
| 5.5.                                      | Posouzení výsledků.....                              | 49 |
| 5.6.                                      | Vizualizace .....                                    | 51 |
| Závěr .....                               |  | 53 |
| Seznam použité literatury .....           |  | 54 |
| Seznam použitých symbolů a označení ..... |  | 56 |
| Seznam obrázků.....                       |  | 58 |
| Seznam tabulek .....                      |  | 60 |
| Elektronické přílohy .....                |  | 61 |



# 1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá mechanickým mícháním, které se dá dále rozdělit na rotační a vibrační. Nejčastěji se používají míchadla rotační, která vytvářejí nucené proudění v nádobě. Použitím vhodného míchadla a geometrického uspořádání takové soustavy se docílí vysoké účinnosti celého procesu.

Míchání je hydrodynamický proces, při kterém je vyvoláván vzájemný pohyb míchané vsádky. Využívá se v aplikacích celé řady technických odvětví, jako jsou například chemický, potravinářský a spotřební průmysl, a v mnoha dalších oborech lidské činnosti.

Míchadla lze rozdělit dle způsobu proudění v nádobě na míchadla axiální, radiální a tangenciální. Mezi axiální míchadla řadíme například pásová, šroubová, vrtulová a míchadla se skloněnými lopatkami. Radiální míchadla představují zejména míchadla turbínová. Tangenciální míchadla se obecně používají pro vysoce viskózní kapaliny a obvykle jsou pomaloběžná. V této diplomové práci se věnuji mechanickému míchání pomocí rychloběžných axiálních míchadel.

Axiální míchadla jsou k dispozici v mnoha geometrických a konstrukčních provedeních. V dnešní době se nejčastěji navrhují hydrodynamicky optimalizovaná míchadla, tzv. hydrofoilní míchadla, která mají různě tvarované lopatky usnadňující tok kapaliny. Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla mají obvykle vyšší čerpací účinnost a lepší procesní parametry, jako je například homogenizace vsádky a suspendace při nižších energetických nárocích.

V praktické části diplomové práce se věnuji návrhu vlastního hydrodynamicky optimalizovaného míchadla. Toto míchadlo následně podrobuji simulacím, které mají za cíl určit procesní parametry míchadla. Míchadlo je určeno do aplikací pro čištění a úpravu vody, tedy pro nízko viskózní kapaliny. Cílem práce je stanovit příkonové číslo, bezrozměrnou čerpací výkonost a čerpací účinnost navrženého míchadla a tyto parametry dále porovnat se standardizovanými míchadly.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Základní principy míchání, teorie míchání

Míchání je jednou ze základních operací, které se používají v chemickém, potravinářském a spotřebním průmyslu. Míchání usnadňuje intenzifikaci přenosu tepla a hmoty v míchané vsádce, slouží k přípravě směsí požadovaných vlastností a homogenizaci směsi. [1]

#### 2.1.1. Hydrodynamika

Primárním účinkem míchadel je vytvořit cirkulační smyčku proudění v celé nádobě. Rozložení rychlosti a tlaku získáme z řešení rovnice kontinuity a z Navier-Stokesovy rovnice.

Rovnice kontinuity pro nestlačitelné kapaliny

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2-1)$$

Navier-Stokesova rovnice (při zanedbání gravitačních sil)

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u}. \quad (2-2)$$

Řešení těchto systémů je v důsledku složitosti nemožné. Z tohoto důvodu se využívá metoda inspekční analýza (teorie podobnosti). Do rovnice kontinuity a do Navier-Stokesovy rovnice zavedeme bezrozměrné proměnné.

$$\vec{u}^* = \frac{\vec{u}}{nd} \quad (2-3)$$

$$\nabla^* = d\nabla \quad (2-4)$$

$$t^* = nt \quad (2-5)$$

Charakteristická rychlost je nahrazena součinem  $nd$ , za charakteristický čas dobu jedné otáčky  $n^{-1}$ .

Bezrozměrná rovnice kontinuity

$$\nabla^* \cdot \vec{u}^* = 0 \quad (2-6)$$

Bezrozměrná Navier-Stokesova rovnice

$$\rho n^2 d \frac{D\vec{u}^*}{Dt^*} = -\frac{1}{d} \nabla^* p + \frac{\mu n}{d} \nabla^{*2} \vec{u}^*. \quad (2-7)$$

Po vydělení výrazem vyjadřujícím vliv setrvačných sil:

$$\frac{D\vec{u}^*}{Dt^*} = -\frac{1}{\rho n^2 d^2} \nabla^* p + \frac{\mu}{\rho n d^2} \nabla^{*2} \vec{u}^* \quad (2-8)$$

Bezrozměrný tlak:

$$p^* = \frac{p}{\rho n^2 d^2} \quad (2-9)$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{\rho n^2 d^2}{\mu} \quad (2-10)$$

Výsledný tvar:

$$\frac{D\vec{u}^*}{Dt^*} = -\nabla^* p^* + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} \vec{u}^* \quad (2-11)$$

Z inspekční analýzy vyplývá, že bezrozměrná rychlost a tlak jsou funkcemi bezrozměrné polohy a bezrozměrného času a Reynoldsova kritéria. Při ustáleném proudění má časová závislost periodický charakter (způsoben geometrickým tvarem míchadla popř. nádoby). Časová závislost tlaku a rychlosti se proto zanedbává a okamžité veličiny rychlosti a tlaku jsou nahrazeny středními hodnotami.

Při velkých hodnotách Reynoldsova čísla jsou vazké síly zanedbatelné a rovnice přejde do následujícího tvaru. Tento tvar rovnice platí i pro oblast turbulentního proudění, protože síly mají stejný charakter jako setrvačné síly:

$$\frac{D\vec{u}^*}{Dt^*} = -\nabla^* p^*. \quad (2-12)$$

### 2.1.2. Příkon rotačních míchadel

Příkon rotačních míchadel se určuje stejným způsobem jako příkon čerpadla, a to z rovnice:

$$P = \int n d\vec{u}^* \cdot [\rho n^2 d^2 p^* \vec{\delta} + \mu n [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T]] \cdot \vec{n} dS^* \quad (2-13)$$

Po vydělení výrazem  $\rho n^3 d^5$  převedeme rovnici do bezrozměrného tvaru:

$$\frac{P}{\rho n^3 d^5} = \int \vec{u}^* \cdot [-p^* \vec{\delta} + \frac{\mu}{\rho n d^2} [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T]] \cdot \vec{n} dS^*, \quad (2-14)$$

kde  $S^* = S/d^2$  je bezrozměrná plocha a bezrozměrné kritérium na levé straně se nazývá příkonové číslo  $Po$ .

$$Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5} \quad (2-15)$$

Rovnici lze tedy přepsat do tvaru:

$$Po = \int \vec{u}^* \cdot [-p^* \vec{\delta} + \frac{1}{Re} [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T]] \cdot \vec{n} dS^* \quad (2-16)$$

U většiny rotačních míchadel nelze stanovit tvar rychlostního a tlakového profilu analyticky, proto je výhodné získat obecnou kritériální rovnici z inspekční analýzy.

Pokud se míchadlo nachází dostatečně daleko od volné hladiny, gravitační síly neovlivňují rychlostní a tlakové pole, čímž vyřadíme závislost na bezrozměrné souřadnici a dostaneme inspekční analýzu ve tvaru:

$$Po = f(Re) \quad (2-17)$$

V turbulentní oblasti převládají setrvačné síly (vysoké hodnoty Reynoldsova čísla). Bezrozměrná rychlost a bezrozměrný tlak jsou pouze funkcí polohy. Převládá tvarový odpor lopatek nad třecím odporem. V turbulentní oblasti nezávisí příkonové číslo na Reynoldsově čísle.

$$Po = - \int \vec{u}^* \cdot p^* \vec{\delta} \cdot \vec{n} dS^* \quad (2-18)$$

$$Po = B = \text{konst.} \quad (2-19)$$

V oblasti plouživého proudění vypadá rovnice inspekční analýzy následovně:

$$\frac{P}{\mu n^2 d^3} = \int \vec{u}^* \cdot [-p^* \vec{\delta} + [\nabla^* \vec{u}^* + (\nabla^* \vec{u}^*)^T]] \cdot \vec{n} dS^* \quad (2-20)$$

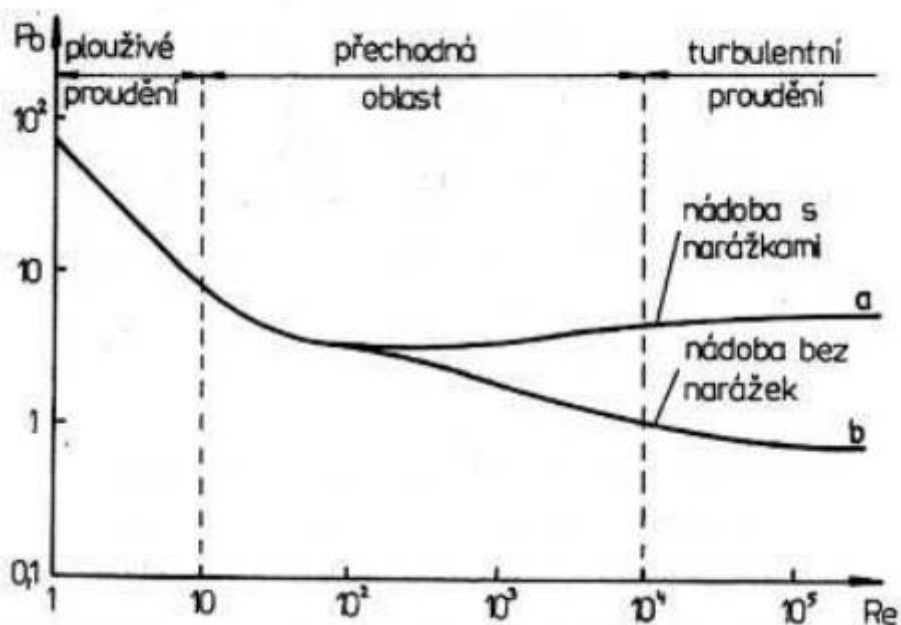
V oblasti plouživé proudění platí, že:

$$\frac{P}{\rho n^3 d^5} = A = \text{konst.} \quad (2-21)$$

Po zavedení bezrozměrného kritéria a příkonového čísla můžeme rovnici přepsat do tvaru:

$$Po \cdot Re = A \quad (2-22)$$

Konstanty A a B závisejí na geometrickém uspořádání systému. Určuje se pomocí měření na podobném modelu. Tato závislost se nazývá příkonová charakteristika míchadla.



Obrázek 1 Příkonová charakteristika míchadla [1]

### 2.1.3. Homogenizace

Jednou z nejdůležitějších funkcí míchání je zajištění homogenizace dvou nebo více vzájemně mísitelných kapalin. Měřítkem homogenizačního účinku míchadla jsou stejnorodost požadované směsi nebo například rovnoměrné rozložení teplot v míchané kapalině. Doba homogenizace definujeme jako čas nezbytný pro dosažení určitého stupně homogenity, který si musíme předem zvolit. Pro vyhodnocování stupně homogenity se v literatuře používá více různých druhů definic. Jedním z nejvhodnějších ukazatelů může být například bezrozměrná koncentrace, kterou definujeme vztahem:

$$c_A^* = \frac{c_A - c_{A0}}{c_{AK} - c_{A0}}, \quad (2-23)$$

kde  $c_{A0}$  je počáteční koncentrace přidávané složky A v počátečním čase  $t = 0$ ,  $c_{AK}$  konečná koncentrace po dokonalém rozmíchání a  $c_A$  je okamžitá koncentrace složky A ve sledovaném místě. [1]

### 2.1.4. Doba homogenizace

Teoretický popis homogenizace by vyžadoval simultánní řešení Navier-Stokesovy rovnice a základní rovnice pro přenos hmoty. Při míchání vzájemně mísitelných kapalin je řídicím dějem zpravidla konvektivní a turbulentní difúze. Molekulární difúze je v kapalinách relativně pomalá, a proto ji lze vzhledem k dříve uvedeným mechanismům v dobře míchaných systémech zanedbat.

S použitím inspekční analýzy lze  $t^*$  vyjádřit jako:

$$t^* = f(\vec{u}^*, c_A^*, \vec{x}^*), \quad (2-24)$$

protože doba homogenizace  $t_m$  je definována jako čas potřebný k tomu, aby v každém místě vsádky (určeno souřadnicí  $x$ ) bylo dosaženo určité hodnoty bezrozměrné koncentrace  $c_A^*$ , dostaneme rovnici ve tvaru [1]:

$$t^* = n \cdot t_m = f(Re), \quad (2-25)$$

### 2.1.5. Čerpací účinky míchadla

Inspekční analýzou přenosových rovnic v míchaném systému můžeme odvodit vztah, kdy bezrozměrná rychlost (tlak) závisí v geometricky podobných systémech na bezrozměrné poloze, času a Reynoldsově čísle dle vztahu:

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\mu}, \quad (2-26)$$

kde  $n$  jsou otáčky míchadla,  $d$  je průměr míchadla,  $\rho$  je hustota kapaliny a  $\mu$  je dynamická viskozita kapaliny. [4]

Čerpací výkon míchadla je definován jako objemové množství kapaliny, které vystoupí z rotorové oblasti míchadla za jednotkový čas dle vztahu:

$$Q_p = \frac{1}{2} \int_S [\text{sgn}(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\mathbf{n}})] \tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\mathbf{n}} dS \quad (2-27)$$

kde  $\tilde{\mathbf{u}}$  je střední rychlost,  $S$  je povrch válce o průměru rovném průměru míchadla a výšce rovné axiální výšce lopatek a  $\tilde{\mathbf{n}}$  je jednotkový vektor normály k ploše  $S$ . [2]

Když převedeme tuto rovnici (2-27) do bezrozměrného tvaru a provedeme inspekční analýzu, lze dokázat, že pro geometricky podobná uspořádání je bezrozměrná čerpací výkonnost (průtokové číslo) závislé pouze na modifikovaném Reynoldsově čísle dle vztahu:

$$N_{Qp} = \frac{Q_p}{nd^3} = f(Re) \quad (2-28)$$

Pro vysoké hodnoty modifikovaného Reynoldsova čísla na základě inspekční analýzy přechází průtokové číslo v konstantní hodnotu:

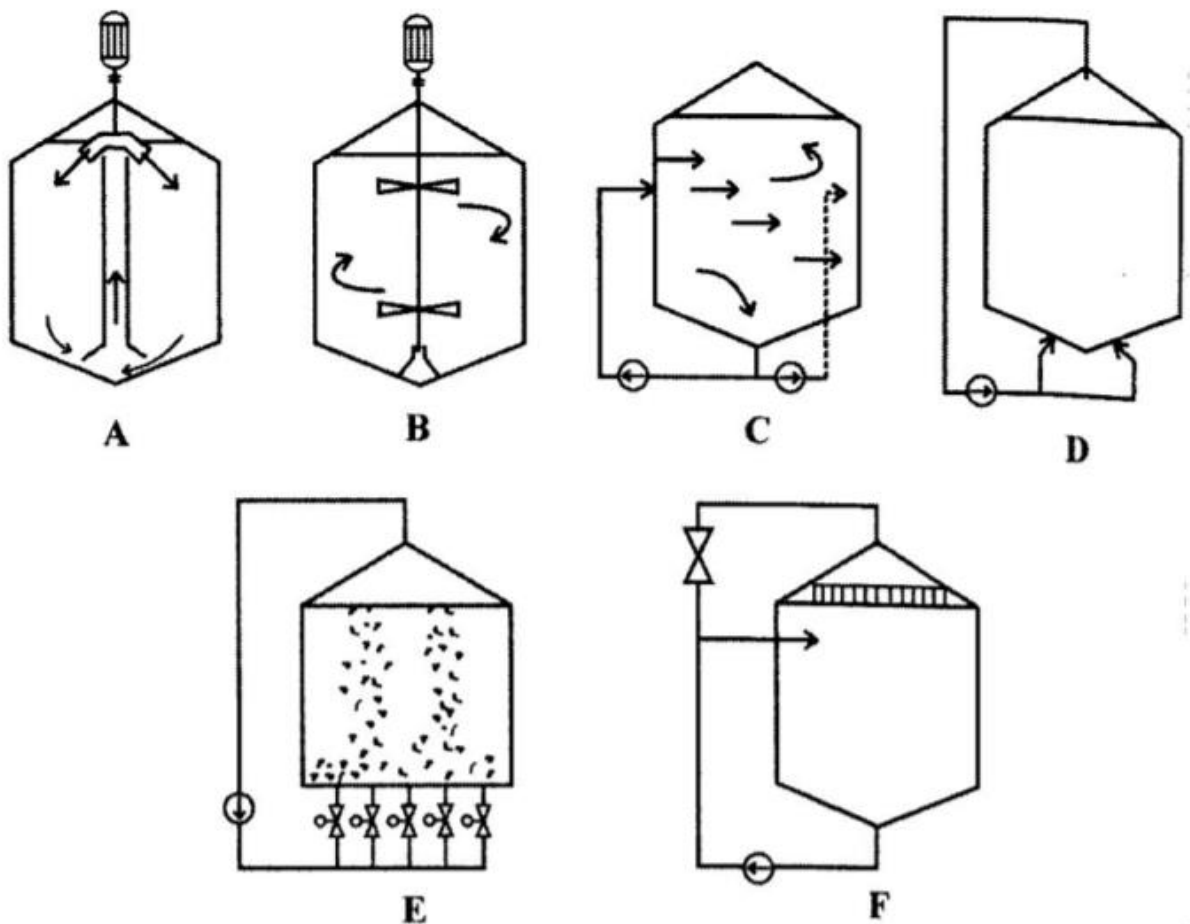
$$N_{Qp} = \text{konst.} \quad (2-29)$$

Experimentálně se čerpací účinky míchadel zjišťují pomocí numerické integrace naměřených rychlostních profilů na výtoku z míchadla dle rovnice (2-26) nebo měřením střední doby cirkulace dvou po sobě jdoucích průchodů indikační částice kontrolní plochou (míchadlem). [2]

## 2.2. Základní typy míchání

### 2.2.1. Hydraulické míchání

Hydraulické míchání pracuje na základě přečerpávání kapaliny pomocí oběžných čerpadel. Proud vystupující z trysky uvnitř míchané nádoby vytlačuje a strhuje okolní kapalinu. Na okraji proudu se poté tvoří víry a v celém objemu kapaliny dochází k proudění a následnému promíchání. [1]



Obrázek 2 Způsoby míchání [1]

A – mechanické míchání turbínové, B – mechanické míchání lopatkové, C – hydraulické míchání, D – pneumatické míchání – pevné vstupy, E – pneumatické míchání – programově řízené, F – hydraulické míchání – odpěňovací sprcha [1]



### **2.2.2. Pneumatické míchání**

Pneumatické míchání probíhá na základě přivádění stlačeného plynu, který je dále rozptylován do kapaliny ve formě bublin. Bubliny, které stoupají vzhůru, s sebou strhávají okolní kapalinu, čímž dochází k proudění kapaliny a následnému promíchání. [1]

### **2.2.3. Míchání v potrubí**

Při dopravě kapaliny společným potrubím se vzájemně mísitelné kapaliny směšují. Kapalína proudí nejčastěji v turbulentním režimu proudění, aby byla zajištěna vyšší intenzita směšování. K tomuto účelu se často do potrubí instalují statické směšovače (tvarované vestavby v potrubí), které usměrňují proudění a umožňují promíchávání v radiálním směru. [1]

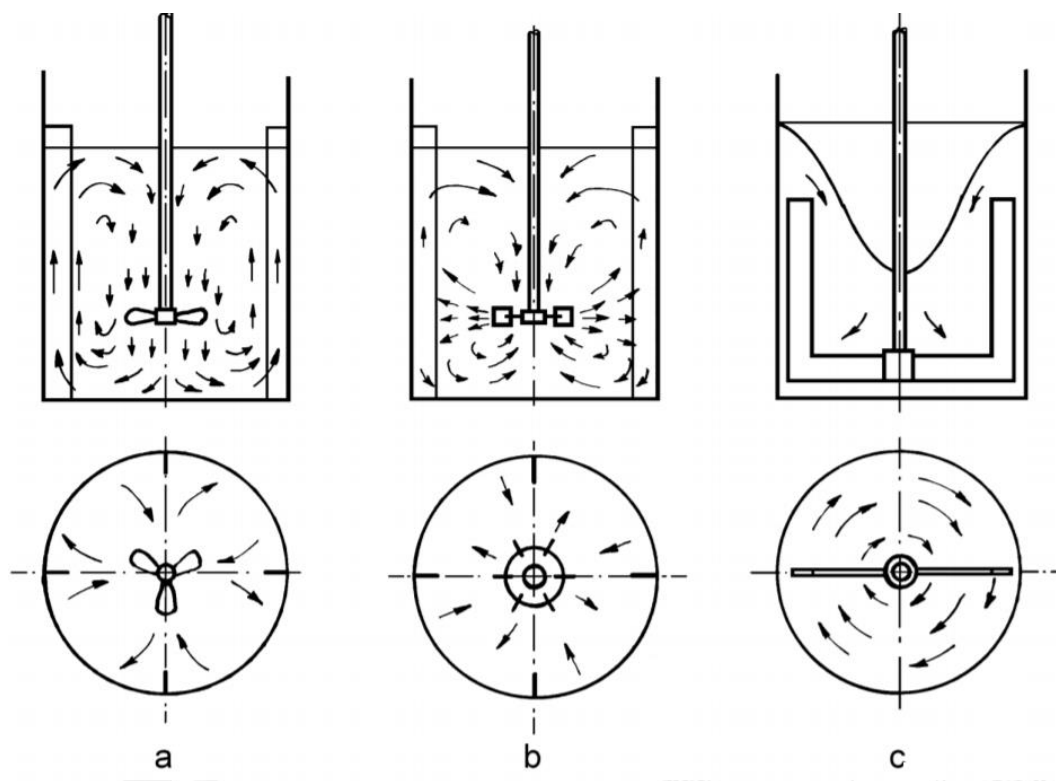
### **2.2.4. Mechanické míchání**

Mechanické míchání se dá rozdělit na rotační a vibrační. V této diplomové práci se zabývám rotačními míchadly. Vibrační míchadla konají kmitavý pohyb s malým zdvihem vyvolaným nejčastěji elektromagnetem napájeným střídavým proudem. Vibrační míchadla se dají použít pro míchání v malých objemech. Nejčastějším typem jsou míchadla rotační, která vytvářejí v nádobě nucené proudění.

V závislosti na typu konstrukce vyvolávají rotační mechanická míchadla proudění v určitých směrech. Pohon míchadel může být umístěn uvnitř nebo vně nádoby. Podle typu míchadla a dalších parametrů, jako jsou například obsah nádrže, čistitelnost, ucpávka nádrže, se pohon umísťuje nad nádobu nebo případně pod ni. Podle frekvence otáčení lze rozdělit mechanická míchadla na pomaloběžná a rychloběžná. V této práci se nejčastěji věnuji rychloběžným míchadlům. Pomaloběžná míchadla mají menší hodnoty poměru mezi průměrem nádoby  $T$  a průměrem míchadla  $d$  (obvyklé hodnoty okolo  $T / d$

$\leq 2$ ). Tato (pomaloběžná) míchadla se nejčastěji používají pro vysoce viskózní látky a také jako dopravníky. Rychloběžná míchadla mají zpravidla poměr  $T / d \geq 3$ . Rychloběžná míchadla mají uplatnění pro nízko viskózní látky a pro velké hodnoty Reynoldsových čísel.

Podle způsobu proudění, který míchadlo v nádobě vyvolá, lze rozdělit míchadla na axiální, radiální, tangenciální. Axiální míchadla vytvářejí proudění, jehož proudnice má převážně axiální směr (rovnoběžný s osou nádoby). U axiálních míchadel se mohou instalovat tangenciální narážky, aby se zabránilo tangenciálnímu toku. Mezi axiální míchadla patří například šroubová, pásová, vrtulová, míchadla se skloněnými lopatkami. Radiální míchadla vytváření proudění převážně v radiálním směru a řadí se mezi ně především turbínová míchadla. Kvůli vysokému smykovému napětí dochází v blízkosti radiálních míchadel k rozbíjení částic, což je nutné brát v potaz při výběru vhodného typu míchadla. Tangenciální míchadla vytvářejí převážně tangenciální proudění, které je kolmé na osu míchadla. Patří mezi ně především pomaloběžná lopatková míchadla. Tangenciální míchadla se nejčastěji používají pro vysoce viskózní kapaliny. [1]



Obrázek 3 Způsoby provedení rotačních mechanických míchadel [1]

a – axiální proudění, b – radiální proudění, c – tangenciální proudění

## 2.3. Průmyslová rešerše míchadel

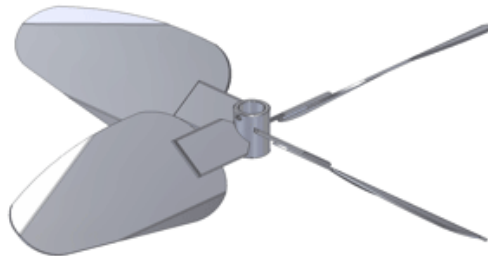
V průmyslové rešerši jsem se zaměřil na několik největších výrobců míchadel. Výrobci míchadel v České republice jsou například firmy Techmix, Envi-pur.

V této části diplomové práce se věnuji rozdělení míchadel jednotlivých výrobců a jejich průmyslovému použití.

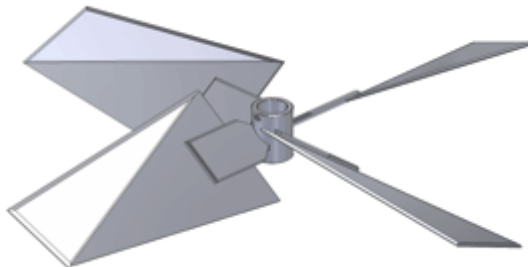
### 2.3.1. Míchadla vhodná k homogenizaci

Mezi tato míchadla patří axiální hydrofilní míchadla od firmy Techmix řady TX.

Jejich doporučené použití je pro homogenizační míchání méně viskózních medií a pro vzhos pevné fáze nade dnem.



Obrázek 4 Axiální míchadlo TX535

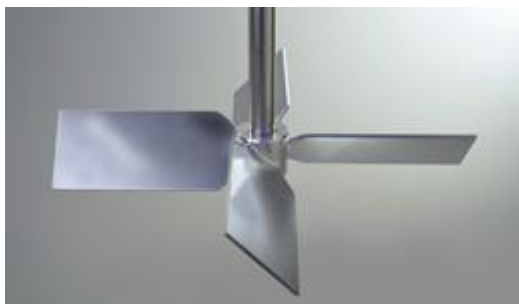


Obrázek 5 Axiální míchadlo TX545

Další axiální míchadla od firmy Lightnin řady A, jako jsou například:



*Obrázek 6 Axiální míchadlo A310/510 doporučeno pro míchání nízko viskózních médií.*



*Obrázek 7 Axiální míchadlo A200 vhodné pro míchání nízko a středně viskózních médií.*



*Obrázek 8 Axiální míchadlo A100 vhodné pro aplikace s menším průměrem nádoby.*

Míchadla firmy Ekato:



*Obrázek 9 Míchadlo Viscoprop. Možné ve variantách se dvěma, třemi a čtyřmi lopatkami skloněnými pod úhlem 24°, 35° nebo 45°.*



*Obrázek 10 Míchadlo Isojet vhodné pro homogenizaci a suspendaci ve vysokých nádobách.*



*Obrázek 11 Míchadlo Isojet B se čtyřmi lopatkami.*

Míchadla od firmy Chemineer:



Obrázek 12 Míchadlo RL-3 vhodné pro aplikace úpravy vody.



Obrázek 13 Míchadlo XE-3



Obrázek 14 Míchadlo Viscojet

### 2.3.2. Míchadla vhodná k flokulaci



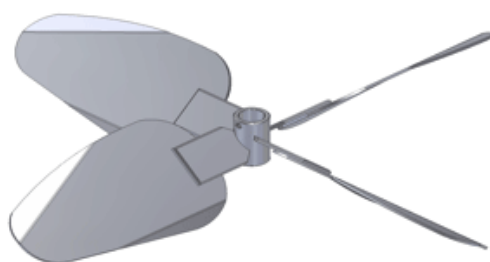
*Obrázek 15 Axiální míchadlo A310/510 doporučeno pro míchání nízko viskózních médií.*

### 2.3.3. Míchadla vhodná k suspenzi

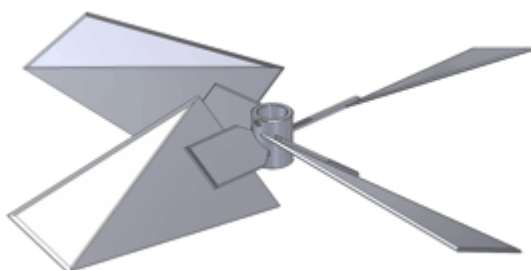
Míchání směsí kapaliny a pevné fáze je v průmyslu potřebné k intenzifikaci přenosu hmoty a tepla a k dosažení potřebné kvality dané směsi. Množství energie, které je potřebné dodat, je závislé na otáčkách míchadla a na jeho geometrickém uspořádání, proto je nutné znát jeho suspenzační charakteristiku.



Obrázek 16 Míchadlo Isojet vhodné pro homogenizaci a suspenzaci ve vysokých nádobách.



Obrázek 17 Axiální míchadlo TX535



Obrázek 18 Axiální míchadlo TX545



# 3. Popisná část

## 3.1. Procesní parametry

V této části práce jsem vyhledal některé procesní parametry, jako jsou příkonové číslo a čerpací účinnosti pro vybraná míchadla. S těmito míchadly jsem dále porovnával mnou vytvořený model hydrodynamicky optimalizovaného míchadla. V literatuře lze obvykle dohledat příkonová čísla pro turbulentní oblast proudění.

| Míchadlo                                   | H/D | D/d  | H <sub>2</sub> /d | Po    | N <sub>QP</sub> |
|--|-----|------|-------------------|-------|-----------------|
| 3SL24                                      | 1   | 2,67 | 0,5               | 0,37  | 0,41            |
| 3SL35                                      | 1   | 2,67 | 0,5               | 0,79  | 0,51            |
| 3SL45                                      | 1   | 2,67 | 0,5               | 1,27  | 0,56            |
| 6SL45                                      | 1   | 2,67 | 0,5               | 1,81  | 0,65            |
| 3RLL                                       | 1   | 2,67 | 0,5               | 0,79  | 0,51            |
| 4RLL                                       | 1   | 3    | 0,5               | 0,99  | -               |
| 6RLL                                       | 1   | 3    | 0,5               | 1,34  | -               |
| 3TL  | 1   | 3    | 0,5               | 0,73  | -               |
| A200 (Lightnin)                            | 1   | 2,67 | 0,5               | 1,27  | 0,79            |
| A310 (Lightnin)                            | 1   | 3    | 0,5               | 0,34  | 0,56            |
| HE-3 (Chemineer)                           | 1   | 3    | 0,5               | 0,22  | 0,47            |
| MP(EKATO)                                  | 1   | 2,67 | 0,5               | 0,44  | 0,42            |
| P(FH)                                      | 1   | 2,67 | 0,5               | 0,45  | 0,44            |
| 6SL  | 1   | 3    | 1                 | 1,66  | 0,84            |
| TX535                                      | 1   | 3    | 1                 | 0,67  | 0,60            |
| TX545                                      | 1   | 3    | 1                 | 0,86  | 0,71            |
| TX335                                      | 1   | 3    | 1                 | 0,94  | 0,77            |
| Spogis a Nunhez (2009)                     | 1   | 3    | 1                 | 0,085 | 0,218           |
| Spogis a Nunhez – průmyslová úprava (2016) | 1   | 3    | 1                 | 0,272 | 0,675           |

Tabulka 1 Příkonová čísla a čerpací charakteristiky rychloběžných míchadel v turbulentní oblasti proudění

**3SL24, 3SL35, 3SL45** – třílopatkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem  $\alpha = 24^\circ, 35^\circ$  resp.  $45^\circ$ ,

**6SL45** – šestilopátkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem  $\alpha = 45^\circ$ ,

**3RLL, 4RLL, 6RLL** – tři, čtyř, resp. šestilopátkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami dle CVS 69 1043 ( $s/d = 1,5$ ),

**3TL** – třílopatkové míchadlo s tvarovanými lopatkami dle CVS 69 1042.2,

**A310, A200** – axiální míchadlo firmy LIGHTNIN typ A310, A200

**HE-3** – axiální míchadlo firmy Chemineer

**MP(EKATO)** – vrtulové míchadlo – Marine propeller firmy EKATO,

**P(FH)** – vrtulové míchadlo – Anhalt University of Applied Sciences / Hochschule Anhalt (FH),

**TX335, TX445, TX535** – axiální hydrofoil míchadla firmy Techmix s.r.o,

**Spogis a Nunhez** – Hydrofoilní míchadlo [3], [6], [7]

## 3.2. Optimalizace lopatek

Geometrická konfigurace míchadla a tvar lopatek jsou jedny ze základních parametrů, které mají vliv na proces míchání. Pomocí simulačních modelů, experimentálních měření a provozních zkušeností je cílem zkonstruovat hydrodynamicky optimalizovaná míchadla, mající různě tvarované lopatky (hydrofoil míchadla). Cílem je konstrukce takových míchadel, která při nejnižší spotřebě energie vynaloží co největší čerpací výkon, co nejlépe usměrní tok vsádky. Úpravy lopatek spočívají buď ve zkosení (lomení), různých úpravách plochy jednotlivých lopatek, nebo v ohýbání. [2]

Historicky prvním stupněm ve vývoji hydrodynamicky optimalizovaných míchadel bylo zkosení lopatek o  $45^\circ$ . Díky tomuto zkosení lopatek bylo dosaženo rovnoměrnějšího axiální průtok kapaliny.



Obrázek 19 Šestilopátkové míchadlo CVS 69 1020 [2]

Dalším stupněm ve vývoji hydrodynamicky optimalizovaných míchadel je zvětšení plochy jednotlivých lopatek. Zvětšení plochy míchadla mělo za následek zlepšení procesních charakteristik míchadel. Jedním ze způsobů, jak toho lze dosáhnout, je například lomení lopatky, což je znázorněno na dalším obrázku.



Obrázek 20 Třílopatkové míchadlo CVS 69 1043 [2]

V posledním stupni vývoji jsou míchadla různě geometricky optimalizovaná. Takto optimalizovaná míchadla mají obvykle vyšší čerpací účinnost a lepší procesní parametry, jako je například homogenizace vsádky a suspendace při nižších energetických nárocích. [2]

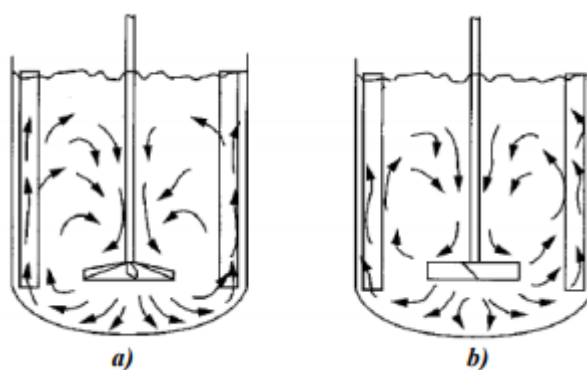


Obrázek 21 Hydrodynamicky optimalizované míchadlo

Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla se používají od 70. let minulého století v mnoha aplikacích míchání. Hydrofoilní míchadla mají obvykle tři lopatky, z tohoto důvodu jsem i já volil při návrhu vlastního míchadla tři lopatky. Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla mají obvykle nízký úhel náběhu (15-25° na špičce lopatky, aby se zabránilo oddělení mezní vrstvy). Obvykle se používají pro nízko viskózní kapaliny. Díky aerodynamickému tvaru jsou hydrofoilní míchadla účinnější než standardizovaná míchadla se šikmými lopatkami. [12]

Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla se obvykle používají v aplikacích s turbulentním prouděním, ale některé analýzy prokazují, že se dají využít i v aplikacích s laminárním prouděním. Byly provedeny například analýzy při míchání biomasy s vysokým obsahem pevných látek. Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla měla lepší čerpací účinnost (tedy nižší příkonové číslo a vyšší čerpací výkon) než standardizovaná míchadla se šikmými lopatkami. [5]

Mezi výhody hydrofoilních míchadel patří vyšší čerpací výkonnost, usměrněný axiální profil výtoku z míchadla, nižší kroučící moment pro stejné podmínky jako standardizovaná míchadla a nižší energetické nároky.



Obrázek 22 a) proudění v míchané vsádce s hydrofoilním míchadlem b) proudění v míchané vsádce se standardním míchadlem s šikmými lopatkami [2]

Jak je vidět na obrázku (22) u hydrodynamicky optimalizovaného míchadla hlavní (primární) cirkulační smyčka zaobírá většinu míchaného objemu. Indukované proudění je u hydrofoilních míchadel minimální.

## 4. Návrh vlastního míchadla

Návrh modelu nového míchadla jsem provedl v programu Autodesk Inventor. Průměr míchadla a náboje byl zadán vedoucím práce. Za pomoci údajů, které jsem zjistil při provádění rešerše, jsem volil při návrhu vlastního míchadla tři lopatky. Úhel náběhu lopatek jsem určil  $16^\circ$  (hydrodynamicky optimalizovaná míchadla mají obvykle nižší náběh, aby nedocházelo k odtrhávání mezní vrstvy proudění  $15\text{-}25^\circ$ ). Celkový sklon lopatky je poté  $26^\circ$ . Poměrně velkou plochu míchadla na jeho konci jsem zvolil s ohledem na jeho použití pro nízko viskózní kapaliny. Pro kapaliny s vyšší viskozitou kapalin bych volil míchadlo, které má naopak menší plochu. S ohledem na složitou geometrii míchadla byl návrh proveden v závislosti na výrobu pomocí 3D tisku. Alternativně je možné vyrobit míchadlo z odlitku. Při vlastní výrobě míchadla je nutno věnovat pozornost napojení lopatek na náboj míchadla, kde se dá očekávat největší napjatosti. V případě odlitku by problém s pevností nastat neměl, ale u 3D tisku je vhodné zvážit vyztužení kritického místa připojení, například pomocí žebrování nebo pomocí kovového jádra.

V příloze je přiložen model míchadla ve formátu .step. Pro případné zvětšení nebo zmenšení průměru míchadla je zapotřebí zachovat geometrickou podobnost míchadla.

Parametry míchadla a nádoby použité pro následnou simulaci míchání:

Nádoba:  $D/d \geq 3$

$$D = 300 \text{ mm}$$

Výška míchadla ode dna:  $H = d$

$$H = 100 \text{ mm}$$

Hřídel:  $D_H = 8 \text{ mm}$

$$L_H = 165 \text{ mm}$$

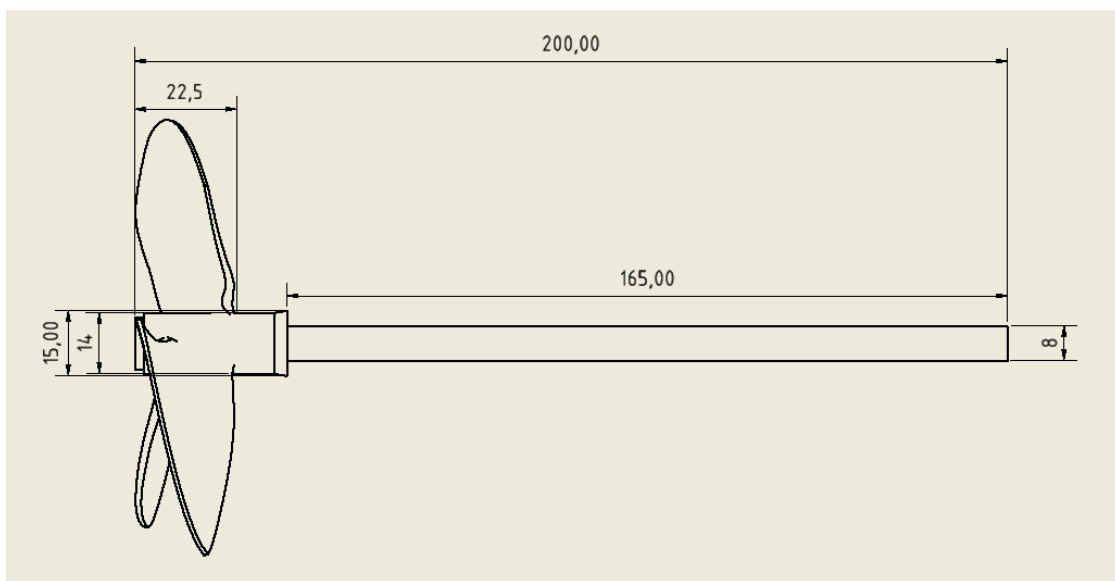
Náboj:  $D_N = 15 \text{ mm}$

Lopatky:  $d = 100 \text{ mm}$   
 $h_L/d = 0,225$   
 $h_L = 22,5 \text{ mm}$   
 $W_L = 2 \text{ mm}$

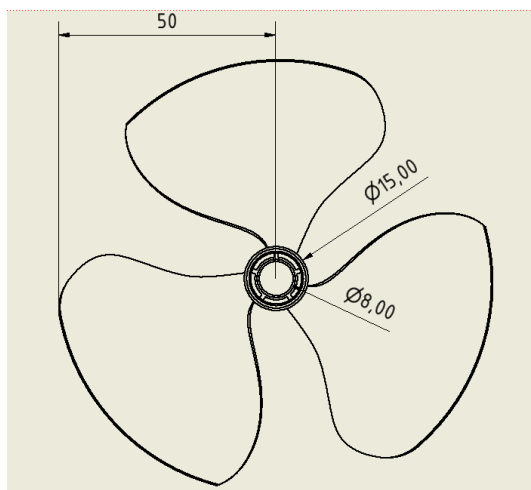
Úhel náběhu:  $\alpha = 16,2^\circ$

Narážky:

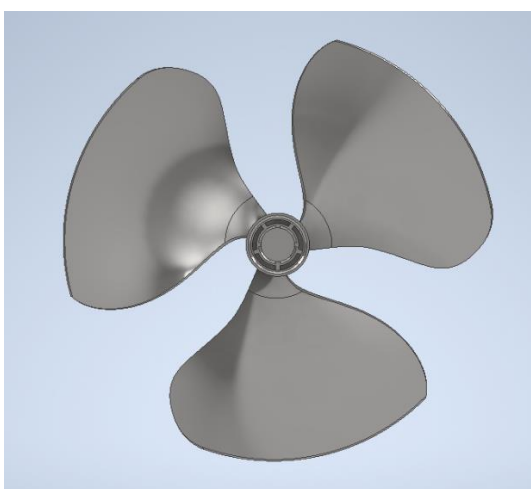
počet narážek:  $n = 4$   
délka narážky:  $L_N = 30 \text{ mm}$   
tloušťka plechu:  $W_N = 3 \text{ mm}$



Obrázek 23 Geometrie míchadla bokorys



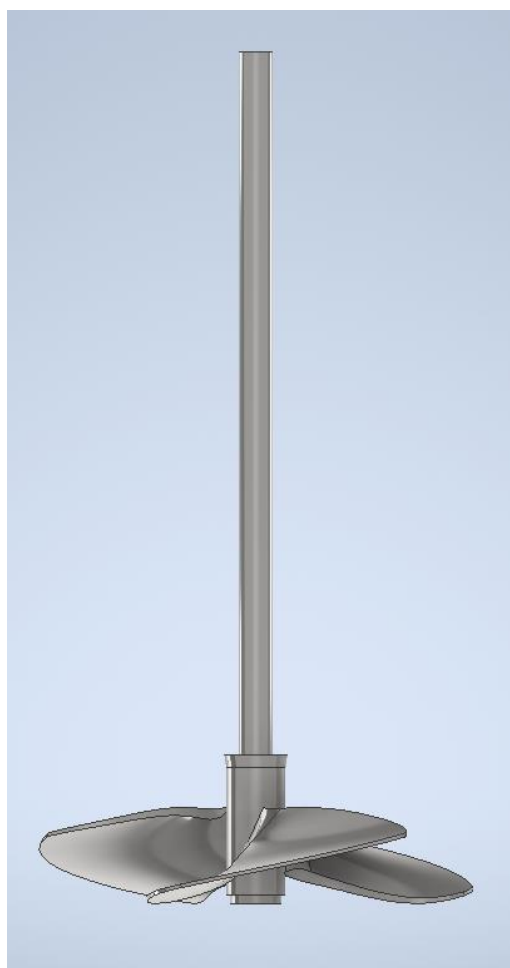
Obrázek 24 Geometrie míchadla půdorys



Obrázek 25 Míchadlo půdorys



*Obrázek 26 Míchadlo isometrie*



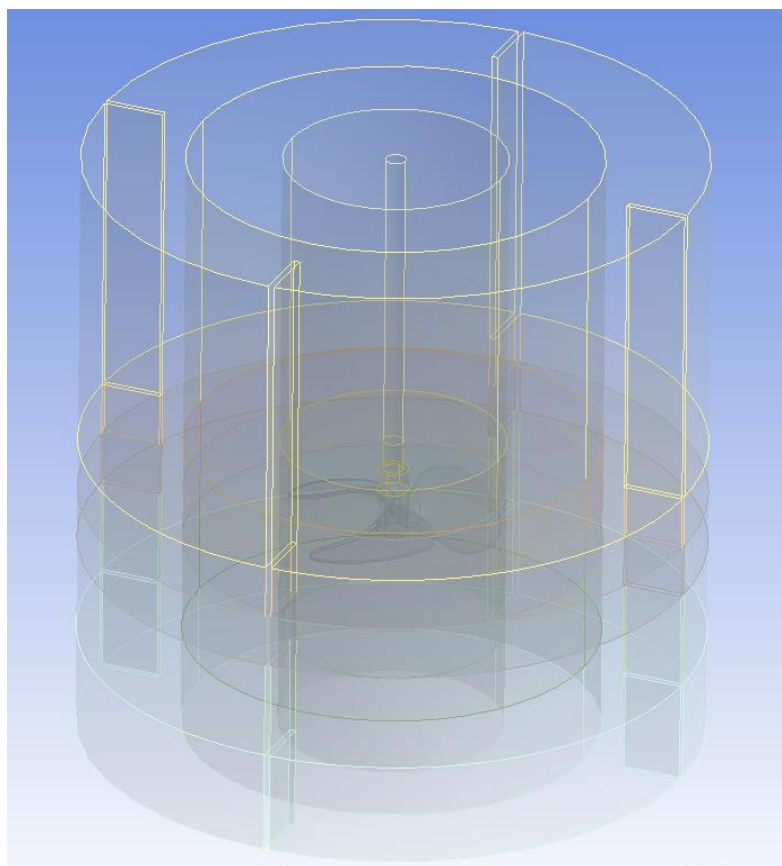
*Obrázek 27 Míchadlo bokorys*



# 5. Experimentální stanovení procesních charakteristik míchadla

## 5.1. Geometrie míchadla

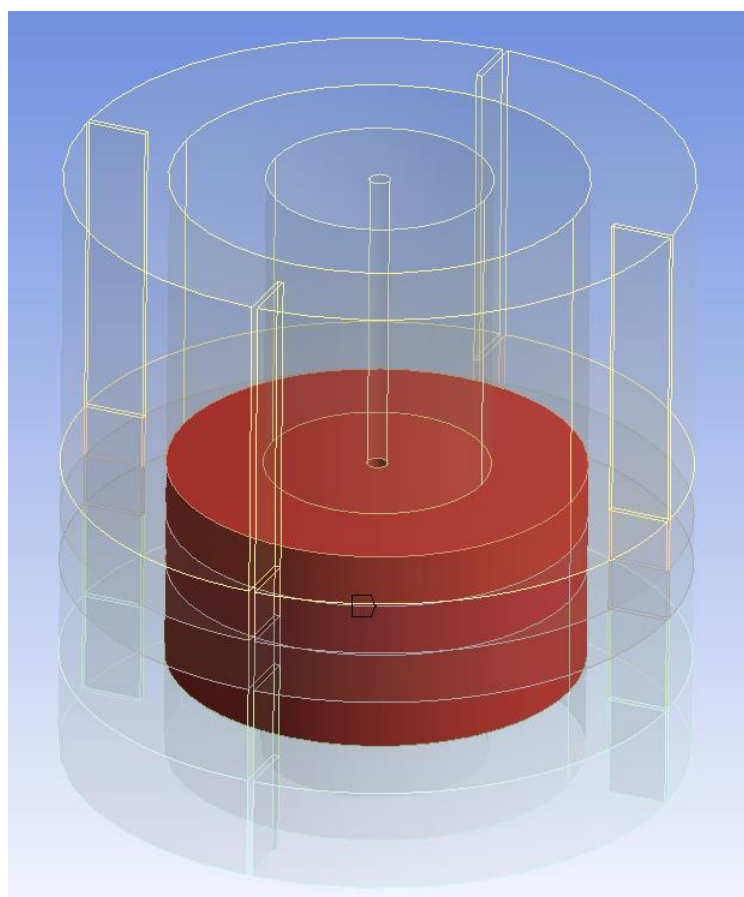
Model míchadla jsem vytvořil v programu Autodesk Inventor a importoval do prostředí ANSYS pro následující simulace. Pro simulace míchacího procesu v programu ANSYS Fluent model byl upraven na zjednodušený tvar – byla odstraněna zkosení a zaoblání. Tato zjednodušení byla provedena z toho důvodu, že uvedené prvky nemají žádný vliv na proces míchání (jejich vliv je tak malý, že lze zanedbat), ale velmi výrazně zhoršují kvalitu sítě.



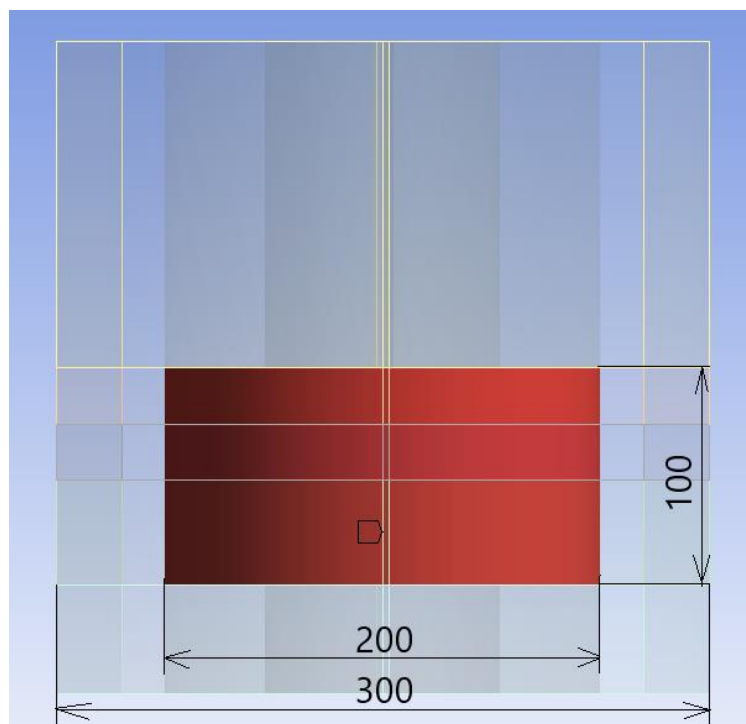
Obrázek 28 Geometrie vytvořená v programu DesignModeler

### 5.1.1. Úprava geometrie

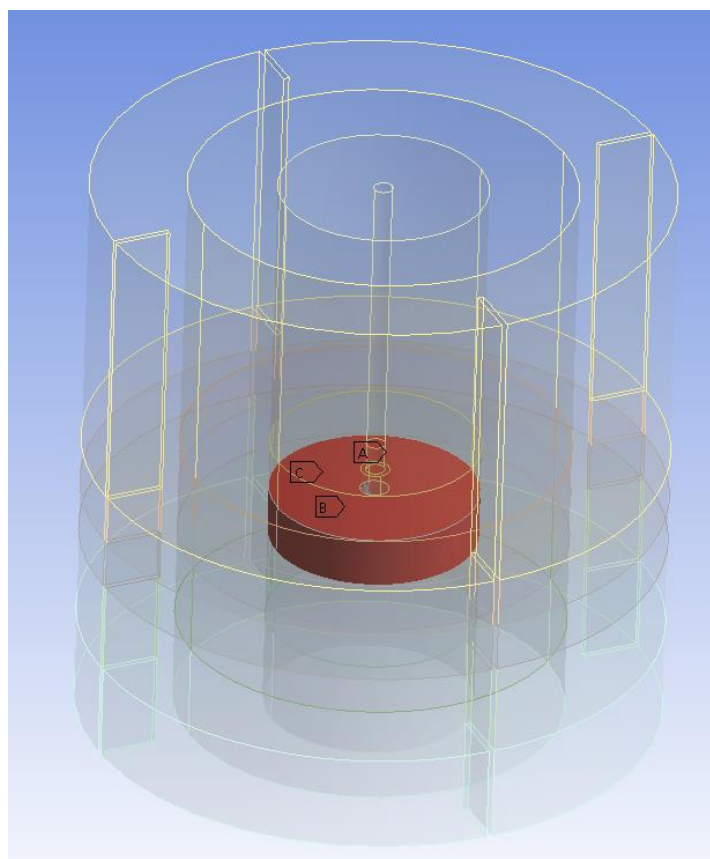
Model, stvořený v CAD aplikaci Inventor, jsem importoval do aplikace ANSYS Workbench pro další zpracování. V prostředí programu ANSYS Workbench, konkrétně v programu DesignModeler, jsem vytvořil nádobu, která má 4 narážky. Kapalný objem jsem dále rozdělil na dvě části, protože pro simulaci pohybu potřebujeme objekt vykonávající rotaci a objekt, který je ve stacionárním stavu. Malý objem kolem míchadla znázorňuje tzv. „rotor“, zbývající část představuje „stator“. Další samostatný objem byl vytvořen jako obálka míchadla. Na tomto objemu dále určuji průtok kapaliny míchadlem, z čehož lze dále dopočítat čerpací účinnost míchadla. Pomocí příkazu subtract byla do těchto objemů vyřezána geometrie míchadla a hřídele.



Obrázek 29 Rotorová oblast



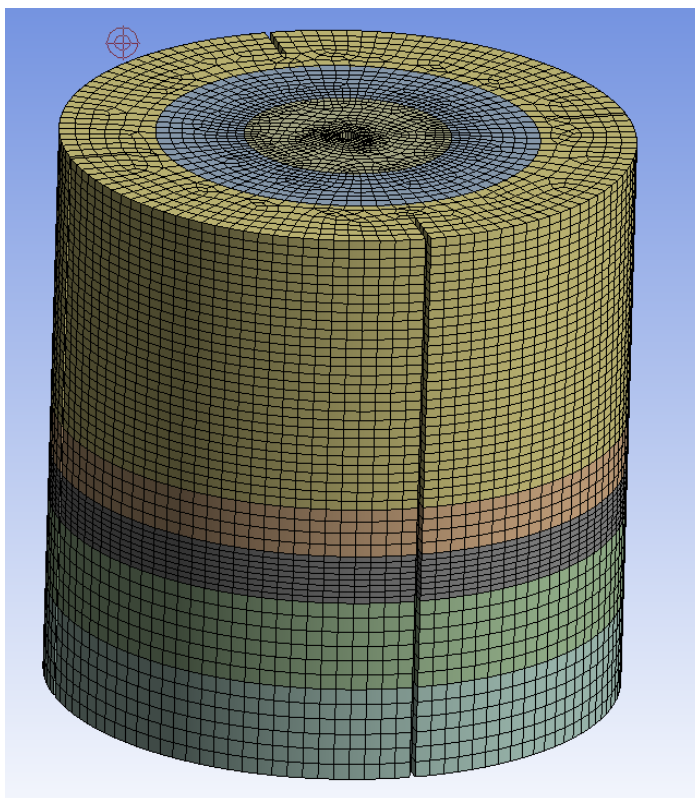
Obrázek 30 Rotorová oblast řez



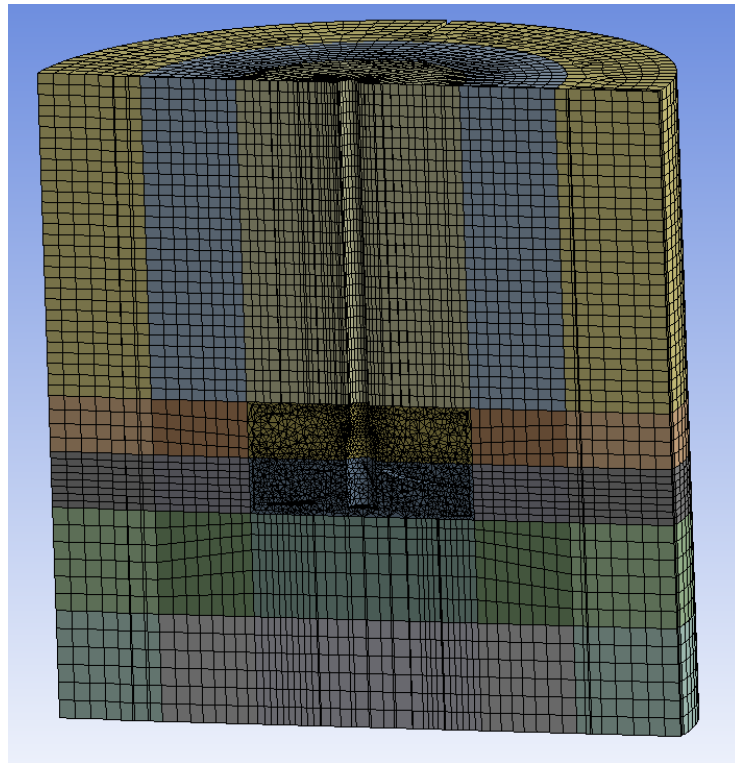
Obrázek 31 Objem okolo míchadla

## 5.2. Meshing

Po zadání geometrie a objemu jsem rozdělil model na jednotlivé samostatné objemy a následně jsem začal v programu Meshing tvořit síť míchadla, tedy rozdělení objemů na jednotlivé buňky. Základními parametry, podle kterých se určuje kvalita simulace, jsou velikost a tvar buněk. Síť můžeme vytvořit buď strukturovanou, nebo nestrukturovanou. Strukturovaná síť je tvořena pouze čtyřúhelníky (v dvourozměrných případech) a šestistěny (v trojrozměrných případech). Nestrukturované sítě jsou tvořeny trojúhelníky (v dvourozměrných případech) a čtyřstěny (v trojrozměrných případech). Obecně se doporučuje používat strukturovanou síť, která obvykle poskytuje lepší numerické výsledky a je také méně náročná na výpočet. V této části je výhodné, že jsem rozdělil objem na jednotlivé menší objemy, protože na nich lze definovat, jak má síť vypadat. Na většině objemů jsem vybral strukturovanou síť, pouze v okolí míchadla, které je geometricky náročnější, jsem zvolil nestrukturovanou síť s větším počtem elementů, protože v této oblasti budou největší gradienty rychlosti. Z tohoto důvodu je hustota buněk největší, což napomáhá přesnějšímu numerickému řešení rychlostního pole.



Obrázek 32 Strukturovaná síť



Obrázek 33 Nestrukturovaná síť v okolí míchadla

Tuto operaci jsem provedl třikrát po sobě, pokaždé s jiným počtem elementů a uzlů. Tímto způsobem vznikly tři sítě od nejhrubší po nejjemnější. Počet uzlů a elementů jednotlivých sítí:

| Details of "Mesh"                   |        |
|-------------------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> Display    |        |
| <input type="checkbox"/> Defaults   |        |
| <input type="checkbox"/> Sizing     |        |
| <input type="checkbox"/> Quality    |        |
| <input type="checkbox"/> Inflation  |        |
| <input type="checkbox"/> Advanced   |        |
| <input type="checkbox"/> Statistics |        |
| <input type="checkbox"/> Nodes      | 137331 |
| <input type="checkbox"/> Elements   | 222325 |

Obrázek 34 Nejhrubší síť

| Details of "Mesh"        |            |        |
|--------------------------|------------|--------|
| +                        | Display    |        |
| +                        | Defaults   |        |
| +                        | Sizing     |        |
| +                        | Quality    |        |
| +                        | Inflation  |        |
| +                        | Advanced   |        |
| -                        | Statistics |        |
| <input type="checkbox"/> | Nodes      | 456623 |
| <input type="checkbox"/> | Elements   | 707271 |

Obrázek 35 Středně hrubá síť

| Details of "Mesh"        |            |         |
|--------------------------|------------|---------|
| +                        | Display    |         |
| +                        | Defaults   |         |
| +                        | Sizing     |         |
| +                        | Quality    |         |
| +                        | Inflation  |         |
| +                        | Advanced   |         |
| -                        | Statistics |         |
| <input type="checkbox"/> | Nodes      | 716796  |
| <input type="checkbox"/> | Elements   | 1281839 |

Obrázek 36 Nejjemnější síť

Limit pro studentskou verzi programu ANSYS Fluent je 512 000 elementů, proto jsem musel použít Researcher verzi tohoto programu. Pro simulaci míchání je potřebné poměrně velké množství elementů, abychom dostali výsledek s co nejmenší chybou, což bude popsáno v další kapitole.

### 5.3. Numerická chybovost sítě

Následně jsem vytvořil simulaci pro každou z výše zmíněných sítí. Tyto simulace jsem učinil z důvodu zjištění, jaká hrubost sítě bude vyhovovat zvolené chybovosti sítě, kterou jsem zvolil jako 5 %. Závislost řešení (v mém případě byla měřená veličina zvolena jako krouticí moment) na počtu prvků sítě lze popsat následující rovnicí:

$$\Phi = \Phi_{ext} + aN^{-p/D}, \quad (5-1)$$

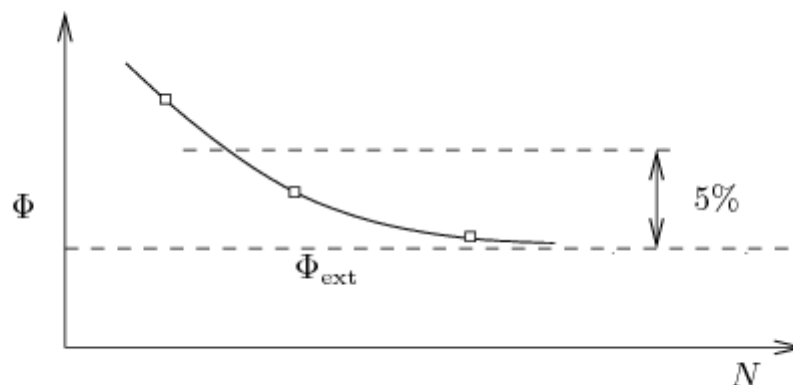
kde  $N$  je počet prvků sítě,  $D$  se rovná 2 v případě 2-D systému a 3 v případě 3-D,  $\Phi$  je měřená veličina (v mém případě krouticí moment). Zbývají 3 neznámé parametry  $\Phi_{ext}$ ,  $a$  a  $p$ . Jejich hodnoty zjistíme z řešení těchto 3 rovnic:

$$\Phi_1 - \Phi_{ext} - aN_1^{-\frac{p}{D}} = 0 \quad (5-2)$$

$$\Phi_2 - \Phi_{ext} - aN_2^{-\frac{p}{D}} = 0 \quad (5-3)$$

$$\Phi_3 - \Phi_{ext} - aN_3^{-\frac{p}{D}} = 0, \quad (5-4)$$

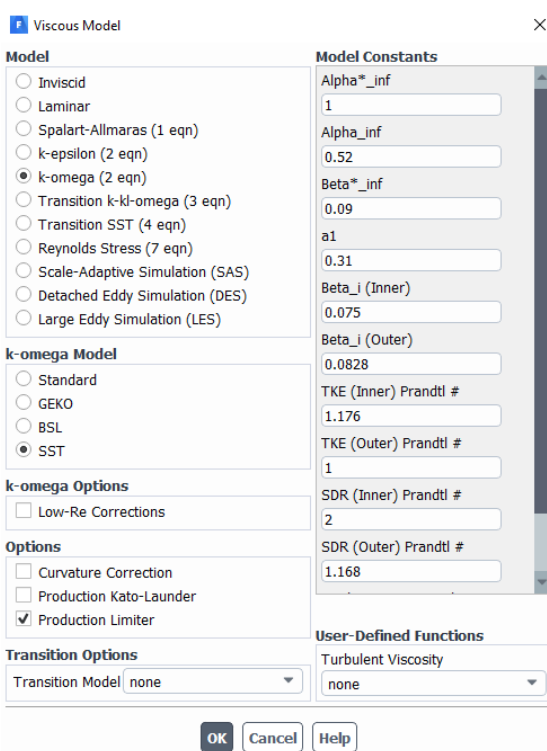
parametr  $p$  zde představuje přesnost řešení, čím větší je jeho hodnota, tím je řešení přesnější. Parametr  $\Phi_{ext}$  označuje extrapolovanou hodnotu řešení pro nekonečně velký počet prvků sítě. [13]



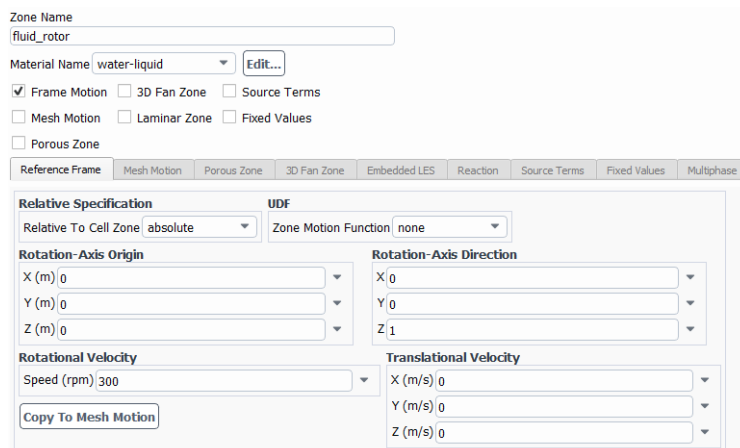
Obrázek 37 Závislost měřené veličiny na počtu elementů [13]

### 5.3.1. Simulace

V programu ANSYS FLUENT jsem zvolil materiál míchadla a nádoby. Výpočetní metodu pro míchanou nádobu jsem stanovil k-omega. Model k-omega patří do typu modelu RANS. Je to tedy model, který doplňuje molekulární přenos o transport turbulentními víry a využívá turbulentní viskozitu odhadovanou z kinetické energie turbulentních fluktuací  $k$  [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ] a disipace kinetické energie  $\varepsilon$  [ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ]. Všechny simulace jsou z důvodu zjednodušení problému provedeny pro jednofázový systém tvořený vodou ( $\rho = 998,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ). Rotaci jsem pro tyto simulace zvolil 300 ot/min.



Obrázek 38 Model simulace



Obrázek 39 Nastavení rotace rotoru



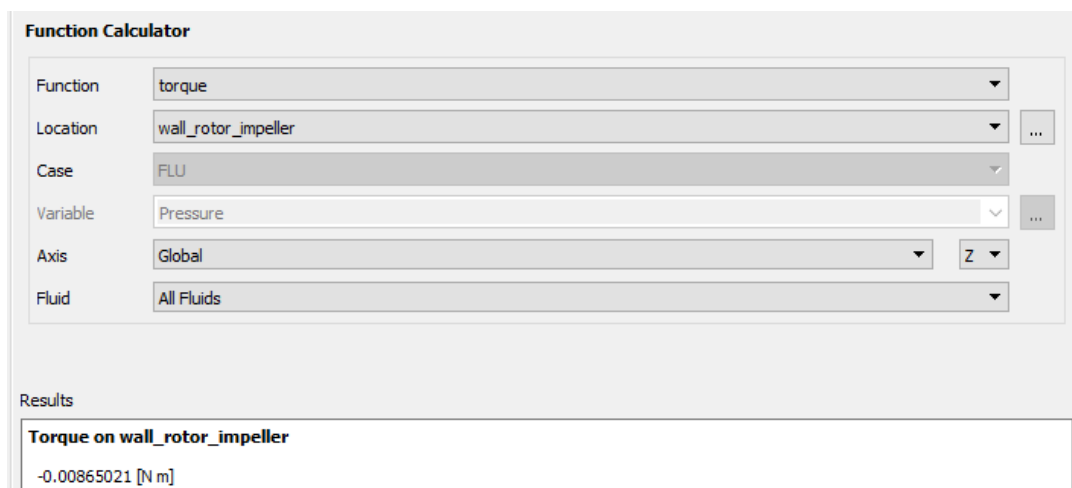
### 5.3.2. Metoda výpočtu MRF (Multiple Reference Frame):

Simulace pohybu míchadla lze řešit dvěma základními postupy, pomocí MRF nebo pomocí klouzající sítě (Sliding mesh). V této diplomové práci jsem zvolil způsob MRF. Metoda využívá rozdělení celkového objemu na dva dílčí: na rotorovou oblast v okolí míchadla a na zbylý objem tvořící statorovou oblast. Při použití metody MRF se rotorová oblast fyzicky nepohybuje, ale předává hybnost (působení přídatných sil – odstředivá a Coriolisova síla) na rozhraní rotorové a statorové oblasti, čímž dává rotaci zbylé kapalině. Metoda MRF je stacionární metodou, výsledkem simulace je ustálený stav.

Naproti tomu metoda SM je nestacionární, v dnešní době je považována za nejpřesnější postup při modelování pohybu rotačního míchadla. Při simulaci za pomoci metody SM dochází v rotorové oblasti k rotaci sítě. Na rozhraní rotoru a statoru se přepočítávají jednotlivé výpočtové veličiny. Nevýhodou metody SM je oproti metodě MRF její výpočetní náročnost, která je 10 - 100x výpočetně náročnější. Z tohoto důvodu jsem zvolil metodu MRF, poskytující přijatelně přesné výsledky při nižší výpočetní náročnosti.

### 5.3.3. Výsledky numerické chybovosti

Po dokončení simulací jsem provedl v programu CFD-Post výpočet krouticích momentů. Následně jsem sečetl krouticí momenty míchadla a na hřídeli.



Obrázek 40 Ukázka výpočtu krouticích momentů

| Výsledné krouticí momenty |          |          |           |
|---------------------------|----------|----------|-----------|
| Počet elementů sítě       | 222 325  | 707 2710 | 1 281 839 |
| Krouticí moment [Nm]      | -0,00865 | -0,00926 | -0,00941  |

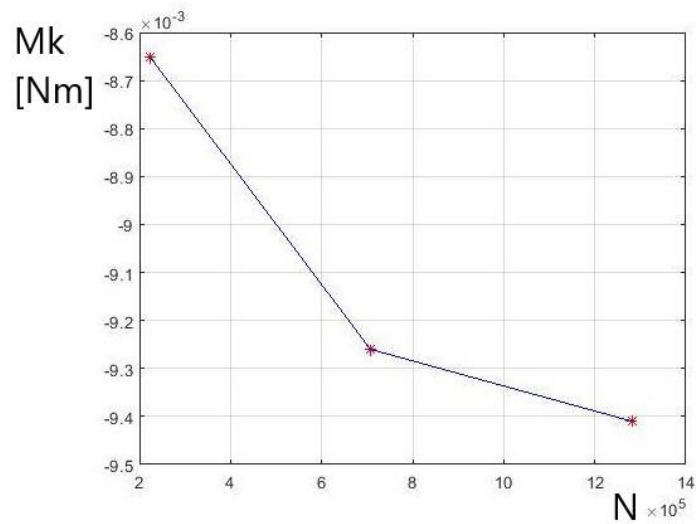
Tabulka 2 Krouticí momenty

Tyto výsledky jsem dále vložil do skriptu v programu Matlab a vypočítal jsem numerickou chybovost sítí. K výpočtům jsem použil skript pro určení numerické chybovosti, který mi byl poskytnut v rámci studijních materiálů od doc. Ing. Karla Petery, Ph.D. Výsledné indexy konvergence sítí (GCI – Grip convergency index) jsou:

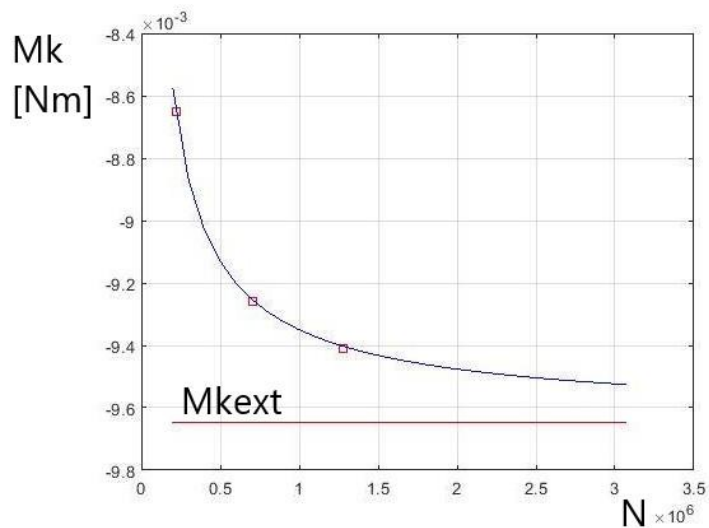
Nejhrubší síť: GCI = 126.2065

Středně hrubá síť: GCI = 5.2934

Nejjemnější síť: GCI = 3.2164



Obrázek 41 Kroucí moment v závislosti na počtu elementů



Obrázek 42 Extrapolovaná hodnota kroucího momentu

Hodnota extrapolovaného kroucího momentu je  $M_{kext} = -0,0096$  Nm. Numerická chybovost nejjemnější sítě je 3,2164 %. Z těchto výsledků vyplývá, že pokud chceme dosáhnout chybovosti maximálně 5 %, musíme použít nejjemnější síť s největším počtem elementů.

## 5.4. Výsledky simulace

Následně jsem pro zvolenou nejjemnější síť provedl tři simulace pro různý počet otáček. Otáčky byly zvoleny 300, 600 a 900 ot/min. Nastavení těchto simulací zůstalo stejné jako u předchozích. Z teoretické části práce vyplývá, že příkonové číslo  $P_o$  a bezrozměrná čerpací výkonost  $N_{Qp}$  jsou v oblasti turbulentního proudění nezávislé na Reynoldsově čísle  $Re$ .

Výpočet Reynoldsova čísla pro zadané otáčky podle vzorce:

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\mu}, \quad (5-5)$$

|                        |        |        |         |
|------------------------|--------|--------|---------|
| n [min <sup>-1</sup> ] | 300    | 600    | 900     |
| Re [-]                 | 49 910 | 99 820 | 149 730 |

Tabulka 3 Hodnota Reynoldsova čísla v závislosti na otáčkách

### 5.4.1. Příkonové číslo míchadla

Dalším krokem této práce bylo vyhodnocení příkonové charakteristiky míchadla. Za pomoci simulací jsem zjistil jednotlivé hodnoty krouticích momentů. Příkon míchadla jsem vypočetl dle vzorce:

$$P = \frac{2\pi M_k n}{60} \quad (5-6)$$

Příkon jsem dále převedl na bezrozměrnou veličinu, která se označuje jako příkonové číslo, jež se vypočte dle vzorce:

$$P_o = \frac{P}{\rho n^3 d^5} = \frac{2\pi M_k}{\rho n^3 d^5} \quad (5-7)$$

Výsledné krouticí momenty jsou sumou krouticího momentu míchadla a na hřídeli. Hodnoty krouticích momentů a výsledných příkonových čísel znázorňuje následující tabulka:

|                        |         |         |         |
|------------------------|---------|---------|---------|
| n [min <sup>-1</sup> ] | 300     | 600     | 900     |
| $M_k$ [Nm]             | 0,00941 | 0,03966 | 0,08985 |
| $P_o$ [-]              | 0,2372  | 0,2496  | 0,2514  |
| Re [-]                 | 49 910  | 99 820  | 149 730 |

Tabulka 4 Krouticí moment a příkonové číslo v závislosti na otáčkách

Z tabulky (4) je patrné, že výsledky se shodují s teoretickou částí a příkonové číslo není v oblasti turbulentního proudění závislé na Reynoldsově čísle. Odchyšky přisuzuji chybě simulačního modelu. Pro další porovnání jsem proto převedl hodnoty příkonového čísla na střední hodnotu pomocí aritmetického průměru.

$$Po = \frac{0,2372 + 0,2496 + 0,2514}{3} = 0,246$$

#### 5.4.2. Čerpací účinky míchadla

V následující části jsem v programu CFD-Post vypočítal hodnotu čerpací účinnosti míchadla. K tomuto výpočtu jsem využil předem připravené plochy, na kterých jsem nechal spočítat průtoky jednotlivými plochami.

Bezrozměrné průtokové číslo se vypočítá podle vzorce:

$$N_{Qp} = \frac{Q_p}{nd^3}, \quad (5-8)$$

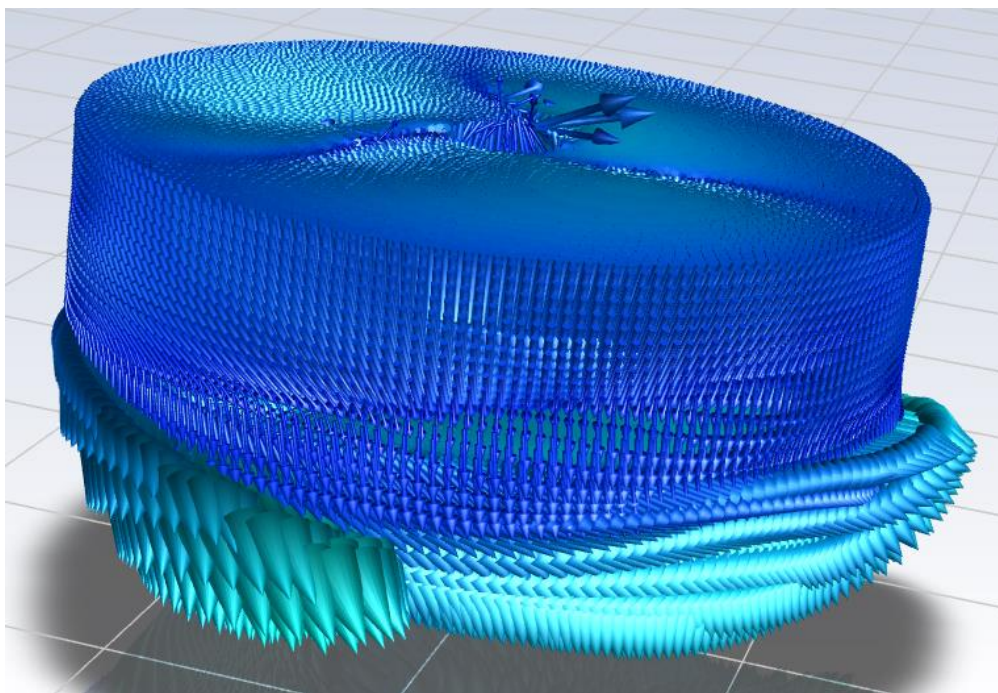
|                                    |         |         |         |
|------------------------------------|---------|---------|---------|
| n [min <sup>-1</sup> ]             | 300     | 600     | 900     |
| Q <sub>p</sub> [m <sup>3</sup> /s] | 0,00252 | 0,00527 | 0,00806 |
| Re [-]                             | 49 910  | 99 820  | 149 730 |
| N <sub>Qp</sub> [-]                | 0,5012  | 0,5261  | 0,5363  |

Tabulka 5 Čerpací účinnost v závislosti na otáčkách

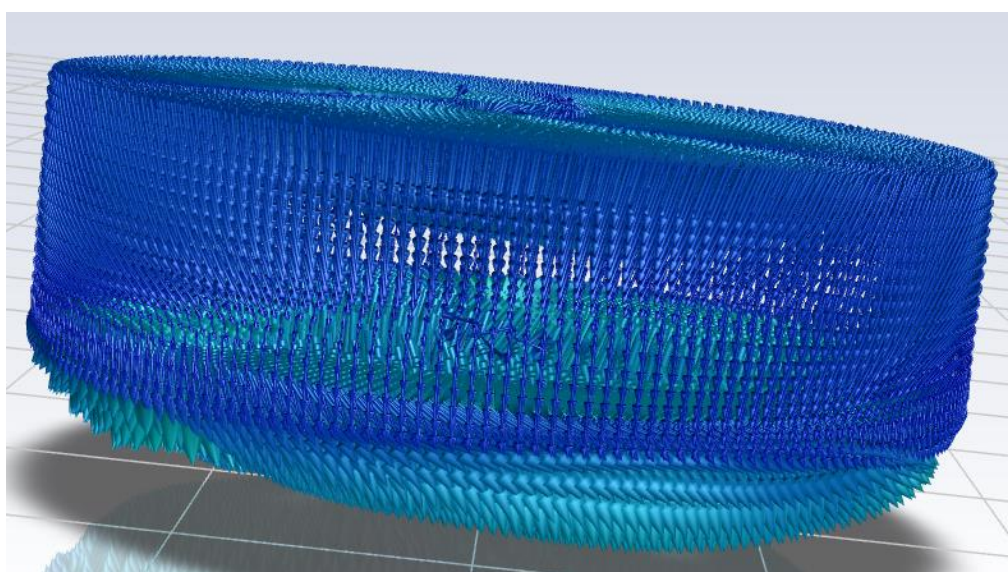
Stejný případ jako pro příkonové číslo platí pro hodnotu bezrozměrné čerpací výkonosti, tedy že jeho hodnota je v oblasti turbulentního proudění nezávislá na Reynoldsově čísle. Střední hodnota N<sub>QP</sub> je tedy:

$$N_{QP} = \frac{0,5012 + 0,5261 + 0,5363}{3} = 0,5212$$

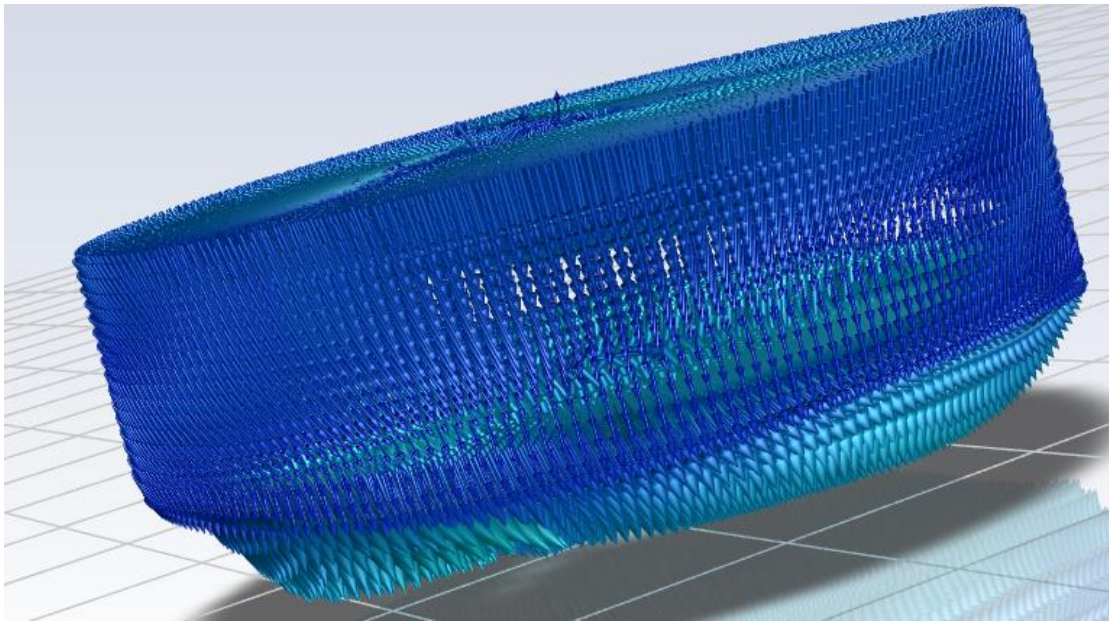
Hmotnostní průtok  $Q_p$  jsem vyhodnotil pomocí programu Ansys Fluent. Hodnota  $Q_p$  je průtok na spodní ploše pod míchadlem, kterou jsem si předem připravil. Problém by mohl nastat, kdyby byl rychlostní profil na plochách jak kladný, tak záporný. Z tohoto důvodu jsem provedl vizuální posouzení rychlostních profilů a následně jsem nechal vyexportovat textové soubory s jednotlivými vektory rychlostí.



Obrázek 43 Rychlostní profil pro otáčky  $n = 300 \text{ ot/min}$

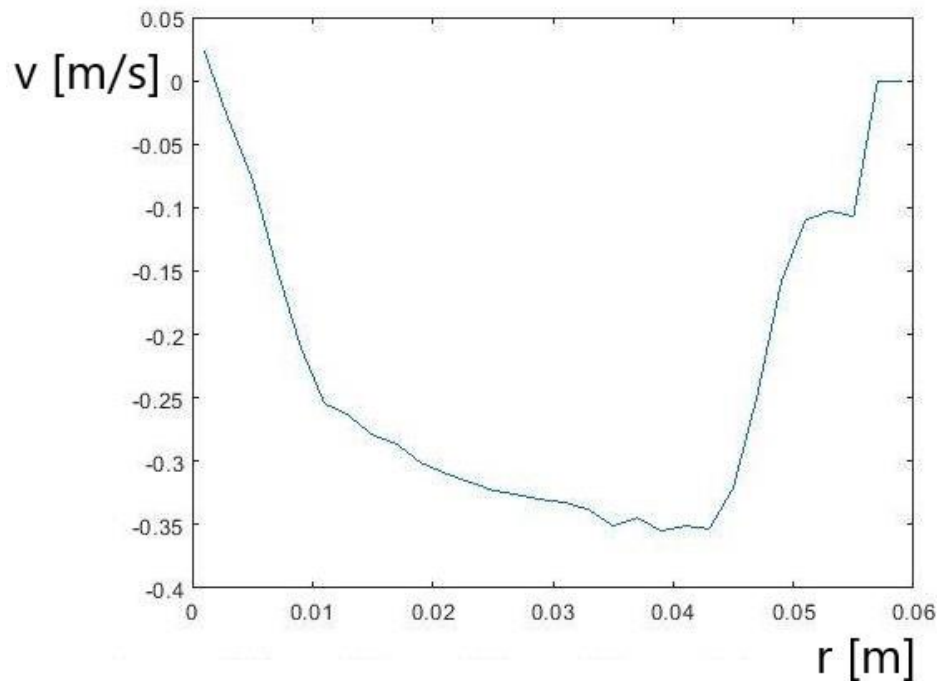


Obrázek 44 Rychlostní profil pro otáčky  $n = 600 \text{ ot/min}$

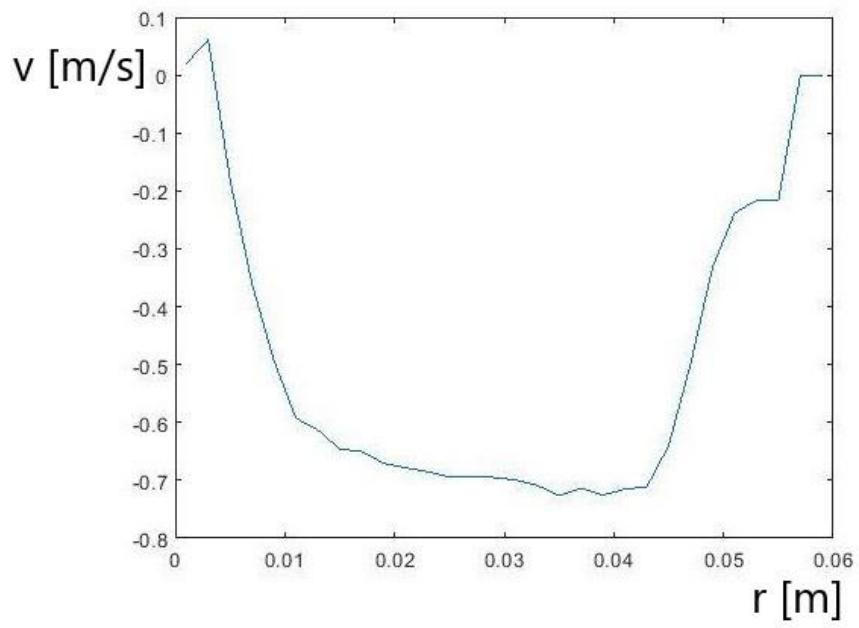


Obrázek 45 Rychlostní profil pro otáčky  $n = 900$  ot/min

Podle vizuálního posouzení a z přiložených excelových tabulek je patrné, že většina průtoku teče jedním směrem. Na posuzovaných plochách je několik vektorů, které mají opačný směr, což přisuzuji chybě modelu. Z těchto dat jsem dále sestavil rychlostní průběh pro jednotlivé otáčky.

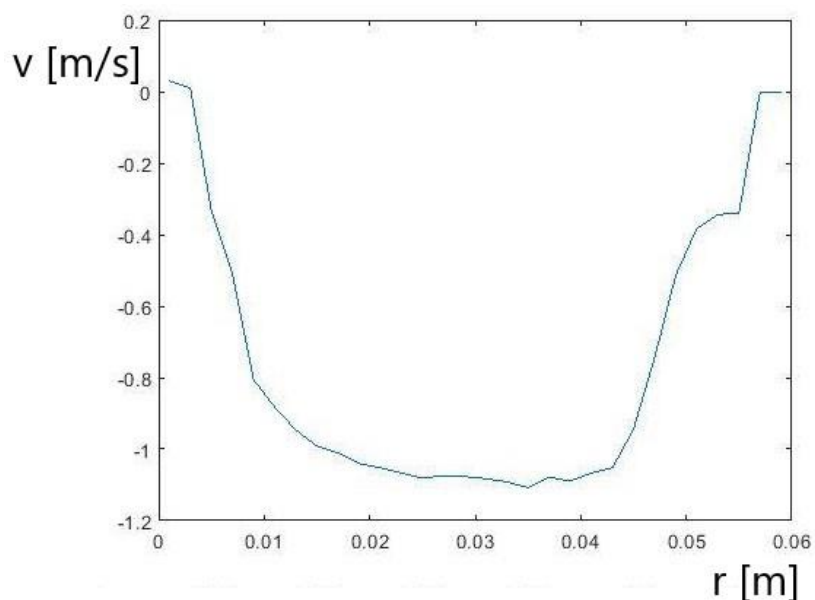


Obrázek 46 Rychlostní profil pro otáčky  $n = 300$  ot/min

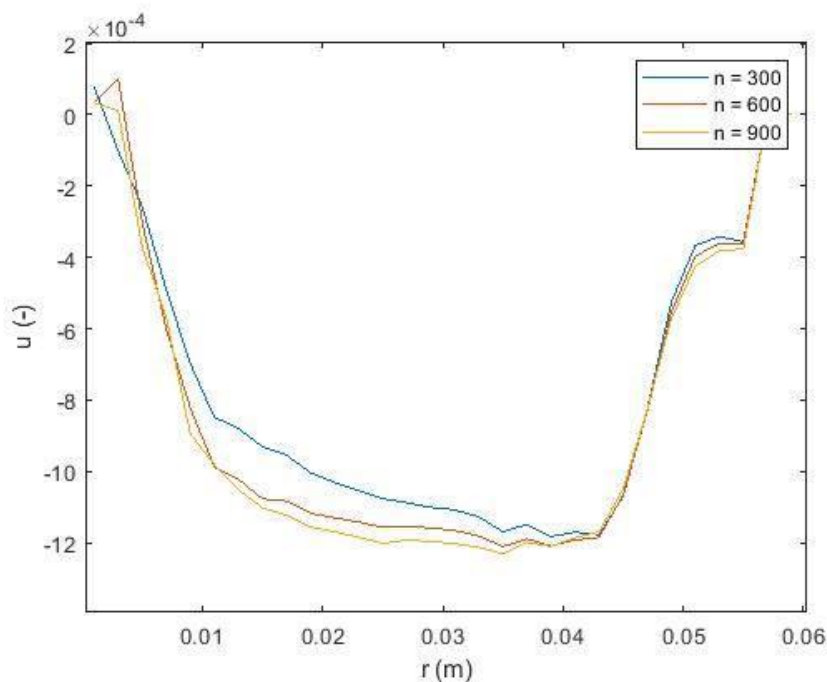


Obrázek 47 Rychlostní profil pro otáčky  $n = 600$  ot/min





Obrázek 48 Rychlostní profil pro otáčky  $n = 900$  ot/min



Obrázek 49 Srovnání bezrozměrných rychlostních profilů

Z obrázků (45-47) je patrné, že rychlostní profil míchadla má přibližně obdélníkový tvar. Z teorie vyplývá, že obdélníkový rychlostní profil je pro hydrodynamicky optimalizovaná míchadla typický. Dále z obrázku (49) vyplývá, že bezrozměrný rychlostní profil je v oblasti turbulentního proudění neměnný (zvětšuje se pouze rychlost) a je nezávislý na hodnotě Reynoldsova čísla. Výhodou hydrofoilních míchadel je také usměrněný axiální tok míchadlem.

## 5.5. Posouzení výsledků

Při porovnání dvou míchadel se obvykle postupuje tak, že zvolíme míchadla mající stejné bezrozměrné průtokové číslo  $N_{QP}$ , a vyhodnotíme, které má nižší příkonové číslo  $P_o$ . Pokud porovnáваме míchadla s odlišnými průtokovými čísly, musíme zavést další parametr. V tomto případě je to čerpací účinnost míchadla, jež je definována jako:

$$EP = \frac{N_{QP}^3}{P_o},$$

kde  $N_{QP}$  je tedy bezrozměrné průtokové číslo a  $P_o$  je příkonové číslo míchadla. Je nutné zdůraznit, že při porovnávání různých typů míchadel je třeba zachovat relativní velikost míchadel a jejich umístění v nádobě. [4]

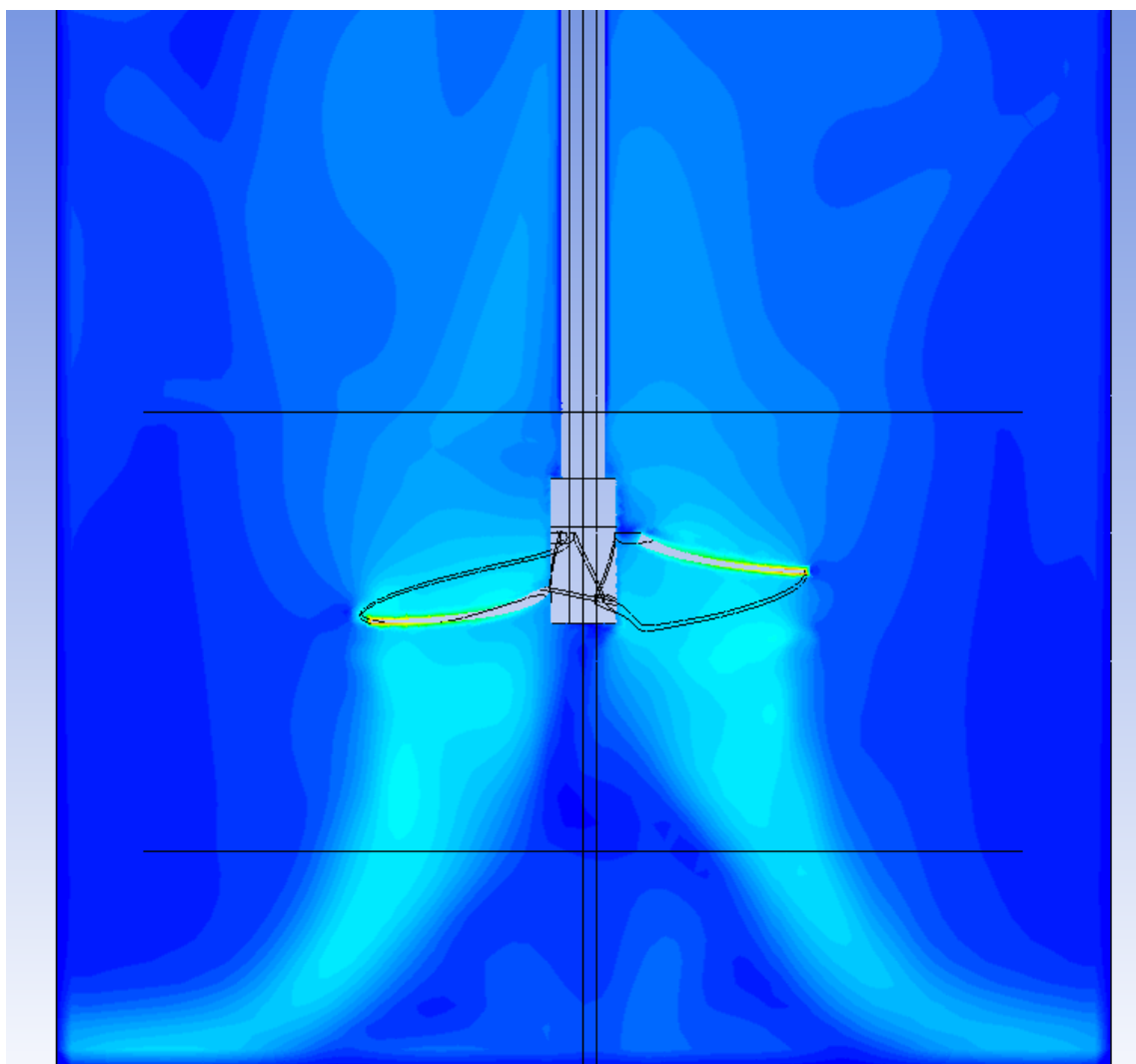
| Míchadlo  | $P_o$ | $N_{QP}$ | EP   |
|-----------|-------|----------|------|
| 3SL24     | 0,37  | 0,41     | 0,19 |
| 3SL35     | 0,79  | 0,51     | 0,17 |
| 3SL45     | 1,27  | 0,56     | 0,14 |
| 6SL45     | 1,81  | 0,65     | 0,15 |
| 3RLL      | 0,79  | 0,51     | 0,17 |
| MP(EKATO) | 0,44  | 0,42     | 0,17 |
| P(FH)     | 0,45  | 0,44     | 0,19 |
| 6SL       | 1,66  | 0,84     | 0,36 |
| TX535     | 0,67  | 0,6      | 0,32 |
| TX545     | 0,86  | 0,71     | 0,42 |
| TX335     | 0,94  | 0,77     | 0,49 |

|                        |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|
| A200                   | 1,27  | 0,79  | 0,39  |
| A310                   | 0,34  | 0,56  | 0,52  |
| HE-3                   | 0,22  | 0,47  | 0,47  |
| Spogis a Nunhez (2009) | 0,085 | 0,22  | 0,12  |
| Spogis a Nunhez (2016) | 0,272 | 0,68  | 1,13  |
| Nové míchadlo          | 0,246 | 0,521 | 0,575 |

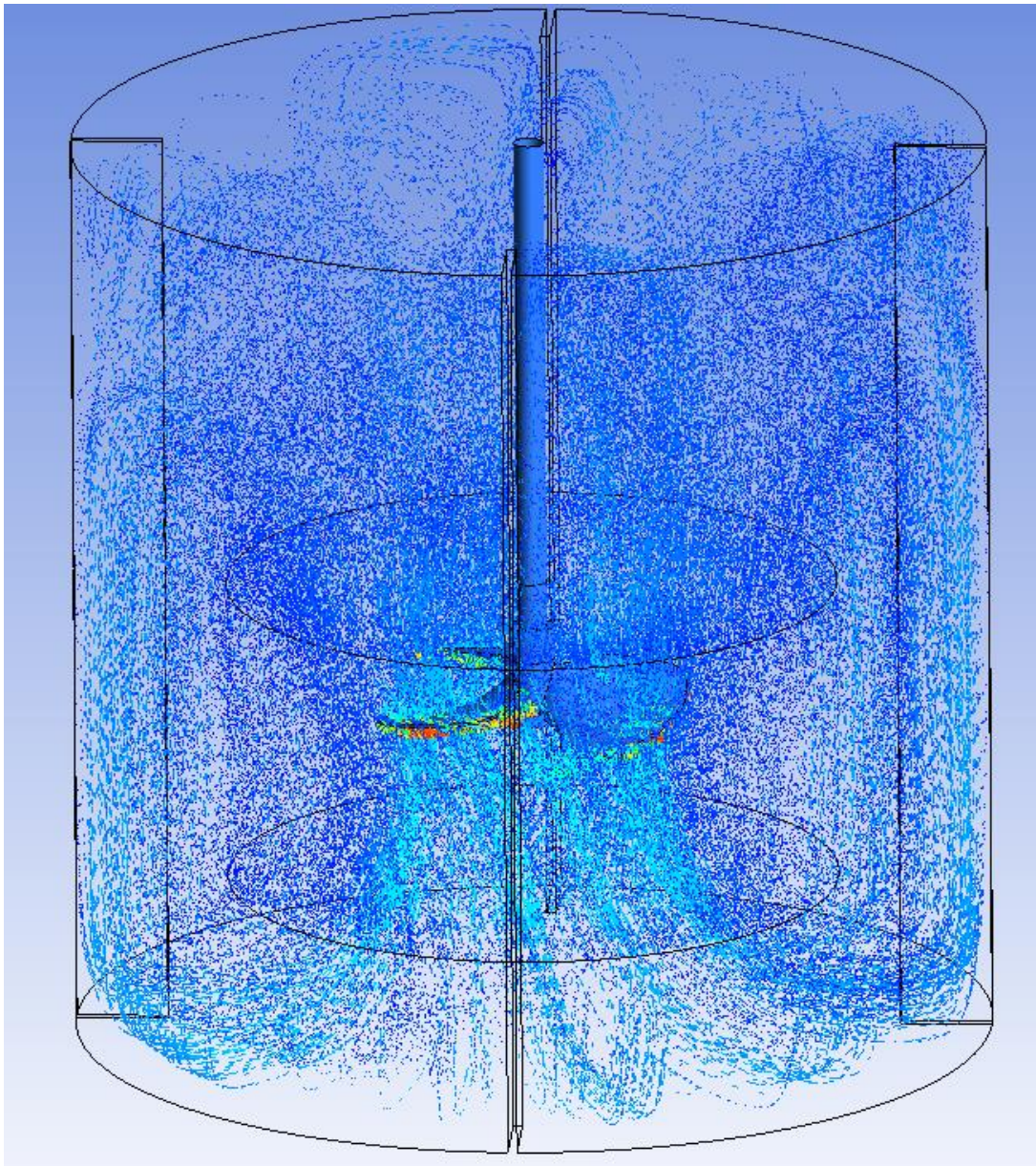
*Tabulka 6 Výsledky simulace a porovnání s existujícími míchadly*

Z těchto výsledků vyplývá, že mnou navržené míchadlo má oproti sledovaným míchadlům poměrně dobrou čerpací účinnost. Důvodem je velmi nízká hodnota příkonového čísla. U hydrodynamicky optimalizovaných míchadel je hodnota příkonového čísla obecně nižší než u standardizovaných míchadel, což je patrné například u míchadel A310 (Lightnin), HE-3 (Chemineer) a u míchadla Spogis a Nunhez. Existují míchadla, která mají větší bezrozměrné průtokové číslo než mnou navrhované míchadlo, ale ve srovnání se standardními typy míchadel představuje energeticky výhodné řešení. Povzbudivé je například srovnání s hydrofoilním míchadlem TX335 od firmy Technix, které se využívá v řadě velkoobjemových průmyslových realizacích.

## 5.6. Vizualizace



Obrázek 50 Rychlostní profil



Obrázek 51 Rychlostní profil – vektorově

Z teoretické části o hydrofoilních míchadlech vyplývá, že hlavní (primární) cirkulační smyčka by měla zaobírat většinu míchaného objemu. Indukované proudění by mělo být minimální, což je z vizualizací patrné.

# Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval hydrodynamicky optimalizovanými tzv. hydrofoilními míchadly. Cílem mé práce bylo vytvořit vlastní model hydrofoilního míchadla. Dále za pomoci simulací zjistit jeho základní charakteristiky, jako jsou například příkonové číslo, bezrozměrná čerpací výkonost a čerpací účinnost míchadla. V poslední části práce bylo cílem porovnat získaná data s existujícími standardizovanými míchadly.

Nejprve jsem v teoretickém úvodu popsal míchání jako hydrodynamický proces. Uvedl jsem, jaké existují druhy míchání a základní charakteristiky míchání, kterým se věnuji dále v popisné části práce.

V patentové rešerši jsem vytypoval několik míchadel, se kterými dále porovnávám procesní charakteristiky.

Práce je založena na numerických simulacích. Bylo by vhodné výsledky (příkonové číslo a čerpací výkonost) experimentálně ověřit, což však nebylo možné z důvodu epidemiologických opatření COVID-19.

Nově navržené míchadlo má velmi nízké příkonové číslo a poměrně dobrou bezrozměrnou čerpací výkonost. Aby bylo možné porovnávat míchadla, která nemají stejnou bezrozměrnou čerpací výkonost, byl zaveden parametr čerpací účinnost. Právě díky velmi nízkému příkonovému číslu nově navrženého míchadla, vychází čerpací účinnost oproti standardizovaným míchadlům příznivě.

Existují standardizovaná míchadla, která mají lepší bezrozměrnou čerpací výkonost, ale jsou více energeticky náročná. Nově navržené míchadlo je tedy vhodnou alternativou pro aplikace s nízkou viskózní kapalinou, kde je zapotřebí hydrodynamicky optimalizované vysokorychlostní míchadlo.

# Seznam použité literatury

- [1] Rieger, F., Novák, V., Jirout, T. *Hydromechanické procesy II*. Praha: ČVUT v Praze, 2006, s. 167. ISBN 978-8001033029.
- [2] Jirout, T. *Využití teoretických a experimentálních poznatků pro optimalizaci procesu míchání a míchacích zařízení*, ČVUT v Praze, 2013, 38 s.
- [3] Jirout, T. a F. Rieger. *Impeller design for mixing of suspensions* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z:  
[http://users.fs.cvut.cz/tomas.jirout/vyuka/p2\\_hmp/chep\\_vyuka.pdf](http://users.fs.cvut.cz/tomas.jirout/vyuka/p2_hmp/chep_vyuka.pdf)
- [4] Tlakové účinky axiální míchadel. *Chemazázín* [online]. 2012, XXII (2), 4 [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: [http://www.techmix.cz/files/files/Techmix\\_2-12.pdf](http://www.techmix.cz/files/files/Techmix_2-12.pdf)
- [5] BENZ, G. *Consider Hydrofoil Impellers for Laminar-Flow Mixing* [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z:  
<https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2018/may/consider-hydrofoil-impellers-laminar-flow-mixing>
- [6] SPOGISA, N. a R. NUNHEZ. *Optimizing a Hydrofoil for Industrial Use* [online]. 2016 [cit. 2021-01-11]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581600463X>
- [7] *Mixing Optimizations and Solutions* [online]. 2013 [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://www.postmixing.com/mixing%20forum/impellers/impellers.htm>

- [8] Míchadla [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z:  
<http://www.techmix.cz/produkty/produkty-dle-typu/michadla/>
- [9] Axial flow impellers [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z:  
<https://www.spxflow.com/lightnin/>
- [10] Agitators [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z:  
<https://www.chemineer.com/products/chemineer/agitators.html>
- [11] Impellers [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z:  
<https://www.ekato.com/en/products/agitator-components/impellers/>
- [12] Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., Kresta, S. M.: Handbook of industrial mixing: science and practice. Canada: Wiley-Interscience, 2003, p. 1377.
- [13] Petera, K. *Aplikace CFD v procesní technice / CFD Application in Process Engineering* [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/course/view.php?id=829>
- [14] Fořt, I., Jirout, T., Rieger, F., Allner, R., Sperling, R.: Study of the Blending Efficiency of Pitched Blade Impellers. Acta Polytechnica. 2001, vol. 41
- [15] Šulc, R. Zvětšování měřítka v mechanicky míchaných nádobách. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2012. s. 35.



# Seznam použitých symbolů a označení

|   |                              |                                  |
|---|------------------------------|----------------------------------|
| $\nabla$                                      | Diferenciální operátor       | $[\text{m}^{-1}]$                |
| $u$   | Rychlost kapaliny            | $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$   |
| $\rho$<br>[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]   | Hustota                      | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$  |
| $p$   | Tlak                         | $[\text{Pa}]$                    |
| $\mu$   | Dynamická viskozita          | $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$       |
| $n$   | Frekvence otáčení            | $[\text{s}^{-1}]$                |
| $d$   | Průměr míchadla              | $[\text{m}]$                     |
| $t$   | Čas                          | $[\text{s}]$                     |
| $Re$  | Reynoldsovo číslo            | $[-]$                            |
| $\delta$                                      | Jednotkový symetrický tenzor | $[-]$                            |
| $S$   | Plocha                       | $[\text{m}^2]$                   |
| $P$   | Příkon                       | $[\text{W}]$                     |
| $Po$  | Příkonové číslo              | $[-]$                            |
| $C_A$<br>[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]    | Okamžitá konečná koncentrace | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$  |
| $C_{AK}$<br>[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] | Konečná koncentrace          | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$  |
| $C_{A0}$<br>[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] | Počáteční koncentrace        | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$  |
| $t_m$   | Doba homogenizace            | $[\text{s}]$                     |
| $Q_P$<br>[ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ]   | Čerpací výkon                | $[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$ |

|          |                              |       |
|----------|------------------------------|-------|
| $N_{Qp}$ | Bezrozměrná čerpací výkonost | [-]   |
| H        | Výška hladiny                | [m]   |
| D        | Průměr míchané nádoby        | [m]   |
| $H_2$    | Výška hladiny nade dnem      | [m]   |
| $D_H$    | Průměr hřídele               | [m]   |
| $L_H$    | Délka hřídele                | [m]   |
| $D_N$    | Průměr náboje                | [m]   |
| $h_L$    | Výška lopatek                | [m]   |
| $W_L$    | Tloušťka listu loptky        | [m]   |
| $L_N$    | Délka narážky                | [m]   |
| $W_N$    | Tloušťka plechu narážky      | [m]   |
| $M_k$    | Krouticí moment              | [N·m] |
| EP       | Čerpací účinnost             | [-]   |

Indexy:

|   |                      |
|---|----------------------|
| * | Bezrozměrná veličina |
| 0 | Počáteční stav       |
| K | Konečný stav         |

# Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 Příkonová charakteristika míchadla [1].....   | 12 |
| Obrázek 2 Způsoby míchání [1] .....   | 15 |
| Obrázek 3 Způsoby provedení rotačních mechanických míchadel [1].....  | 17 |
| Obrázek 4 Axiální míchadlo TX535.....   | 18 |
| Obrázek 5 Axiální míchadlo TX545.....   | 18 |
| Obrázek 6 Axiální míchadlo A310/510 doporučeno pro míchání nízko viskózních médií. ....   | 19 |
| Obrázek 7 Axiální míchadlo A200 vhodné pro míchání nízko a středně viskózních médií. ....   | 19 |
| Obrázek 8 Axiální míchadlo A100 vhodné pro aplikace s menším průměrem nádoby. ....  | 19 |
| Obrázek 9 Míchadlo Viscoprop. Možné ve variantách se dvěma, třemi a čtyřmi lopatkami skloněnými pod úhlem 24°, 35° nebo 45°. ....                   | 20 |
| Obrázek 10 Míchadlo Isojet vhodné pro homogenizaci a suspendaci ve vysokých nádobách. ....  | 20 |
| Obrázek 11 Míchadlo Isojet B se čtyřmi lopatkami. ....  | 20 |
| Obrázek 12 Míchadlo RL-3 vhodné pro aplikace úpravy vody.....   | 21 |
| Obrázek 13 Míchadlo XE-3.....   | 21 |
| Obrázek 14 Míchadlo Viscojet .....  | 21 |
| Obrázek 15 Axiální míchadlo A310/510 doporučeno pro míchání nízko viskózních médií. ....  | 22 |
| Obrázek 16 Míchadlo Isojet vhodné pro homogenizaci a suspendaci ve vysokých nádobách. ....  | 23 |
| Obrázek 17 Axiální míchadlo TX535.....  | 23 |
| Obrázek 18 Axiální míchadlo TX545.....  | 23 |
| Obrázek 19 Šestilopátkové míchadlo CVS 69 1020 [2].....   | 25 |
| Obrázek 20 Třílopatkové míchadlo CVS 69 1043 [2].....   | 26 |
| Obrázek 21 Hydrodynamicky optimalizované míchadlo .....   | 26 |
| Obrázek 22 a) proudění v míchané vsádce s hydrofoilním míchadlem b) proudění v míchané vsádce se standardním míchadlem s šikmými lopatkami [2]..... | 27 |
| Obrázek 23 Geometrie míchadla bokorys .....   | 29 |
| Obrázek 24 Geometrie míchadla půdorys .....   | 30 |
| Obrázek 25 Míchadlo půdorys.....  | 30 |

|  |                                   |           |
|--|-----------------------------------|-----------|
| Obrázek 26 Míchadlo isometrie  | Obrázek 27 Míchadlo bokorys ..... | 31        |
| Obrázek 28 Geometrie vytvořená v programu DesignModeler.....                     |                                   | 32        |
| Obrázek 29 Rotorová oblast .....   |                                   | 33        |
| Obrázek 30 Rotorová oblast řez.....  |                                   | 34        |
| Obrázek 31 Objem okolo míchadla .....  |                                   | 34        |
| Obrázek 32 Strukturovaná síť .....   |                                   | 35        |
| Obrázek 33 Nestrukturovaná síť v okolí míchadla .....                            |                                   | 36        |
| Obrázek 34 Nejhrubší síť .....   |                                   | 36        |
| Obrázek 35 Středně hrubá síť .....   |                                   | 37        |
| Obrázek 36 Nejjemnější síť .....   |                                   | 37        |
| Obrázek 37 Závislost měřené veličiny na počtu elementů [13].....                 |                                   | 38        |
| Obrázek 38 Model simulace .....  |                                   | 39        |
| Obrázek 39 Nastavení rotace rotoru .....   |                                   | 39        |
| Obrázek 40 Ukázka výpočtu krouticích momentů .....                               |                                   | 41        |
| Obrázek 41 Krouticí moment v závislosti na počtu elementů .....                  |                                   | 42        |
| Obrázek 42 Extrapolovaná hodnota krouticího momentu .....                        |                                   | 42        |
| Obrázek 43 Rychlostní profil pro otáčky $n = 300$ ot/min .....                   |                                   | 45        |
| Obrázek 44 Rychlostní profil pro otáčky $n = 600$ ot/min .....                   |                                   | 45        |
| Obrázek 45 Rychlostní profil pro otáčky $n = 900$ ot/min .....                   |                                   | 46        |
| Obrázek 46 Rychlostní profil pro otáčky $n = 300$ ot/min .....                   |                                   | 46        |
| Obrázek 47 Rychlostní profil pro otáčky $n = 600$ ot/min .....                   |                                   | 47        |
| <i>Obrázek 48 Rychlostní profil pro otáčky <math>n = 900</math> ot/min .....</i> |                                   | <i>48</i> |
| Obrázek 49 Srovnání bezrozměrných rychlostních profilů .....                     |                                   | 48        |
| Obrázek 48 Rychlostní profil.....  |                                   | 51        |
| Obrázek 49 Rychlostní profil – vektorově.....                                    |                                   | 52        |

# Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 Příkonová čísla a čerpací charakteristiky rychloběžných míchadel v turbulentní oblasti proudění ..... | 24 |
| Tabulka 2 Krouticí momenty .....  | 41 |
| Tabulka 3 Hodnota Reynoldsova čísla v závislosti na otáčkách .....  | 43 |
| Tabulka 4 Krouticí moment a příkonové číslo v závislosti na otáčkách .....                                      | 43 |
| Tabulka 5 Čerpací účinnost v závislosti na otáčkách .....   | 44 |
| <i>Tabulka 6 Výsledky simulace a porovnání s existujícími míchadly</i> .....                                    | 50 |

# Elektronické přílohy

Příloha 1 – Model míchadla ve formátu step – Míchadlo\_step.stp

Příloha 2 – Tabulka v MS Excel – Zhodnocení průtoků.xsl