

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

TOROIDNÍ MÍCHADLA
DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

KRYŠTOF DUDEK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dudek** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **493565**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Procesní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Toroidní míchadla

Název diplomové práce anglicky:

Toroidal mixers

Pokyny pro vypracování:

Změňte procesní charakteristiky toroidních míchadel v nádobách bez a s narážkami. Toroidní tvar je nyní známý především z oblasti dronů, kde zásadním způsobem snížil hlasitost. Vyzkoušejte tyto tvary při míchání vsádek a optimalizujte je pro procesní použití.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní literární rešerše a pokynů vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

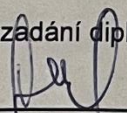
Ing. Stanislav Solnař, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

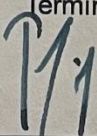
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **09.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

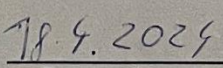

Ing. Stanislav Solnař, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

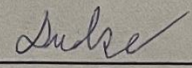

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Toroidní míchadla“. vypracoval samostatně pod vedením vedoucího Ing. Stanislava Solnaře, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jméno a Příjmení

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Stanislavu Solnaři, Ph.D. za vedení této práce a za jeho cenné rady a připomínky.

Děkuji také všem zaměstnancům Ú12118 za pomoc a za poskytnutí informací, které mi pomohly při tvorbě této práce.

Anotační list

Jméno autora:	Kryštof
Příjmení autora:	Dudek
Název práce česky:	Toroidní míchadla
Název práce anglicky:	Toroidal mixers
Rozsah práce:	počet stran: 52 počet obrázků: 42 počet tabulek: 0 počet příloh: 1
Akademický rok:	2023/2024
Jazyk práce:	český
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Energetika a procesní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Stanislav Solnař, Ph.D.
Konzultant práce:	-
Zadavatel:	-
Anotace česky:	Tato diplomová práce se zabývá návrhem toroidních míchadel. Cílem je navrhnout sérii toroidních míchadel, změřit jejich homogenizační a příkonové charakteristiky v aplikacích s narážkami a bez nich a porovnat je se standartně užívanými míchadlem.
Anotace anglicky:	This diploma thesis deals with a development of toroidal mixers. The goal is to design a series of toroidal mixers, measure their homogenization and power characteristics in applications with and without baffles and compare them with commonly used mixer.

Obsah

1. Úvod.....	8
1.1 Příkonové charakteristiky.....	9
1.2 Homogenizační charakteristiky.....	10
1.3 Typy míchadel.....	10
1.4 Narážky.....	11
1.5 Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla.....	12
1.6 Využití pro drony.....	12
1.7 Využití jako lodní šrouby.....	14
1.8 Další využití.....	17
2. Tvorba geometrie.....	18
3. Využití 3D tisku pro potřeby míchání.....	22
4. Navrhnutá míchadla.....	23
5. Způsob měření homogenizace.....	26
6. Způsob měření příkonových čísel.....	29
7. Simulace průtokového čísla.....	30
8. Statická silová analýza míchadel.....	34
9. Výsledky měření.....	36
9.1 Výsledky homogenizace první generace míchadel.....	36
9.2 Výsledky příkonových čísel první generace míchadel.....	37
9.3 Výsledky homogenizace druhé generace míchadel.....	39
9.4 Výsledky příkonových čísel druhé generace míchadel.....	40
9.5 Výsledky homogenizace třetí generace míchadel.....	42
9.6 Výsledky příkonových čísel třetí generace míchadel.....	43
10. Diskuze výsledků měření.....	45
10.1 Komplikace při měření.....	45

10.2	Vyhodnocení homogenizačních charakteristik.....	45
10.3	Vyhodnocení příkonových charakteristik.....	46
11.	Závěr.....	48
12.	Reference.....	50
13.	Seznam symbolů	52

1. Úvod

Míchání je jedna z nejzásadnějších operací v prakticky všech odvětvích chemického, potravinářského a zpracovatelského průmyslu. Cílem míchání je tvorba směsi s požadovanými vlastnostmi, tedy např. tvorba homogenizované směsi a intenzifikace procesů, které se v míchané nádobě odehrávají, tedy např. intenzifikace přenosu tepla, nebo přenosu hmoty. Základní způsoby míchání jsou: [1]

- Mechanické míchání – nejčastější způsob míchání, při kterém se dosahuje míchacího efektu pohybem pevného tělesa v nádobě, nejčastěji tedy otáčením míchadla nasazeného na hřídeli. Mechanickým mícháním je způsob, kterým se budu zabývat ve zbytku práce.
- Hydraulické míchání – míchacího efektu dosahujeme pomocí čerpadla, kterým čerpáme kapalinu. Tím dochází ke vzniku vírů a postupnému promíchávání kapaliny.
- Pneumatické míchání – míchání pomocí stlačeného plynu, který vypouštíme ve spodní části nádoby. Pohybem bublin směrem vzhůru dochází i k pohybu kapaliny a ta je tak promíchávána.
- Míchání v potrubí – Kapalina může být promíchávána přímo v potrubí, pokud se jedná o turbulentní proudění. V případě laminárního proudění ale k žádnému promíchávání nedochází, avšak to lze řešit pomocí statických směšovačů, což jsou vestavby v potrubí, které kapalinu usměrňují a umožňují její promíchávání i při laminárním proudění.

Míchací charakteristiky závisí na rozložení rychlosti a tlaku v míchané nádobě. Tyto závislosti lze vyřešit pomocí Navier-Stokesovy rovnice (za předpokladu, že uvažujeme Newtonské chování kapaliny) [1].

$$\rho \left\{ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{f} \quad (1.0-1)$$

Zde ovšem nastává ten problém, že v případě míchání se jedná o velmi komplikované, trojrozměrné proudění a v takových případech nejsme schopni řešit Navier-Stokesovy rovnice analyticky. Přistupujeme tedy k inspekční analýze, jejíž cílem je převést všechny veličiny do bezrozměrné podoby a následně zjistit, na kterých veličinách jsou námi hledané veličiny závislé.

1.1 Příkonové charakteristiky

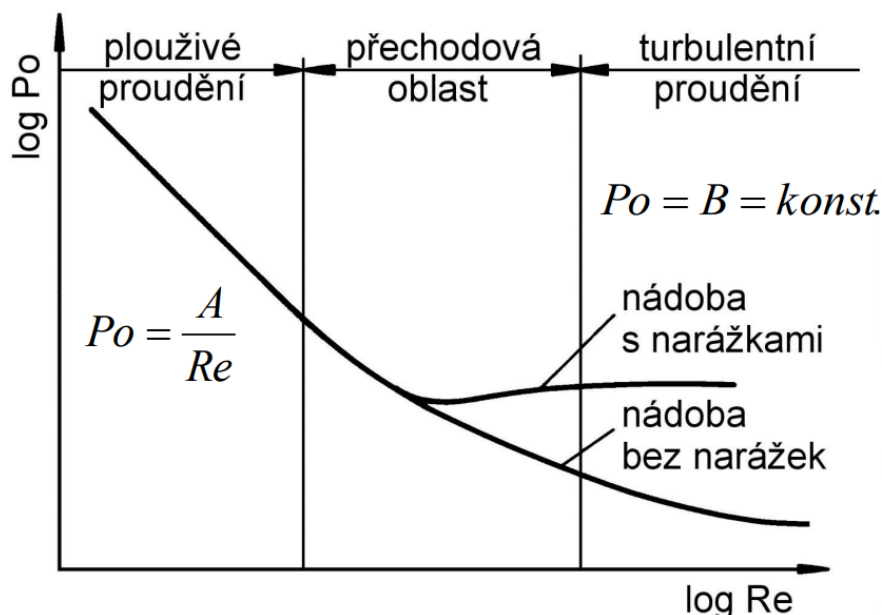
Příkon je jeden z nejdůležitějších parametrů každého míchadla. Udává nám množství energie disipované v kapalině za čas. Míchadla však nemůžeme obecně porovnávat podle samotného příkonu. Míchadla mohou mít různý průměr, nebo se otáčet jinou rychlostí v závislosti na aplikaci. Vlastnosti kapaliny mají také vliv na příkon. Pomocí inspekční analýzy zavádíme tzv. příkonové číslo, což je bezrozměrná charakteristika určující příkon daného míchadla vztaženého k jeho parametrům: [1]

$$P_0 = \frac{P}{\rho n^3 d^5} \quad (1.1-1)$$

Příkonové číslo je závislé na modifikovaném Reynoldsově čísle. To lze spočítat pomocí následujícího vztahu:

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\mu} \quad (1.1-2)$$

Při použití inspekční analýzy zjistíme, že při plouživém proudění příkonová čísla klesají s rostoucím Reynoldsovým číslem. V turbulentní oblasti již příkonové číslo na Reynoldsově čísle nezávisí a je konstantní. Příkonové číslo typicky dosahuje hodnot nižších desetin, až nižších jednotek [2].



Obrázek 1 - závislost příkonového čísla na Reynoldsově čísle [1]

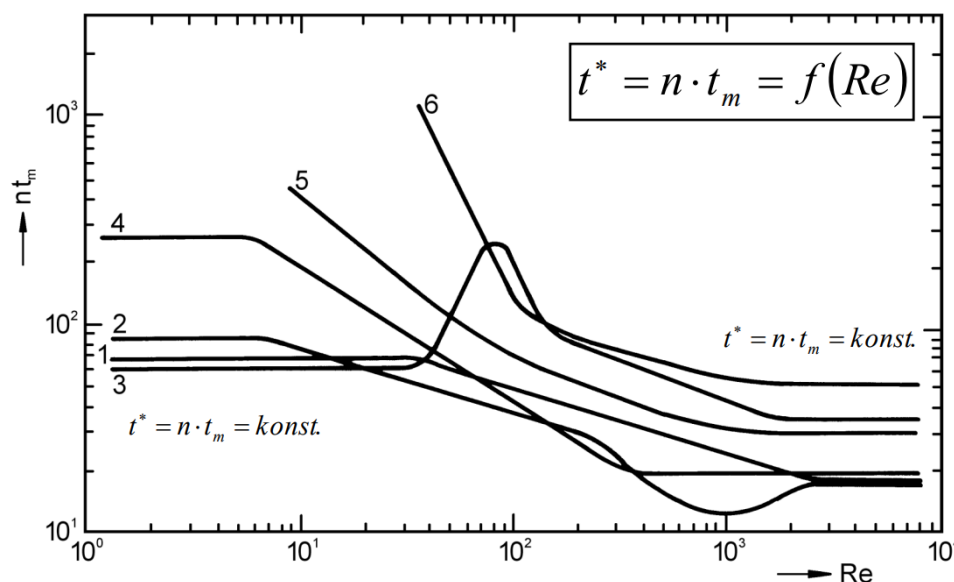
Měření příkonových čísel probíhá pomocí měření samotného příkonu a jeho následné přepočítání do bezrozměrné podoby (viz. Kapitola Způsob měření příkonových čísel). Měření příkonových čísel je díky tomu poměrně jednoduché.

1.2 Homogenizační charakteristiky

Druhým, zde testovaným parametrem míchadel je doba, za kterou dojde k homogenizaci vsádky, zvaná homogenizační čas. Stejně, jako v případě příkonu je i zde nutné zavést bezrozměrný porovnávací parametr a tím je bezrozměrný čas homogenizace daný následujícím vztahem:

$$t^* = n t_m \quad (1.2-1)$$

Při provedení inspekční analýzy zjistíme, že, podobně jako v případě příkonových čísel, hodnota bezrozměrného času homogenizace v oblasti plouživého proudění převážně klesá a v oblasti turbulentní je konstantní. Hodnota bezrozměrného času homogenizace se obvykle pohybuje od desítek, po nižší stovky [2]



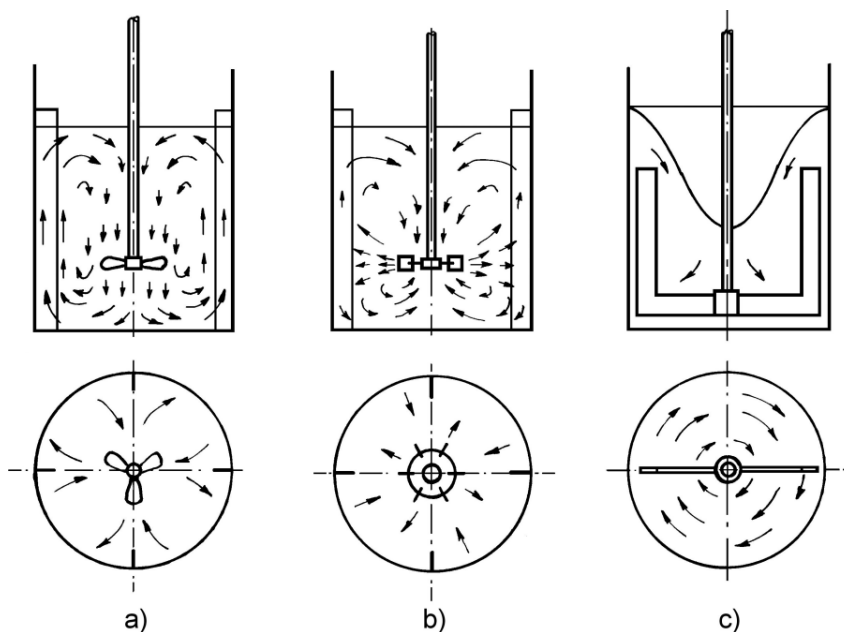
Obrázek 2 - závislost bezrozměrného času homogenizace na Reynoldsově čísle pro vybraná míchadla - 1 – šroubové míchadlo (CVS 69 1028), 2 – šroubové míchadlo umístěné excentricky, 3 – pásové míchadlo (CVS 69 1029), 4 – čtyřnásobné lopátkové míchadlo umístěné excentricky, 5 – kotvové míchadlo (CVS 69 1014), 6 – turbínové míchadlo (CVS 69 1021) [1]

K měření doby homogenizace lze použít různé metody. Toto je blíže popsáno v kapitole Způsob měření homogenizace.

1.3 Typy míchadel

Existuje několik typů míchadel v závislosti na tom, jakého způsobu proudění se v nádobě snažíme dosáhnout: [1]

- Axiální míchadla – kapalina cirkuluje především podél osy nádoby směrem ke dnu, poté směrem k okraji nádoby a zpět k hladině. Tyto míchadla používáme především k míchání nízkoviskózních kapalin. Tímto typem míchadel se budu dále zabývat ve zbytku této práce.
- Radiální míchadla – K proudění kapaliny dochází směrem od míchadla k okrajům nádoby. Tento typ míchadel se hodí především na dispergaci, tedy např. míchání nemísitelných kapalin, nebo soustavy kapalina-plyn.
- Tangenciální míchadla – vytváří proudění v tangenciálním směru. Tato míchadla jsou obvykle pomaloběžná a používají se na míchání kapalin s vysokou viskozitou



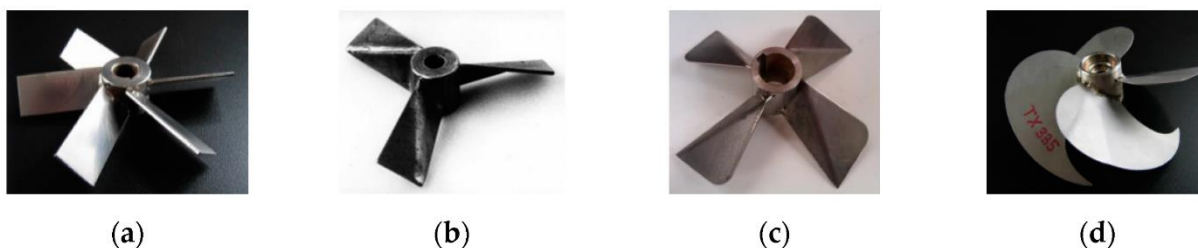
Obrázek 3 - druhy míchadel - a – axiální proudění, nádoba s narážkami, b – radiální proudění, nádoba s narážkami, c – tangenciální proudění, nádoba bez narážek [1]

1.4 Narážky

Při míchání kapalin v nádrži válcového tvaru axiálním míchadlem může docházet k tomu, že celý objem nádoby začne pouze tangenciálně obíhat okolo osy a nedostatečně cirkuluje od hladiny ke dnu. To je nežádoucí, jelikož míchací efekt je výrazně nižší a homogenizační čas roste. Zároveň také při vyšších otáčkách dochází ke tvorbě středového víru, který může začít přisávat vzduch. Řešením je obvykle instalace narážek. Ty jsou vloženy vertikálně do nádoby a jejich cílem je přerušit převažující tangenciální proudění a zajistit, aby kapaliny cirkulovala axiálně. Problémem narážek je ovšem to, že výrazně zvyšují příkonové číslo a také komplikují čištění nádoby [2]

1.5 Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla

Míchadla stále procházejí vývojem s cílem zvýšení jejich efektivity. Různé modifikace byly vyzkoušeny v posledních letech. Zřejmě nejjednodušší způsob, jak míchadla modifikovat, je jejich diagonální zalomení, díky čemuž je možné docílit rovnoměrnějšího výtoku z míchadla. Společně se zvýšenou plochou tím lze docílit lepších procesních charakteristik [2]. Další modifikace mohou znamenat změny z hlediska úhlu lopatek, jejich rozšíření, nebo zúžení směrem ke špičce s rozdílnými výsledky [3].



Obrázek 4 - Vývojové stupně míchadel - (a) standardní šestilopátkové míchadlo $\alpha = 45^\circ$ —6L45; (b) třílopatkové míchadlo s diagonálně zalomenými—3RLL, (c) axiální míchadlo s lomenými, velkoplošnými—4RLLN, (d) axiální míchadlu typu hydrofoil TECHMIX TX335 [2].

Axiální míchadla s lomenými lopatkami byly také testovány pro použití při čištění odpadních vod, přičemž bylo zjištěno, že mají dobrý potenciál především v aplikacích, kde docházelo k flokulaci [4].

Tato míchadla byla také testována v nádobách bez narážek v aplikaci, kde bylo míchadlo uloženo excentricky a pod úhlem ze dna nádoby [5]. Byla zjištěna nižší spotřeba energie. Čas homogenizace se výrazně lišil v závislosti na výšce hladiny. V nádobě ovšem vznikalo velmi špatně homogenizované místo.

Další problém, typický pro většinu míchadel, je tvorba vírů na špičkách lopatek. Tyto víry způsobují energetické ztráty a je těžké je odstranit [6]. K tomuto řešení by mohl pomoci i předmět tohoto výzkumu – toroidní míchadla

1.6 Využití pro drony

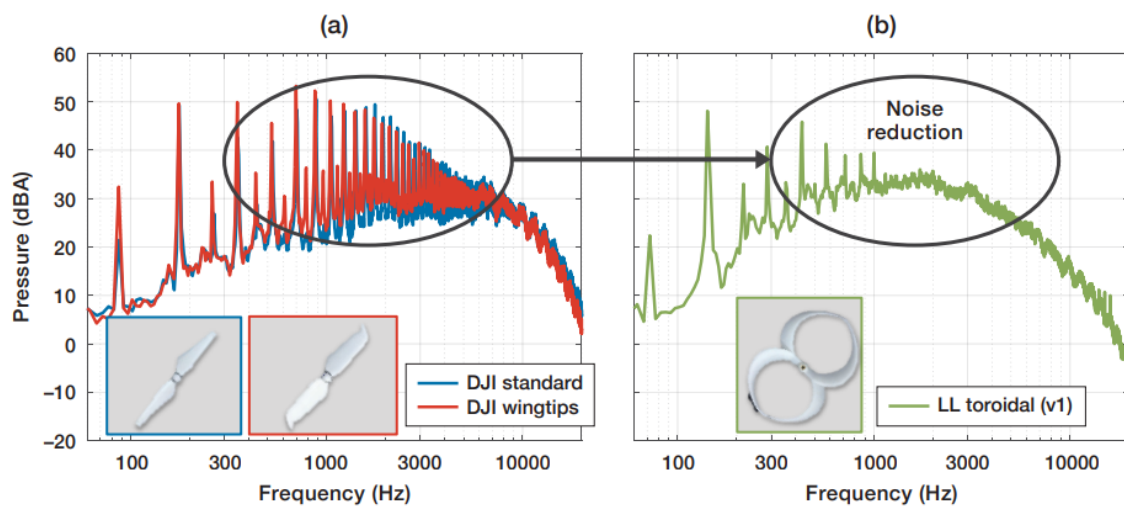
Toroidní vrtule nemají obecně žádnou přesnou definovanou geometrii, Jediným společným znakem je, že jejich čepele tvoří uzavřená excentrická smyčka. Těchto smyček se nachází

v každé vrtuli více a musejí vůči sobě být středově symetrické. V nejbližším bodě od středu by smyčka neměla být nijak skloněna (z důvodu eliminace vírů na špičkách lopatek). Všechny další parametry, tedy např. počet smyček, jejich velikost, výška, natočení a tvar se mohou zásadně lišit. To dává značný prostor pro tvorbu originální geometrie.

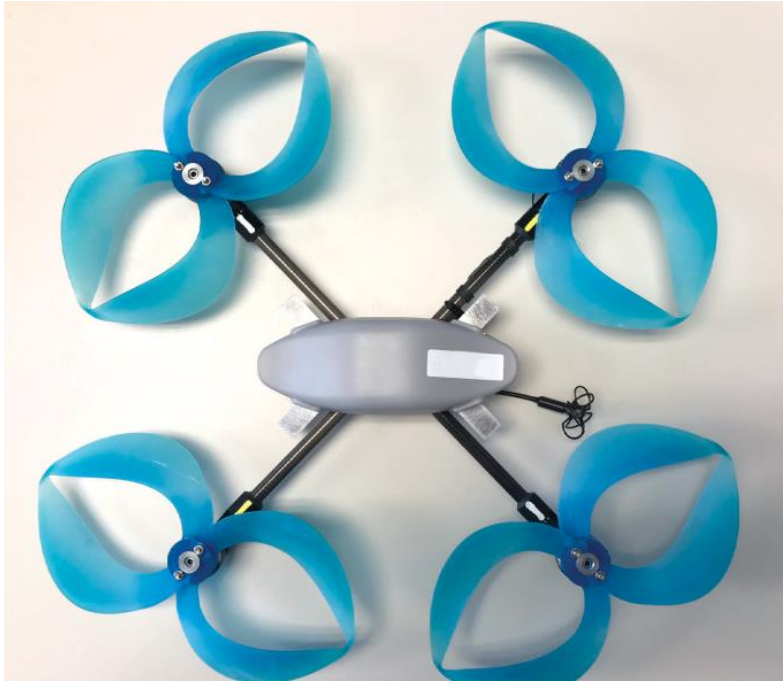
Drony nacházejí v moderním světě stále širší uplatnění – od volnočasové aktivity, přes pořizování fotografií/videí, až po doručovatelství, záchranářské služby, nebo pro dohled nad majetkem. Díky svým malým rozměrům a možnosti přímého pohybu ve všech směrech je lze použít na prakticky jakémkoliv místě.

Jedním z limitujících faktorů jejich použití je ovšem jejich hlučnost. Zvuk vytvářený vrtulemi dronů dokáže být velmi nepříjemný pro mnoho lidí [7], z toho důvodu je snaha najít méně hlučné vrtule při stejném tahu.

Výzkumný tým z Massachusetts Institute of Technology (MIT) vytvořil toroidní vrtuli pro drony, která dosáhla výrazně nižší hlučnosti, než standartní vrtule [8]. Primárním důvodem je zde to, že toroidní vrtule nemá žádné špičky na koncích čepelí, které by tvořily víry. Tyto víry výrazně přispívají k tvorbě hluku. Drony bylo díky tomu možné využít až na poloviční vzdálenost oproti standartním vrtulím při stejném hlukovém zatížení.



Obrázek 5 - porovnání hodnot hlučnosti standartních a toroidních vrtulí [8]



Obrázek 6 - toroidní vrtule využité u dronu [8]

1.7 Využití jako lodní šrouby

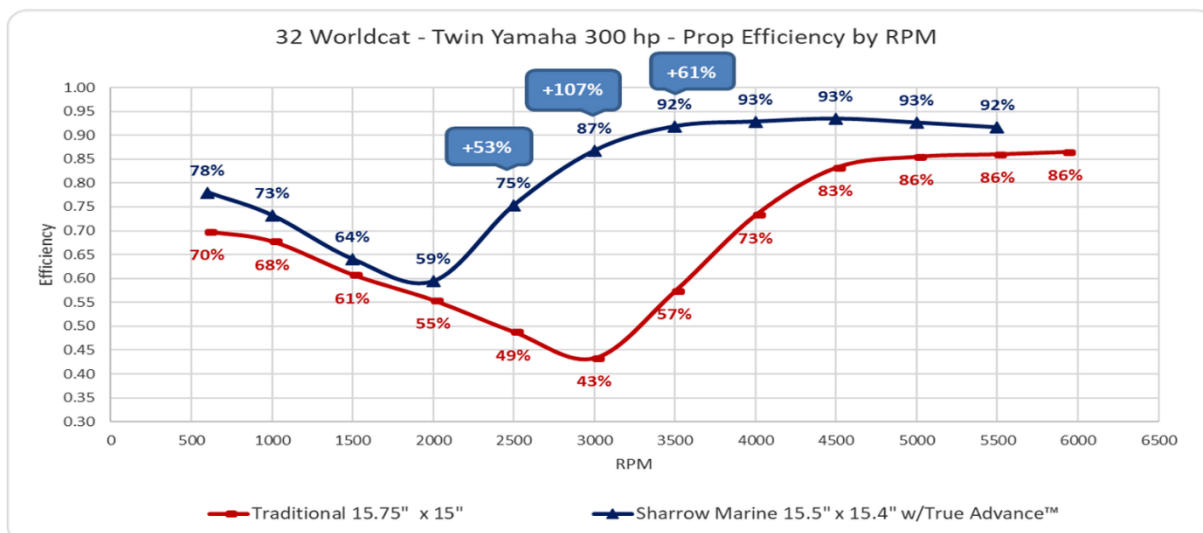
Další využití toroidních vrtulí bylo nalezeno v případě pohonných šroubů pro čluny. Nejdůležitějším parametrem těchto šroubů je jejich příkon při daném tahu. Od toho se poté odvíjí další parametry, jako např. spotřeba paliva.

Velkého pokroku zde dosáhla společnost Sharrow marine, která vyvinula toroidní vrtuli právě menší lodě. Jejich patentovaný tvar se zásadně liší od tvaru toroidních vrtulí např. u dronů, nicméně základní koncept zůstává stejný, tedy soustava několika smyček excentricky připojených ke středu [9].



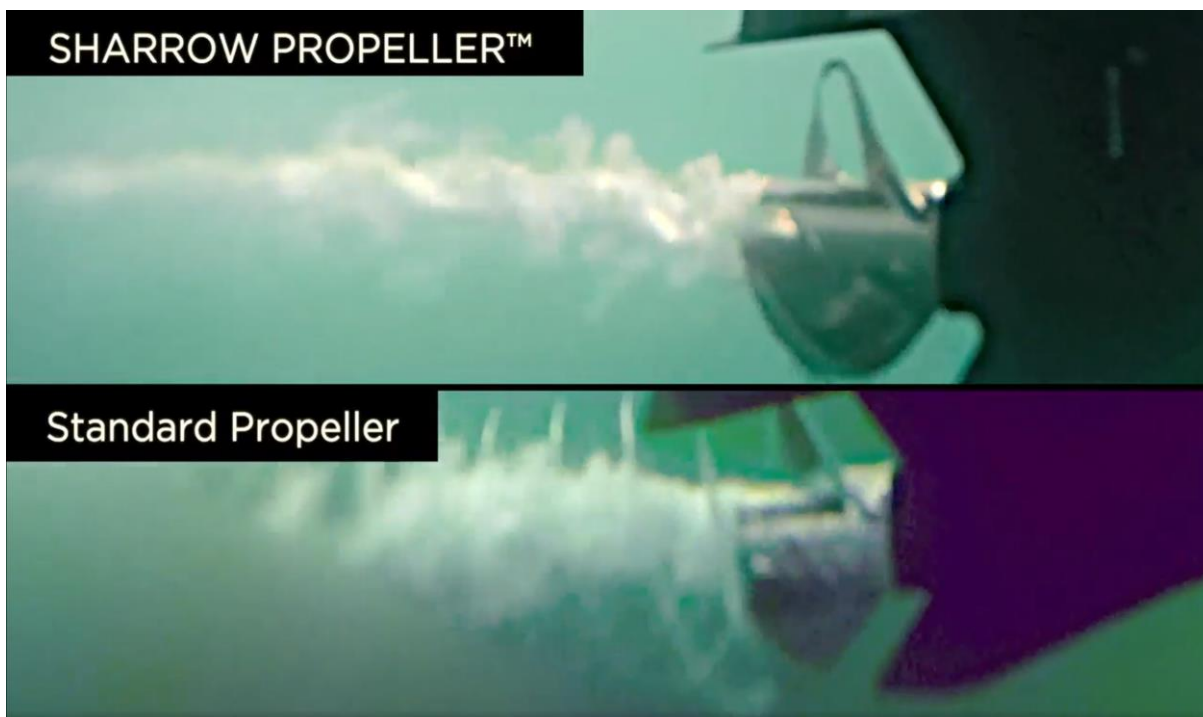
Obrázek 7 - toroidní vrtule využita jako lodní šroub [9]

Tyto vrtule byly nezávisle testovány a výsledkem byly výrazně lepší parametry oproti klasickým vrtulím. Výsledky se liší v závislosti na konkrétní lodi, rychlosti, atd, ale použití těchto vrtulí v průměru znamenalo snížení spotřeby přibližně o 25%. Zároveň účinnost může být v závislosti na konkrétní aplikaci až dvakrát vyšší.



Obrázek 8 - porovnání efektivity toroidních a standartních lodních šroubů [9]

Jedním z hlavních důvodů těchto výrazně lepších parametrů je opět to, že toroidní vrtule nemají žádné koncové body. Špičky čepelí u standartních vrtulí vytvářejí místa s výrazně nižším tlakem, což způsobuje kavitaci. Při kavitaci dochází k tomu, že se v místě s nízkým tlakem začne kapalina vypařovat a vytvoří bubliny plynu. Jakmile dojde ke zvýšení tlaku, tyto bubliny implodují. Tyto imploze narušují okolní proudění, jsou hlučné a zároveň mohou poškodit samotnou vrtuli [9].



Obrázek 9 - porovnání efektů kavitace toroidního a standartního lodního šroubu [9]

Dalším efektem této konstrukce je tedy i výrazně nižší hlučnost, a to v některých případech až o 80%. K tomu také přispívá to, že s těmito vrtulemi je možné použít nižší otáčky při zachování stejného tahu..

Nevýhodou těchto vrtulí je rozhodně komplikovanější výroba a tedy i výrazně vyšší cena, která může být až 10 násobná oproti standardním vrtulím. Na druhou stranu, při častém používání je možné, že se vrtule díky úspoře paliva zaplatí sama.

Tyto vrtule jsou ovšem zatím jen pro menší lodě. Pokud by se ovšem podařilo tyto vrtule navrhnout tak, aby fungovaly efektivně pro velké lodě, byl by to obrovský průlom. Lodní doprava je zodpovědná přibližně za 3% světových emisí [10]. Pokud by tedy hypoteticky bylo možné takto zvýšit efektivitu jejich lodních šroubů, byl by to obrovský rozdíl, jak z hlediska emisí, tak z hlediska nákladů na dopravu. Lodní šrouby velkých lodí fungují při značně rozdílných podmínkách oproti těm u malých lodí, např. jejich otáčky jsou výrazně nižší (v řádu stovek otáček za minutu oproti tisícům v případě malých lodí). Zde je tedy rozhodně prostor pro další výzkum.

1.8 Další využití

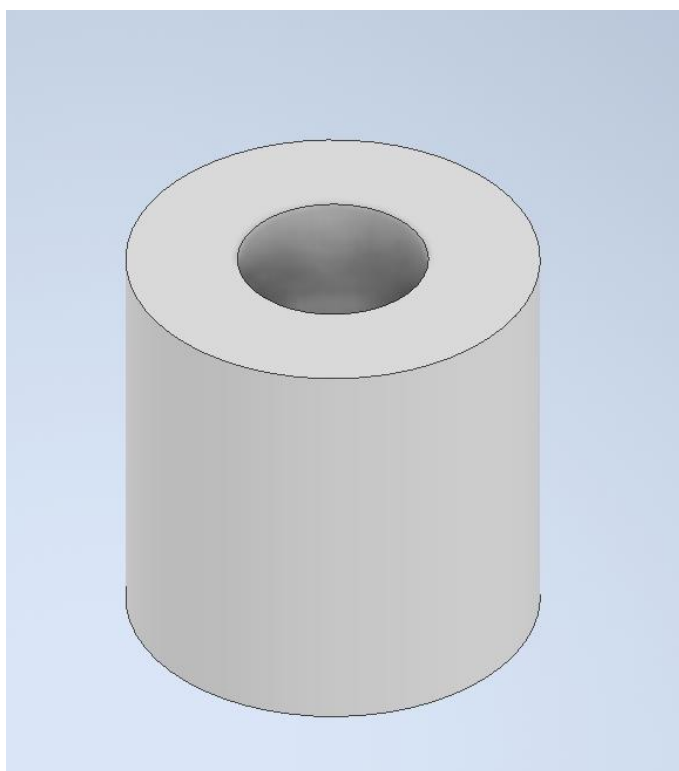
Další lidé zkoušeli, zda by bylo možné použít toroidní vrtule i pro jiné účely. Zde je ovšem nutné upozornit, že se již nejedná o příliš komplexní testy. Je zde tedy rozhodně prostor pro přesnější testování.

Jedním z nich je využití toroidní vrtule jako větráku do domácnosti. Nikodem Bartnik na stejnojmenném youtubovém kanále testoval právě toroidní vrtuli do větráku. Výsledkem bylo, že rychlost proudění a příkon zůstali prakticky totožné. Jediný rozdíl zaznamenal z hlediska hluku. Hlasitost samotná se sice příliš nezměnila, avšak došlo k posunu frekvencí, kdy toroidní vrtule produkovala zvuk s nižšími frekvencemi, které mohou působit na některé lidi méně nepříjemně [11].

Další experimenty provedl James Major na youtubovém kanále Major Hardware, který testoval toroidní vrtule pro použití při chlazení počítačů. Zde ovšem nedosáhl příliš dobrých výsledků. Toroidní vrtule zde měla při stejných otáčkách přibližně o 40% nižší průtok vzduchu a ani co se týče hlučnosti nedošlo ke zlepšení [12]. Možným důvodem je zde to, že otáčky jsou výrazně nižší oproti dronům/lodním šroubům (vyšší stovky oproti tisícům).

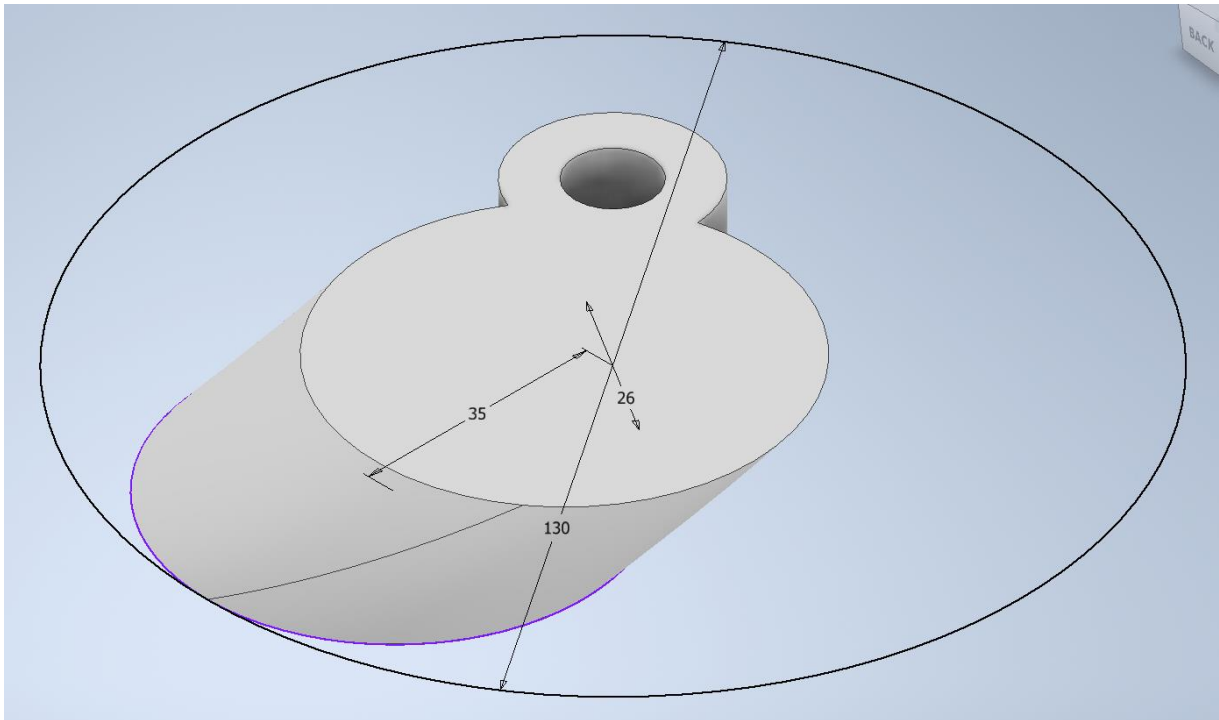
2. Tvorba geometrie

Při tvorbě 3D modelu začínáme středovým válcem, kterým bude míchadlo uchyceno k hřídeli. Jeho rozměry jsou dány rozměry hřídele a zvolenou výškou míchadla, která obvykle vychází z velikosti nádoby (konkrétní rozměry jsou uvedeny v experimentální části práce).



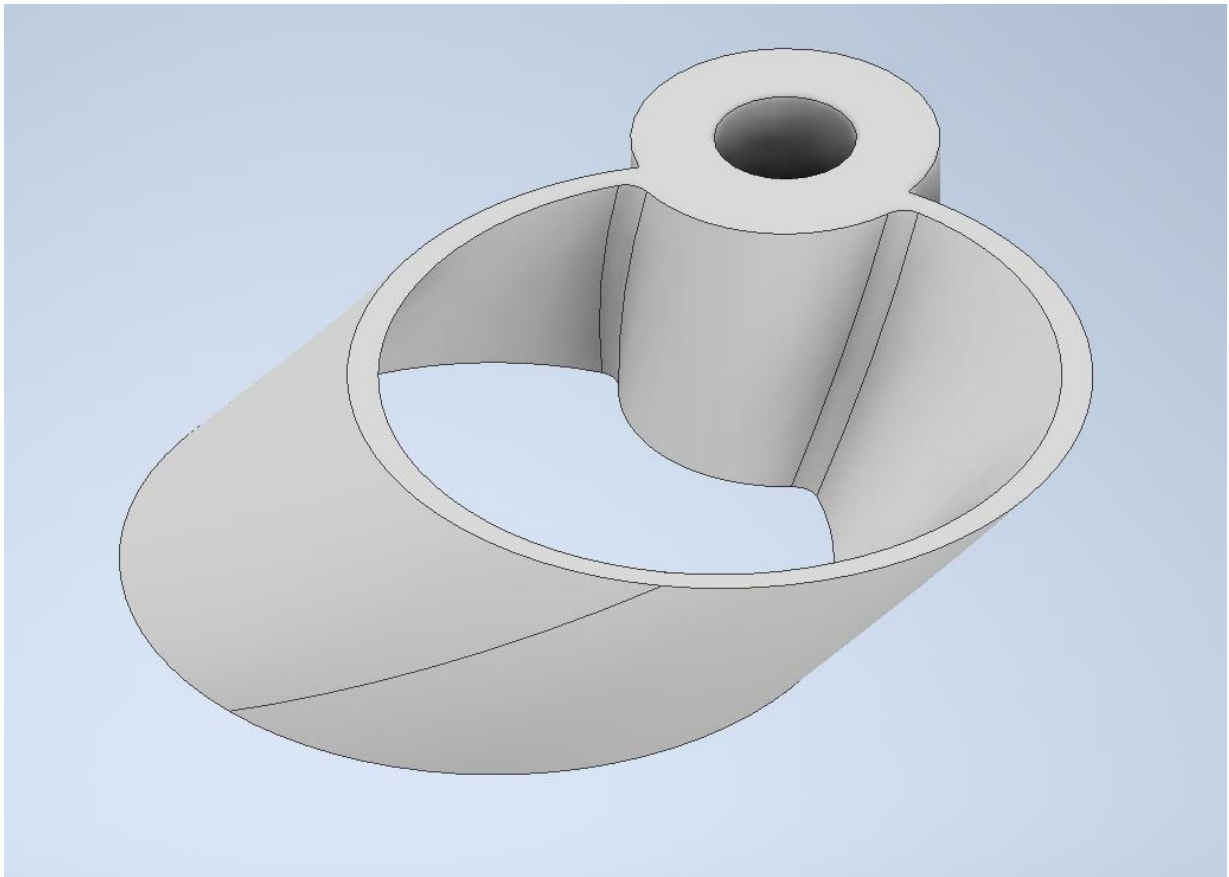
Obrázek 10 - první krok tvorby míchadla

Následně vytvoříme půdorys smyčky, kterou použijeme (pro začátek použijí kruh). Ten musí být excentricky umístěný tak, aby se z malé části křížil se středovým válcem. Následně ho vytáhneme do prostoru pomocí šroubovice. Výšku šroubovice nastavíme na výšku středového válce a pomocí rozteče měníme sklon smyčky.



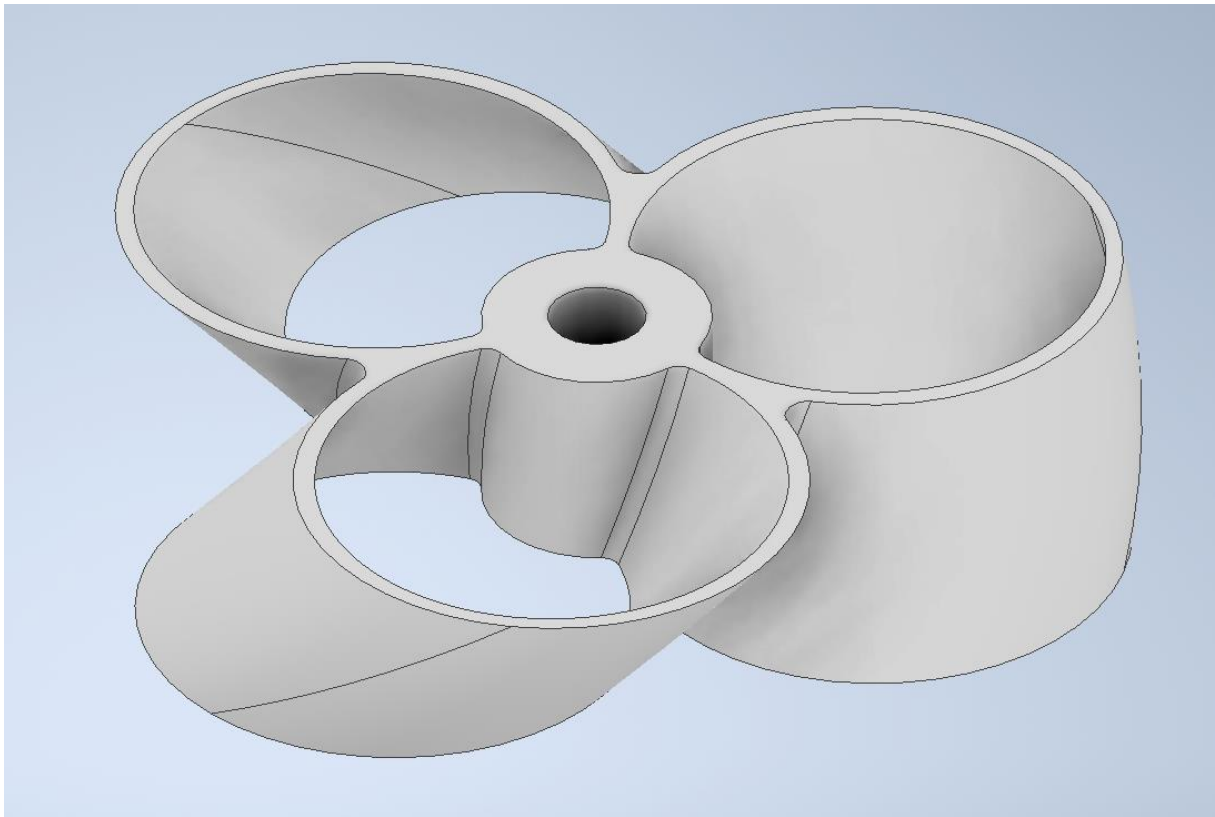
Obrázek 11 - druhý krok tvorby míchadla

V dalším kroku zvolíme tloušťku stěny, čímž vytvoříme samotnou smyčku a zároveň zahladíme hrany mezi ní a středovým válcem



Obrázek 12 - třetí krok tvorby míchadla

Posledním krokem je nakopírovat smyčku podle středové symetrie. V případě použití vyššího počtu smyček nastává situace, kdy se smyčky vzájemně začnou křížit. V takovém případě je nutné přebytečné čepele odstranit.



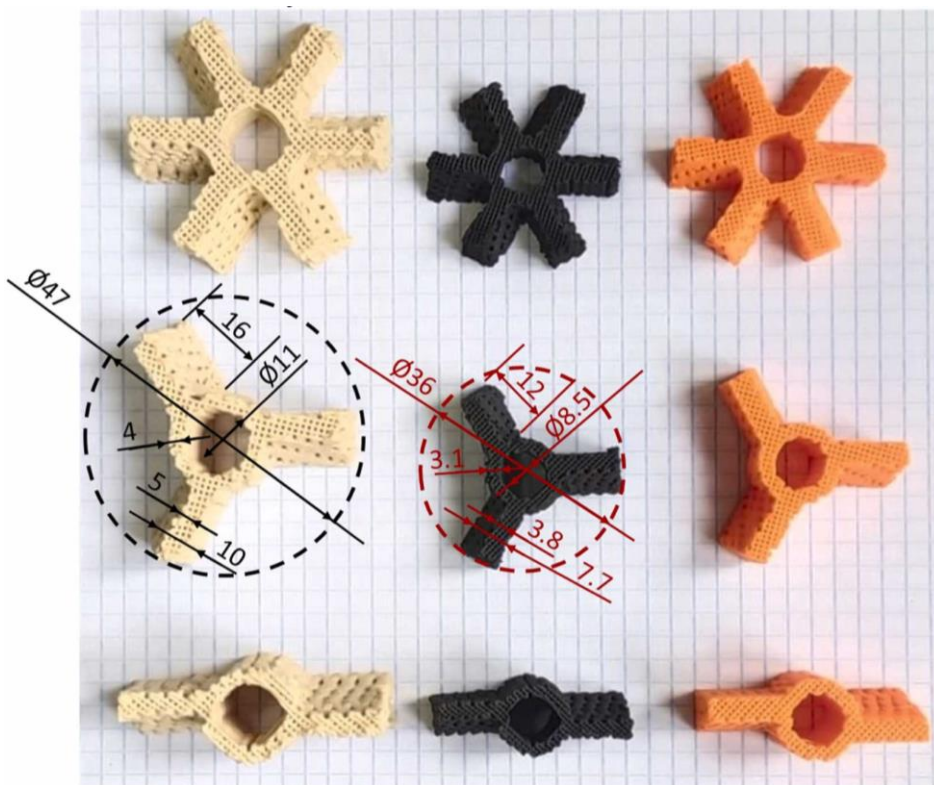
Obrázek 13 - čtvrtý krok tvorby míchadla

Je dobré ovšem zmínit, že toto není jediná metoda, jak vytvořit toroidní míchadlo. Jiným způsobem je např. vytvoření profilu smyčky a jeho následné tažení po křivce. Vzhledem ovšem k tomu, že mnou tvořená míchadla mají jednoduchý obdelníkový profil lopatek, tak je mnou vybraná metoda dle mého názoru nejvhodnější.

3. Využití 3D tisku pro potřeby míchání

3D tisk nalézá stále širší uplatnění v téměř všech průmyslových odvětvích. Jeho výhodou je především to, že díky postupnému nanášení vrstev pomocí něj lze vytvořit prakticky jakýkoliv tvar bez velkého množství odpadu.

3D tisk si již nachází cestu i do výroby míchadel. Míchadla mohou být takto vytvořena snadno v prakticky jakékoliv velikosti dle potřeby, a to navíc velmi levně [13], což se hodí především právě pro experimentální účely, kdy je vyžadována kusová výroba mnoha rozdílných míchadel. Zároveň je možné vytvořit i např. porózní míchadla, což se může hodit např. v aplikacích, kde dochází k přestupu hmoty [14].



Obrázek 14 - Porózní míchadla vytvořená pomocí 3D tisku [14]

Z důvodu postupného nanášení vrstev mají však míchadla vytvořená 3D tiskem obvykle hrubý povrch, který teoreticky může mít vliv na procesní charakteristiky. Proto je vhodné porovnat tato míchadla s těmi vytvořenými konvenčními metodami, tedy např. pomocí svařování ocelových výpalků.

4. Navrhnutá míchadla

Geometrii toroidního míchadla obličňuje především počet uzavřených smyček, které ho tvoří a základní tvar smyčky. Tyto parametry jsem se rozhodl měnit s cílem najít tu nejvhodnější variantu. Další parametry, jako je výška míchadla, nebo tloušťka čepelí zůstaly u všech míchadel konstantní.

Všechna míchadla mají průměr 130 mm, výšku 26 mm, a tloušťku čepelí 2 mm. Parametry byly zvoleny tak, aby odpovídaly standartně používanému geometrickému uspořádání vzhledem k průměru použité nádoby (viz. Kapitola Způsob měření homogenizace). Všechna byla také vyrobena pomocí 3D tisku. Jako materiál pro jejich výrobu byl použit termoplast PLA. Vzhledem k více proměnným parametrům jsem se rozhodl testovat míchadla v několika generacích.

V první generaci jsem se rozhodl využít kruh, jakožto nejjednodušší geometrický tvar jako základ pro tvorbu smyček a odlišit míchadla pomocí samotného počtu smyček. Ten se pohyboval v rozpětí od dvou do pěti. Celkem bylo vytvořeno 6 míchadel, tedy 5 toroidních a šestilopátkové míchadlo 6L45 pro porovnání.



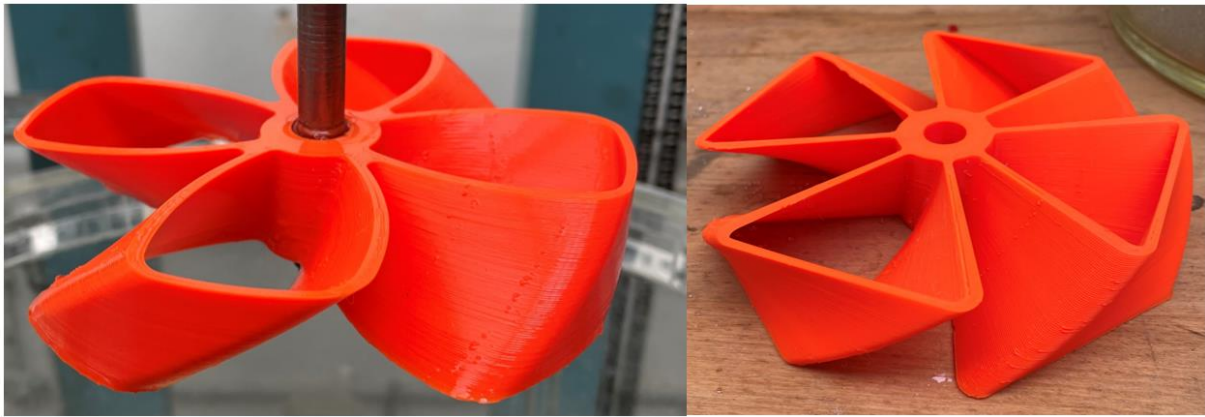
Obrázek 15 - první generace míchadel - TM2A45, TM3A45, TM4A45, TM5A45, TM6A45, 6L45

V druhé generaci zůstal počet smyček konstantní – 4 smyčky, přičemž míchadla se lišila tvarem smyček. Tvar byl volen s cílem na minimalizaci tangenciálního toku a zároveň tak aby tvar nebyl příliš komplikovaný pro výrobu (velké množství podpěrného materiálu při 3D tisku). V druhé generaci bylo vytvořeno celkem 5 míchadel. Součástí této generace byla také dvě ozubená míchadla. Tyto zuby mají tvar podle funkce sinus. Myšlenkou zde bylo, že tyto zuby by mohly vytvořit větší počet menších vírů, které by pomohly s hmogenizací.



Obrázek 16 - druhá generace míchadel - TM4B45, TM4C45, TM4D45, TM4E45, TM4F45

Třetí generace obsahovala už jen 2 míchadla, přičemž jednalo se o modifikaci míchadla TM4C45, které dosáhlo v druhé generaci nejlepších parametrů (viz. Kapitola Diskuze výsledků).



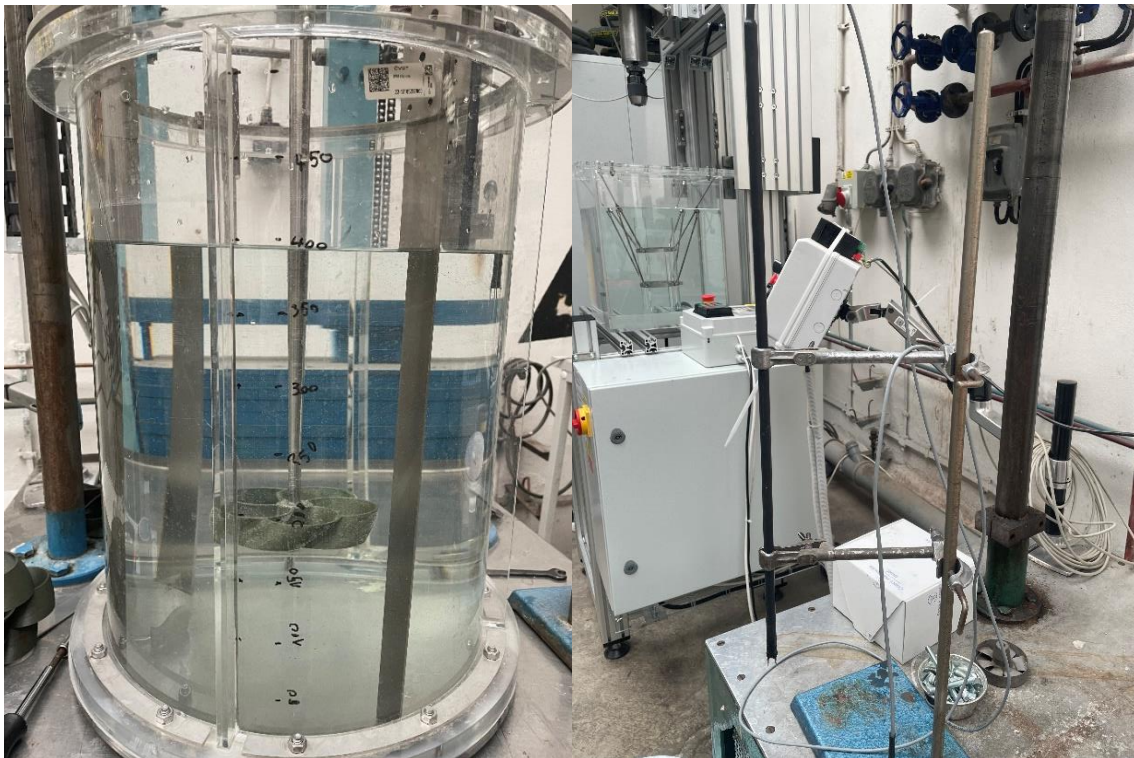
Obrázek 17 - třetí generace míchadel - TM4G45, TM4H45

Celkem bylo tedy vytvořeno 13 míchadel, z toho 12 toroidních a jedno klasické, šestilopátkové pro porovnání. Toroidní míchadla jsem se rozhodl pojmenovat podle následujícího klíče:

Označení začíná dvěma písmeny – TM, což značí, že jde o toroidní míchadlo (toroidal mixer), dále číslem popisujícím počet smyček. Následuje písmeno značící základní tvar smyčky v pořadí, v jakém byly vytvořeny, počínaje písmenem A. Označení je zakončeno číslem 45, které značí fakt, že maximální sklon smyčky je 45° .

5. Způsob měření homogenizace

Měření probíhalo v nádobě válcového tvaru s plochým dnem o průměru 400 mm. Výška hladiny vody byla stanovena stejná, jako průměr nádoby, tedy 400 mm. Míchadlo o průměru 130mm, tedy přibližně jedné třetiny průměru nádoby bylo uchyceno na hřídeli ve středu nádoby ve výšce 130mm ode dna, tedy opět přibližně ve třetině výšky nádoby. Pro polovinu měření byly rovněž použity narážky, o šířce jedné desetiny průměru nádoby, tedy 40 mm. Čtyři narážky byly pravidelně rozmístěny po 90 stupních.

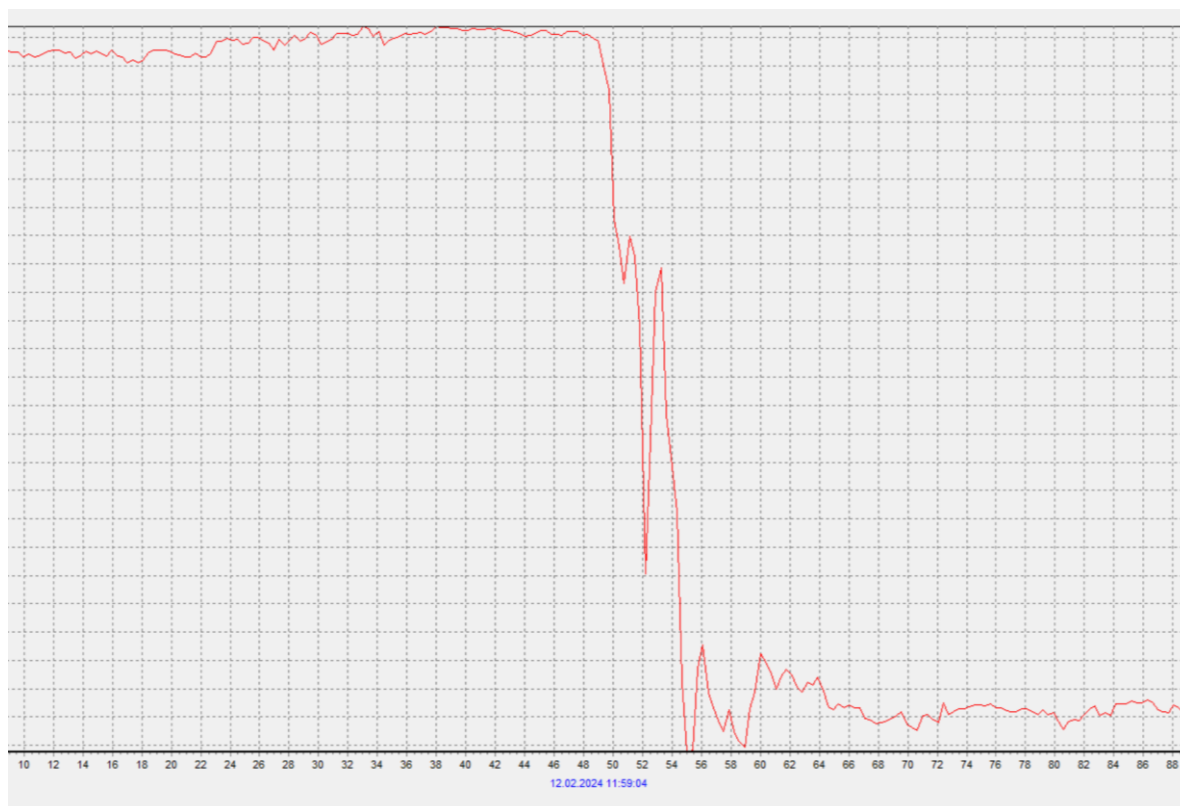


Obrázek 18 - Použitá nádoba a vodivostní sonda

Měření doby homogenizace probíhalo pomocí vodivostní metody. Při té jsou snímány změny ve vodivosti kapaliny pomocí sondy. Ta byla umístěna v místě, kde lze očekávat nejdelší čas homogenizace, tedy ve vzdálenosti jedné desetiny průměru od stěny a jedné desetiny výšky od hladiny.

Ke změně vodivosti byl použit nasycený roztok soli. Ten byl nastříkovan do středu nádoby v množství 2-3 ml na jedno měření. Rozpuštěná sůl zvyšuje vodivost vody, což sonda dokáže zachytit. Signál je poté převodníkem AD24USB posílán do počítače. Výstupem je graf

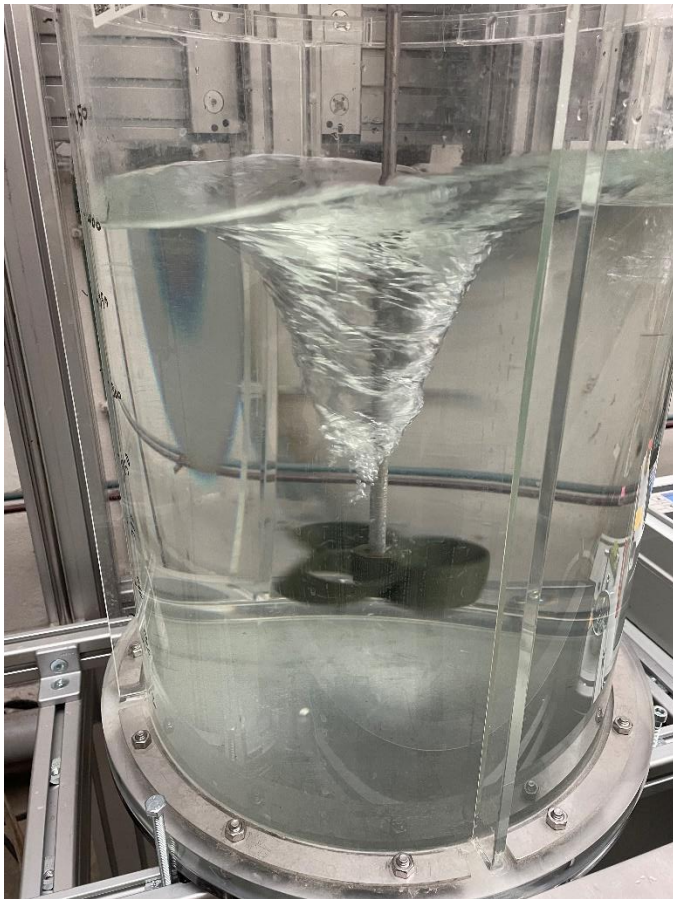
zobrazující závislost vodivosti na čase. Z tohoto grafu je následně možné získat čas, kdy se vodivost začíná měnit a čas, kdy dojde k ustálení v rozpětí 2%. Rozdíl mezi nimi je poté doba homogenizace.



Obrázek 19 - průběh změny vodivosti

Měření probíhalo v rozsahu otáček 60ot/min až 360ot/min v intervalech o velikosti 30. Každé míchadlo bylo testováno jednou s v aplikaci s narážkami a jednou bez nich. Celkem tedy bylo provedeno 22 měření na homogenizace pro každé míchadlo. Dolní mez otáček byla stanovena tak, aby experiment probíhal v turbulentní oblasti, na což byla tato míchadla navržena. Horní mez byla stanovena tak, aby nedocházelo k přísávání vzduchu. To by mohlo způsobit poškození míchadel, je hlučné a navíc bublinky vzduchu prolétávají kolem sondy, což výrazně mění vodivost a činí její měření prakticky nemožné.

Při měření v aplikaci bez narážek si bylo nutné dát pozor na rezonanci. K té docházelo v závislosti na konkrétním míchadle přibližně mezi 150-210 ot/min. Během rezonance došlo k výraznému zvlnění hladiny a velkým výkyvům vodivosti a také k delším časům homogenizace. Jelikož ustálení tohoto zvlnění trvalo obvykle několik minut, řešil jsem tento problém tak, že jsem na krátkou dobu vložil do nádoby narážky pro jeho uklidnění. Po jejich vyndání jsem naměřil hodnoty ještě předtím, než došlo opět k ustálení daných vln.



Obrázek 20 - rezonanční vlnění hladiny

V určitých intervalech dosáhla koncentrace soli v nádobě již takové úrovně, která měla negativní vliv na měření. Výkyvy hodnot vodivosti se začaly zvětšovat, což komplikovalo jejich odečítání. Přibližně po naměření 30 hodnot (odpovídá zhruba množství měření pro 1,5 míchadla) bylo nutné vsádku vyměnit.

Součástí experimentu bylo také pravidelné měření teploty vody, které probíhalo vždy při výměně míchadla pomocí termočlánku ExTech SDL200 typu K.

6. Způsob měření příkonových čísel

Měření probíhalo ve stejné nádobě, jako homogenizace, se stejným umístěním míchadla, narážek, výškou hladiny, atd.

Přímo měřenou veličinou byl kroutící moment. Ten byl měřen pomocí snímače Lorenz DR-2500. Z něho lze následně spočítat příkon a poté i příkonové číslo (viz. Úvod). Každé jednotlivé měření bylo vzorkováno přibližně 30 sekund. Kromě samotné hodnoty momentu byla změřena i odchylka. Rozsah a počet měření byl zde opět shodný s měřením homogenizace, tedy v rozsahu 60-360 ot/min v intervalech o velikosti 30 ot/min jak pro aplikaci s narážkami, tak bez nich.

Pomocí naměřeného kroutícího momentu a otáček za sekundu lze následně spočítat příkon daný tímto vztahem:

$$P = Mn2\pi \quad (6.0-1)$$

Opět stejně jako v případě homogenizace, zde docházelo v určitém rozmezí otáček k rezonanci, což vyžadovalo řešení (Viz. Způsob měření homogenizace) a teplota vody byla opět měřena vždy při výměně míchadla. Na rozdíl od homogenizace zde však nebylo nutné pravidelně vyměňovat vodu.



Obrázek 21 - měřicí stanice pro příkonová čísla

7. Simulace průtokového čísla

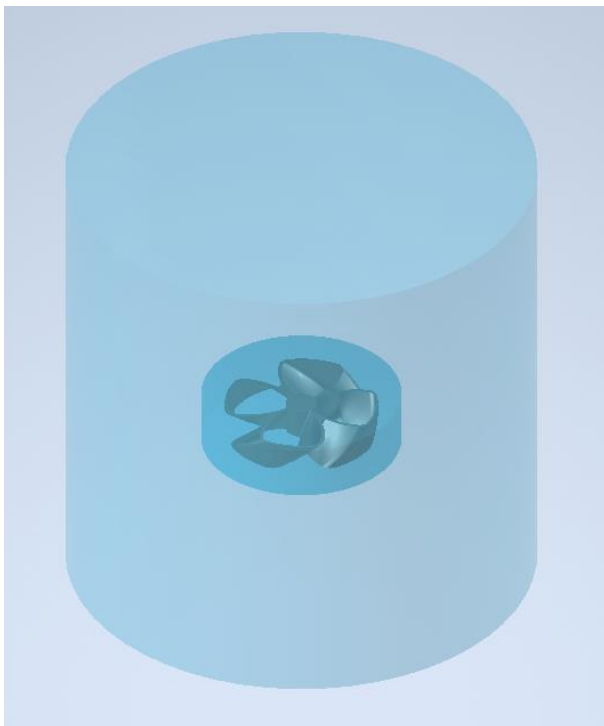
Průtokové číslo je další parametr popisující míchadla. Jedná se o bezrozměrné vyjádření čerpací výkonnosti, tedy objemového množství vystupujícího z míchadla za jednotku času. Průtokové číslo závisí na Reynoldsově čísle, přičemž v turbulentní oblasti je jeho hodnota přibližně konstantní [2].

$$N_{QP} = \frac{Q_p}{nd^3} \quad (7.0-1)$$

Hodnotu průtokového čísla lze nalézt buďto měřením např. pomocí střední doby cirkulace indkační částice[2], nebo numericky, pomocí např. CFD simulace, čehož jsem využil v této práci. Z důvodu časové náročnosti jsem provedl simulaci pouze pro jedno míchadlo.

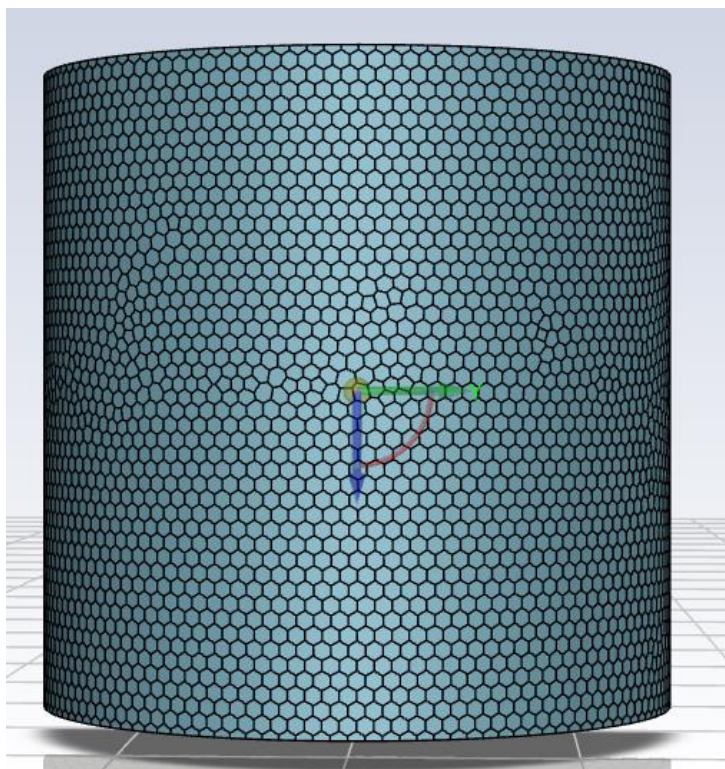
CFD simulace pro zjištění hodnoty průtokového čísla probíhala v prostředí programu Ansys Fluent. Pro tuto simulaci jsem si zvolil míchadlo TM4C45 v aplikaci bez narážek při 360 ot/min, tedy maximálních otáčkách měření.

V prvním kroku jsem vytvořil model kapaliny, který se skládal ze dvou částí. První bylo přímé okolí míchadla, což byl válec, ze kterého byla odstraněna část, která odpovídala samotnému míchadlu. Druhou částí byl zbytek nádoby.

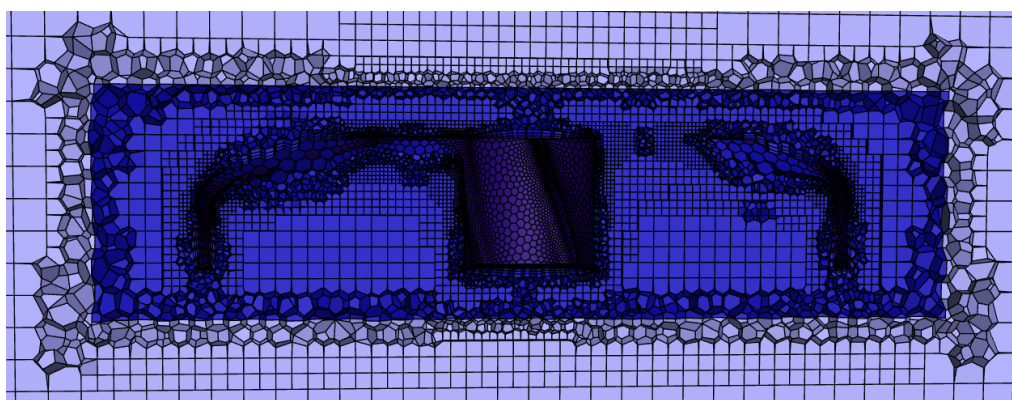


Obrázek 22 - Model kapaliny

Druhý krokem bylo vytvoření sítě. Využil jsem hexa-hedrální síť. Rozdělení nádoby do dvou částí umožňuje vytvořit jemnější síť v blízkosti míchadla a méně jemnou ve zbylé části. Síť měla přibližně 650000 elementů.



Obrázek 23 – síť

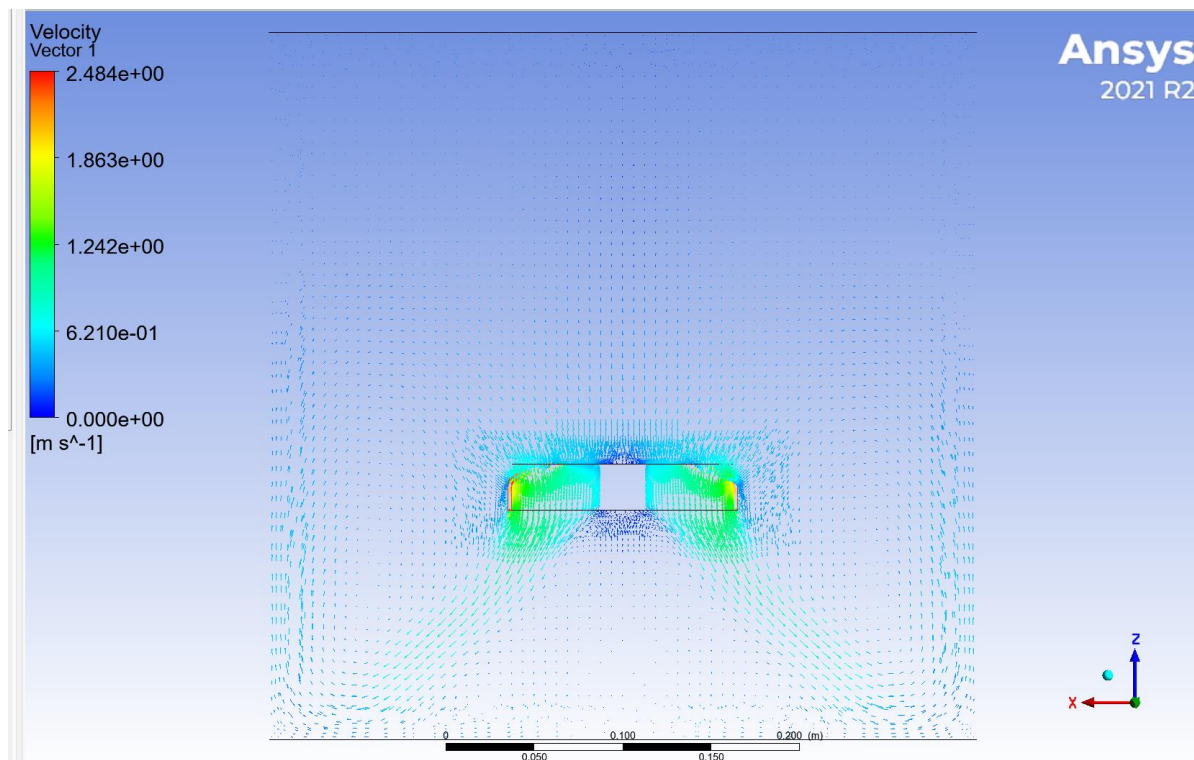


Obrázek 24 - detail sítě v blízkosti míchadla

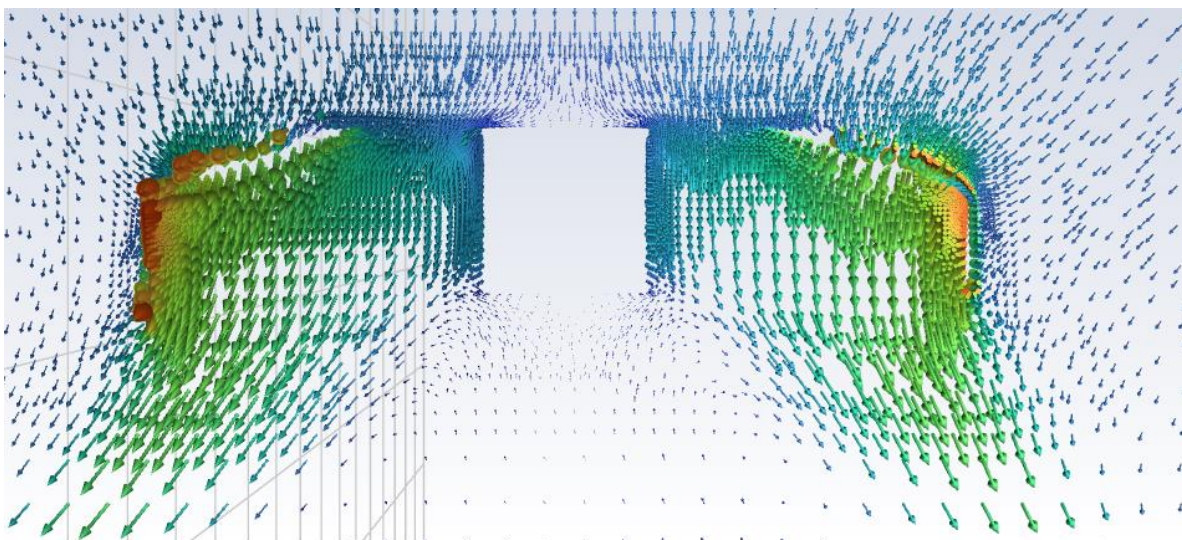
Jelikož jde o turbulentní proudění (viz. Kapitola „Způsob měření homogenizace“), tak jsem využil funkci „*k-epsilon*“. Jelikož se snažím zjistit rychlostní pole, tak mi pro simulaci vystačí

pouze jedna složka, a to voda při standardních podmínkách (hustota 998 kg/m³ a viskozita 1 mPa.s). Jde o ustálené rychlostní pole, tudíž využívám stacionární řešení. Samotného pohybu míchadla je v simulaci dosaženo tím, že je nadefinován rotační pohyb kapaliny v jeho blízkosti, v tomto případě rychlostí 360 ot/min. Počet iterací byl stanoven na 1000.

Výsledkem simulace je rychlostní pole v míchané nádobě. Díky tomu lze pro danou oblast znát průtok. Průtok plochou míchadla byl zjištěn s hodnotou 0,0072 m³/s. Pomocí daných otáček a průměru míchadla lze vypočítat bezrozměrnou hodnotu průtokového čísla, které vychází s hodnotou 0,55.



Obrázek 25 - rychlostní pole v míchané vsádce



Obrázek 26 - detail rychlostního pole

Hodnota průtokového čísla pro míchadlo 6L45 v aplikaci s narážkami je přibližně 0,65 [2]. Vzhledem k tomu, že tato simulace byla prováděna pro aplikaci bez narážek, lze výsledek v hodnotě 0,55 považovat za uspokojivý.

8. Statická silová analýza míchadel

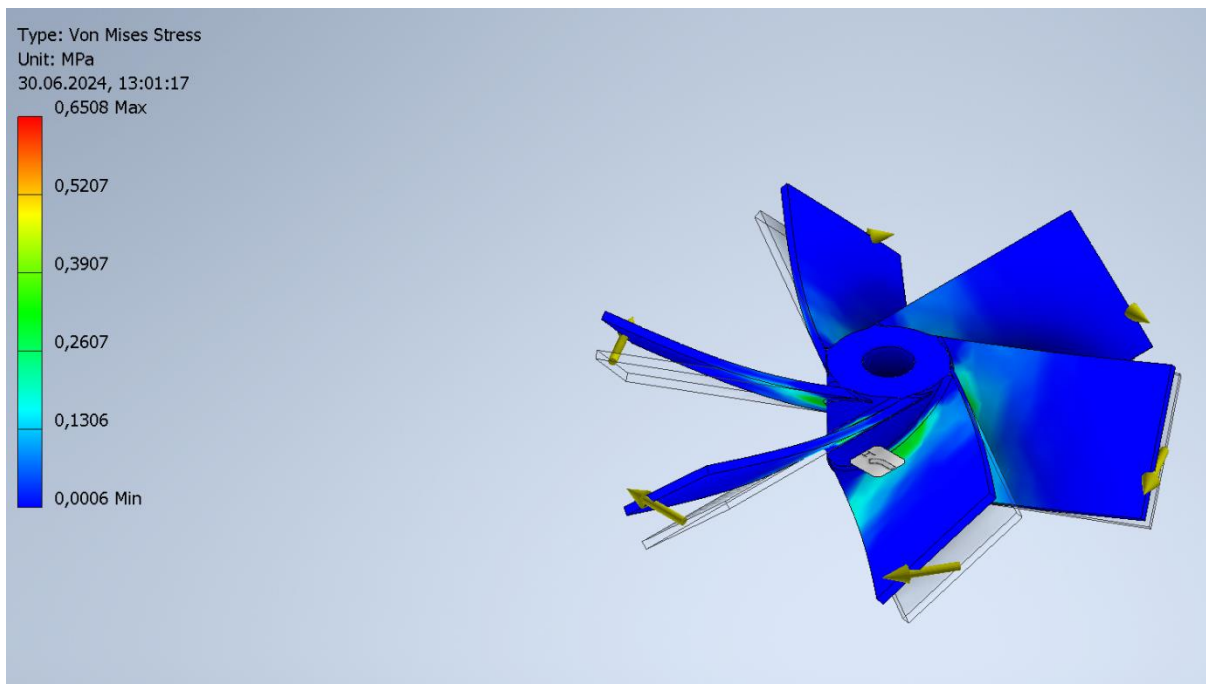
Na míchadla za chodu působí síly vyvolané odporem kapaliny v nádobě. Tyto síly je důležité znát nejen pro návrh vhodné hřídele, ale i pro dimenzování samotných míchadel. Cílem této simulace je porovnat silové účinky na lopatky toroidního míchadla s šestilopátkovým míchadlem 6L45. Pro tuto simulaci jsem zvolil míchadlo TM4C45. Pro pevnostní analýzu byl použit program Autodesk Inventor.

Existují dva základní postupy, jak stanovit síly působící na míchadlo. První varianta vychází z příkonu motoru za situaci, kdyby došlo k zablokování míchadla v kapalině. Druhá varianta vychází z naměřeného momentu za pracovních podmínek. Jelikož jsou tato míchadla určena k homogenizaci nízkoviskózních látek, tak nepředpokládám možnost zablokování míchadla a použiji druhou metodu, konkrétně postup doporučený firmou Chemineer [15],

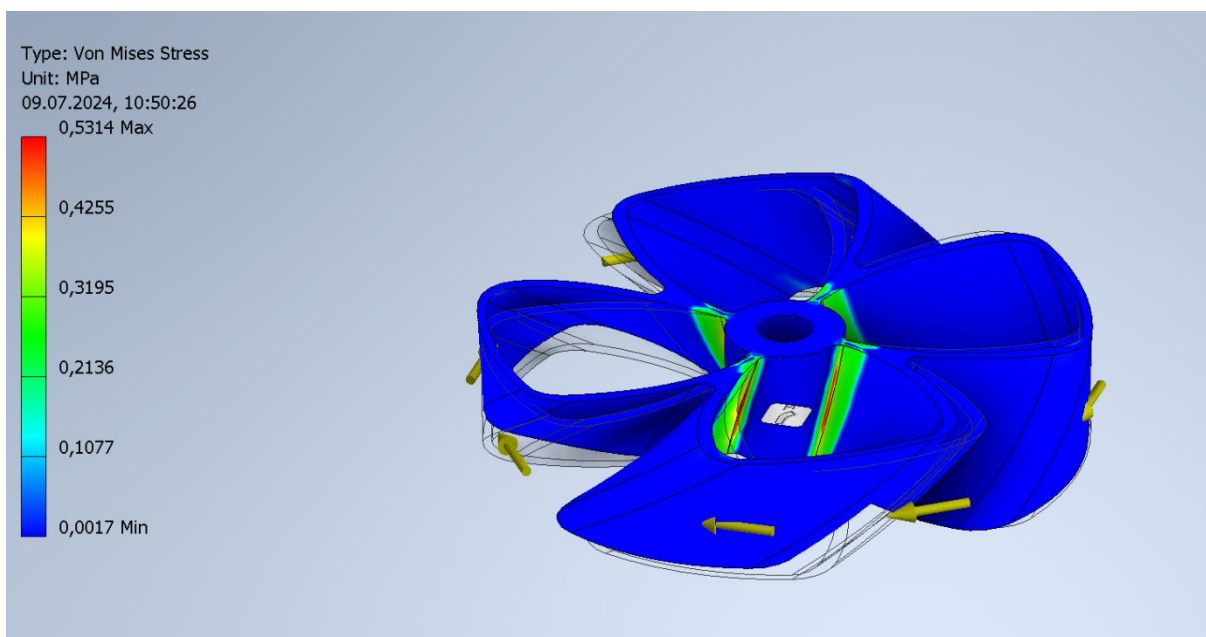
$$F = \frac{0,301Mb}{d} \quad (8.0-1)$$

kde b je součinitel závisící na geometrickém uspořádání míchacího zařízení. Jelikož je míchadlo umístěno centricky, není blízko hladině, tak volím hodnotu 1. Jako hodnotu momentu jsem zvolil hodnotu pro míchadlo 6L45 v aplikaci bez narážek při 330 ot/min, jelikož to byly maximální otáčky, než docházelo k aeraci. Výsledkem je hodnota 0,22 N, kterou jsem následně použil pro samotnou pevnostní simulaci. Prvně jsem testoval míchadlo 6L45. Působíště síly jsem umístil na konec každé lopatky s tangenciální orientací. Pro míchadlo TM4C45 jsem volil sílu o velikosti 6/8 té původní z důvodu většího počtu lopatek. Tyto lopatky nemají přímo žádné zakončení, působíště sil jsem tedy zvolil body nejdál od středu. Jako vetknutí jsem u obou míchadel vnitřní válec, kde je míchadlo uchyceno k hřídeli.

Z výsledků vyplývá, že toroidní míchadlo TM4C45 dosáhlo přibližně o 20% nižšího maximálního napětí oproti míchadlu 6L45, přibližně 0,53 MPa oproti 0,65 MPa. Maximální průhyb byl výrazně nižší, a to přibližně 0,4mm u míchadla TM4C45 oproti 0,9mm u míchadla 6L45. Je nutné zdůraznit, že na míchadla působí síly z více směrů. Toto není komplexní silová analýza míchadel. Podle mě nicméně dostatečně ukazuje, že toroidní míchadla si povedou z hlediska únosnosti minimálně stejně dobře, pravděpodobněji spíše lépe, než standartně používaná míchadla.



Obrázek 27 - rozložení napětí v míchadle 6L45



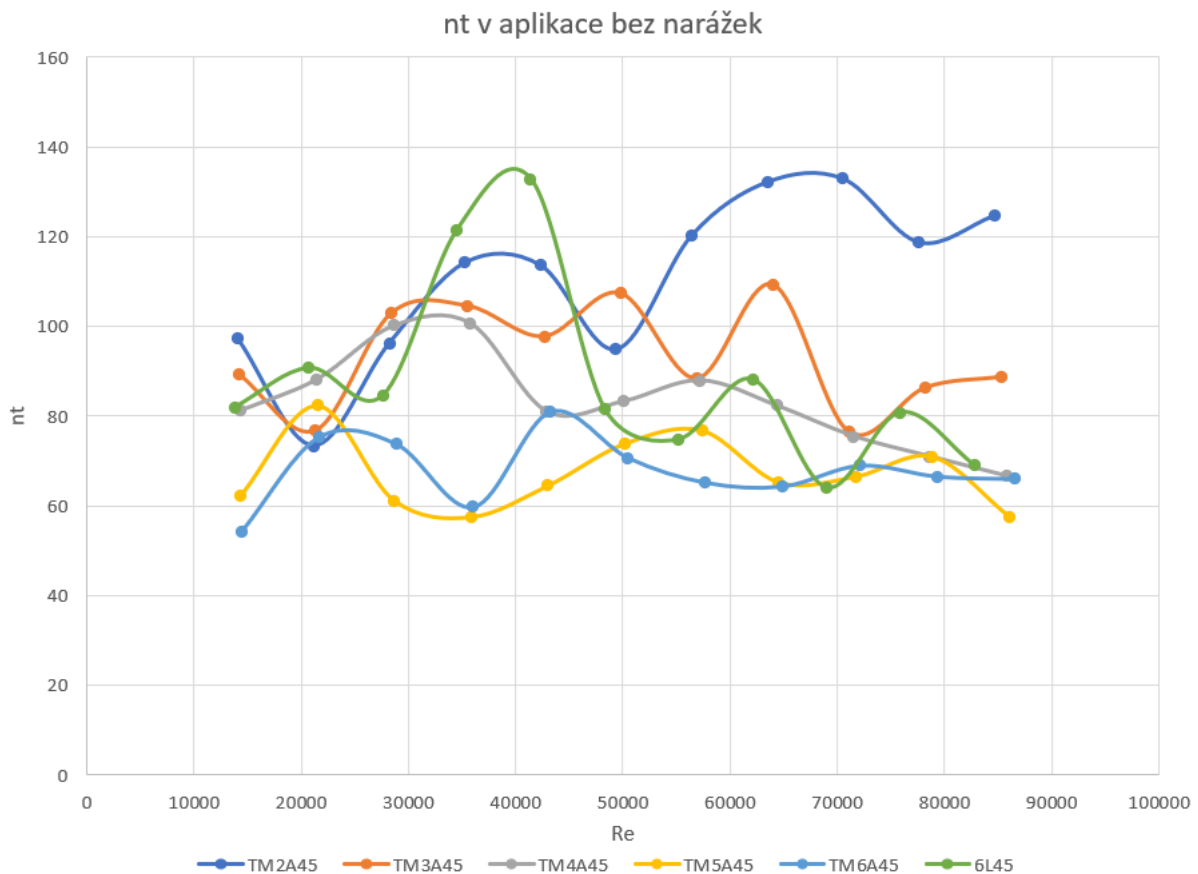
Obrázek 28 - rozložení napětí v míchadle TM4C45

9. Výsledky měření

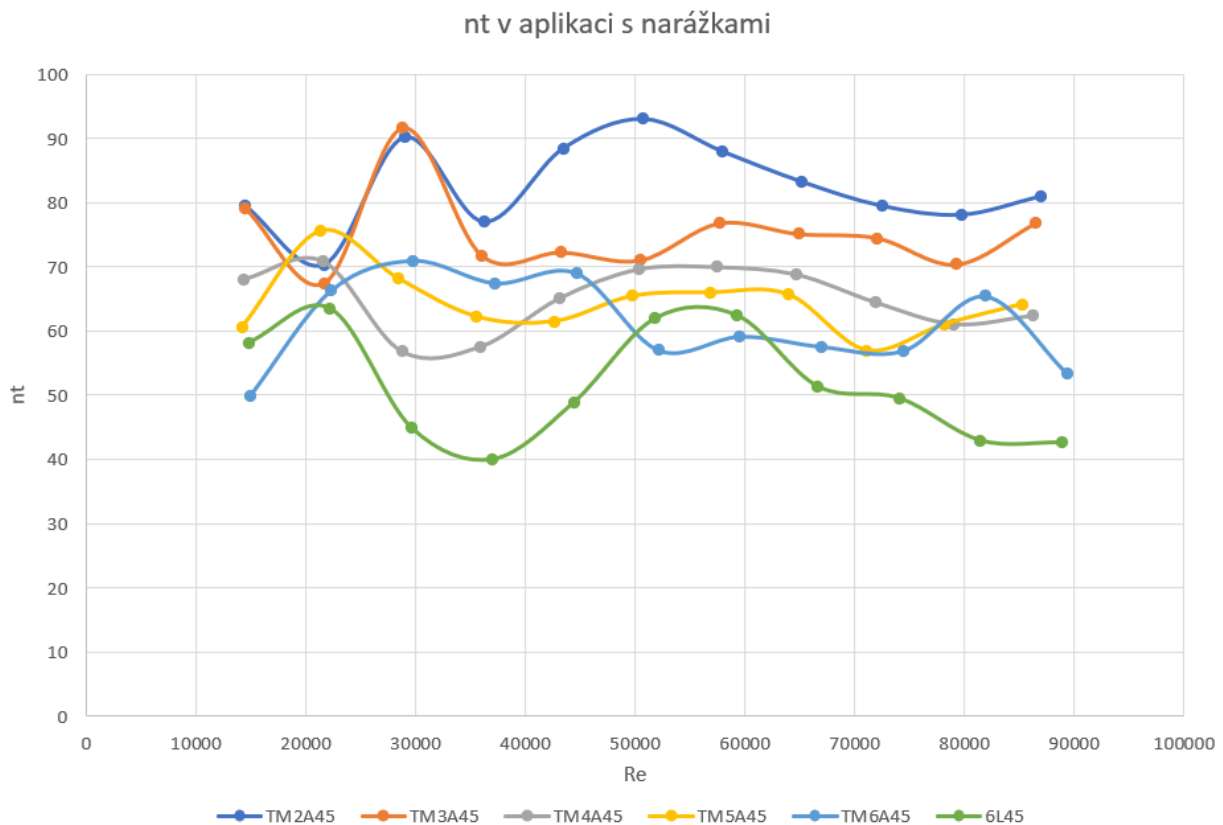
Míchadla byla testována za podmínek uvedených v kapitole „Způsob měření homogenizace“ a „Způsob měření příkonových čísel“. Vzorce zde použité jsou popsány v kapitole „Základy míchání“. Číselné výsledky jsou uvedeny v příloze.

9.1 Výsledky homogenizace první generace míchadel

Z výsledků prvního měření homogenizace vyplývá, že míchadla s více smyčkami, a tedy i větší plochou dosahují nižších hodnot bezrozměrného času homogenizace. Toto lze pozorovat jak v aplikaci s narážkami, tak bez nich.



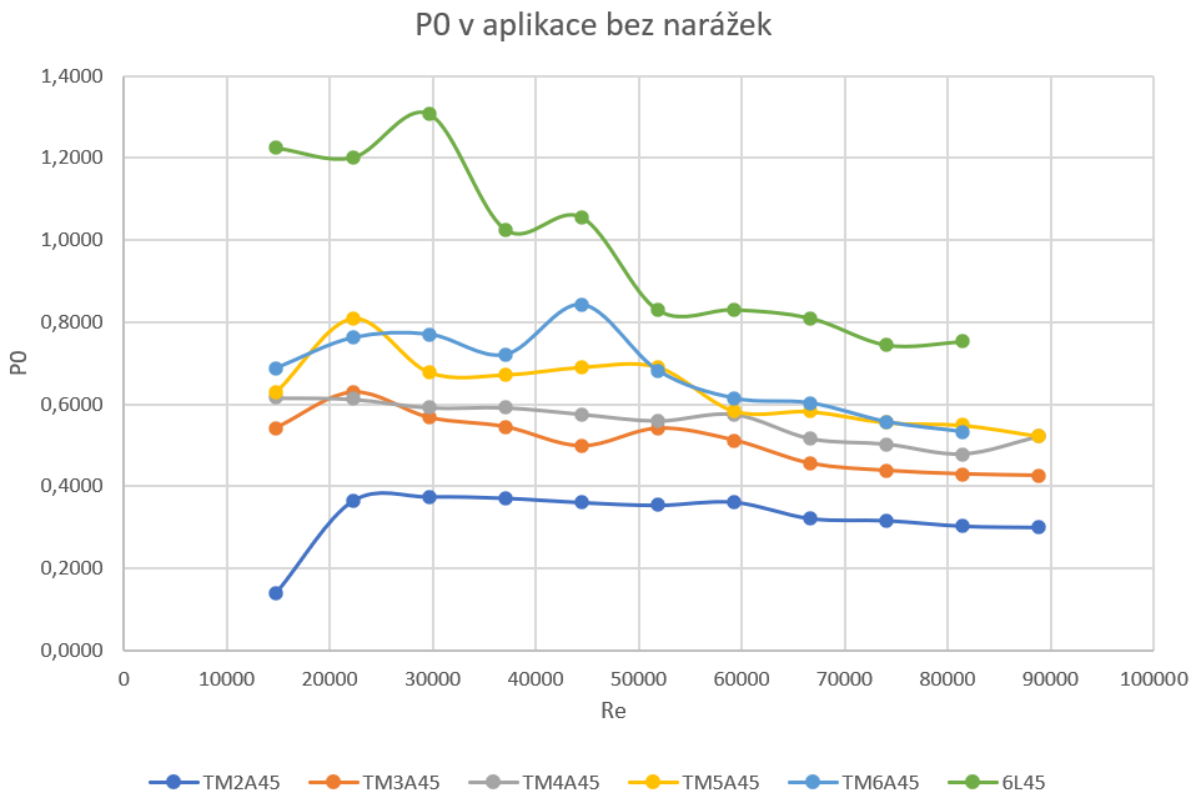
Obrázek 29 - závislost bezrozměrného času homogenizace na Reynoldsově čísle pro první generaci míchadel v aplikaci bez narážek



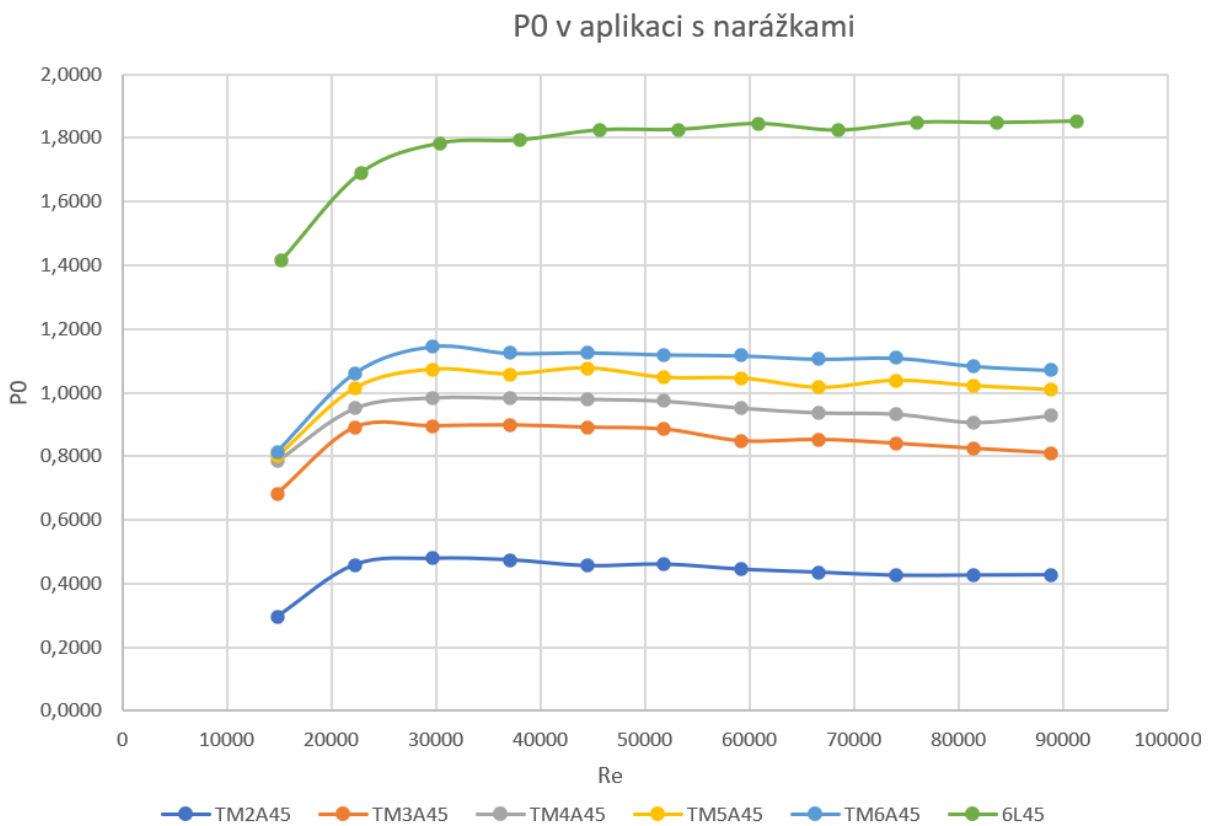
Obrázek 30 - závislost bezrozměrného času homogenizace na Reynoldsově čísle pro první generaci míchadel v aplikaci s narážkami

9.2 Výsledky příkonových čísel první generace míchadel

Z výsledků měření příkonových čísel vyplývá, že příkonová čísla rostou s počtem smyček a tedy plochou míchadla. Zároveň lze pozorovat, že při středních hodnotách Reynoldsova čísla (40000 až 50000) příkonové číslo šestilopátkového míchadla 6L45 stále klesá zatímco, toroidní míchadla dosahují stabilní hodnoty při výrazně nižších hodnotách Re. U nejnižších hodnot Re vidíme výrazný pokles hodnoty příkonového čísla, ačkoliv dle očekávání měly hodnoty naopak výrazně růst. Toto je s nejvyšší pravděpodobností způsobeno nepřesností měření momentu, která se nejvíce projevuje právě při nízkých hodnotách Re. Hodnota příkonového čísla pro míchadlo 6L45 v aplikaci s narážkami byla naměřena přibližně s hodnotou 1,8, což se velmi blíží již dříve naměřeným hodnotám [2]. Hrubý povrch míchadla tedy patrně nemá výrazný vliv na jeho procesní charakteristiky, resp. Jeho vliv je menší, než nejistoty měření.



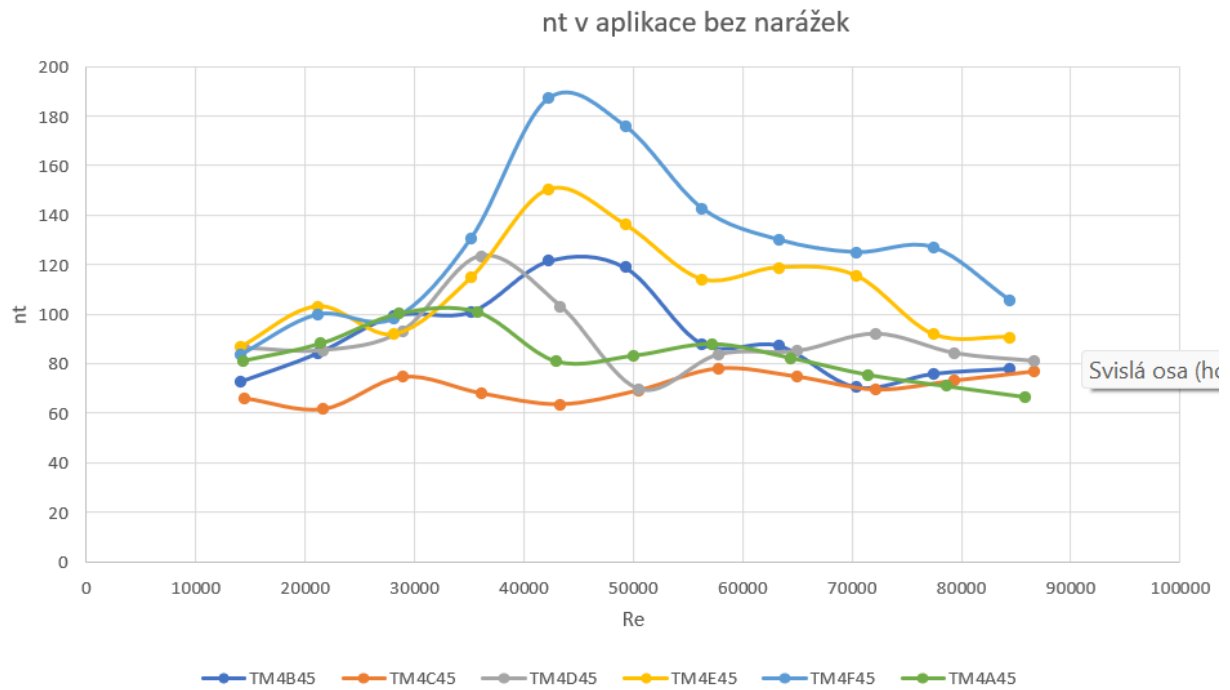
Obrázek 31 - příkonové charakteristiky první generace míchadel v aplikaci bez narážek



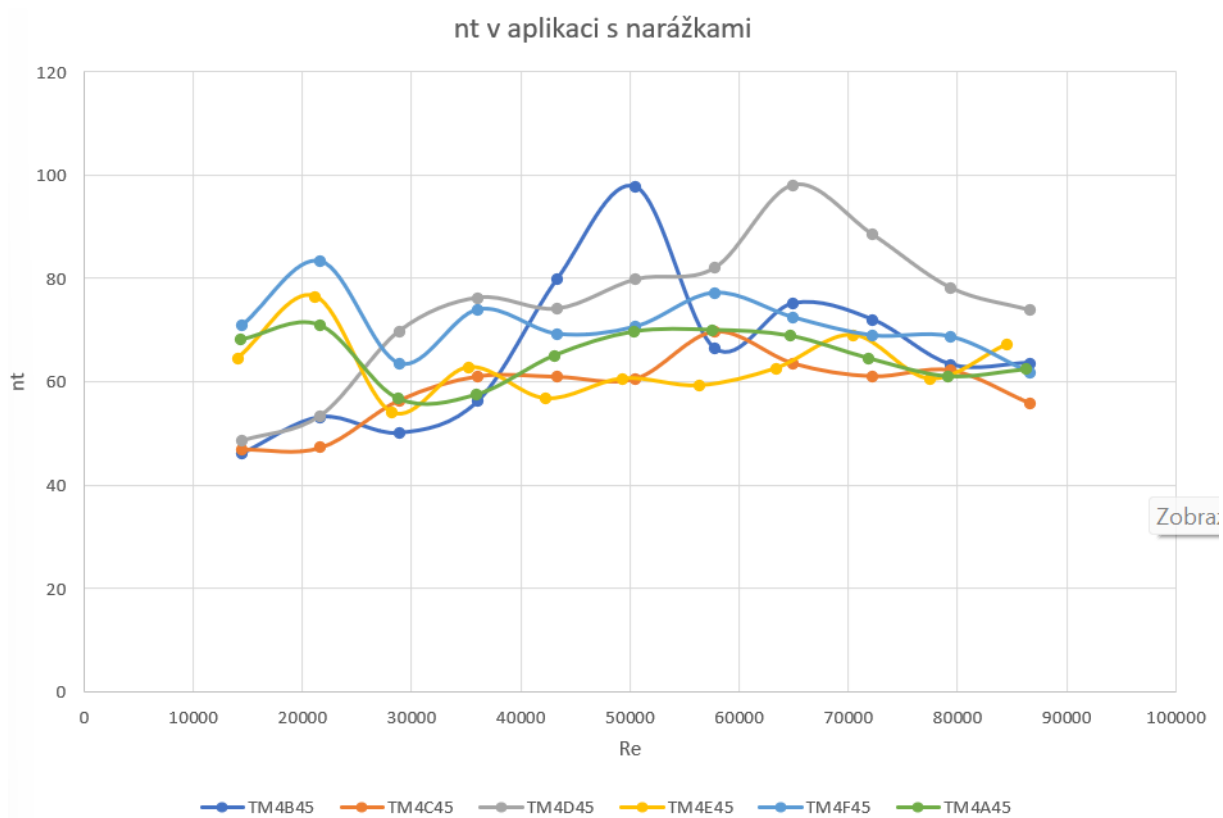
Obrázek 32 - příkonové charakteristiky první generace míchadel v aplikaci s narážkami

9.3 Výsledky homogenizace druhé generace míchadel

Všechna míchadla v druhé generaci byla tvořena čtyřmi smyčkami a lišila se v jejich tvaru. Z výsledků vyplívá, že ozubená míchadla nedosahovala velmi dobrých hodnot bezrozměrného času homogenizace



Obrázek 33 - závislost bezrozměrného času homogenizace na Reynoldsově čísle pro druhé generaci míchadel v aplikaci bez narážek



Obrázek 34 - závislost bezrozměrného času homogenizace na Reynoldsově čísle pro druhé generaci míchadel v aplikaci s narážkami

9.4 Výsledky příkonových čísel druhé generace míchadel

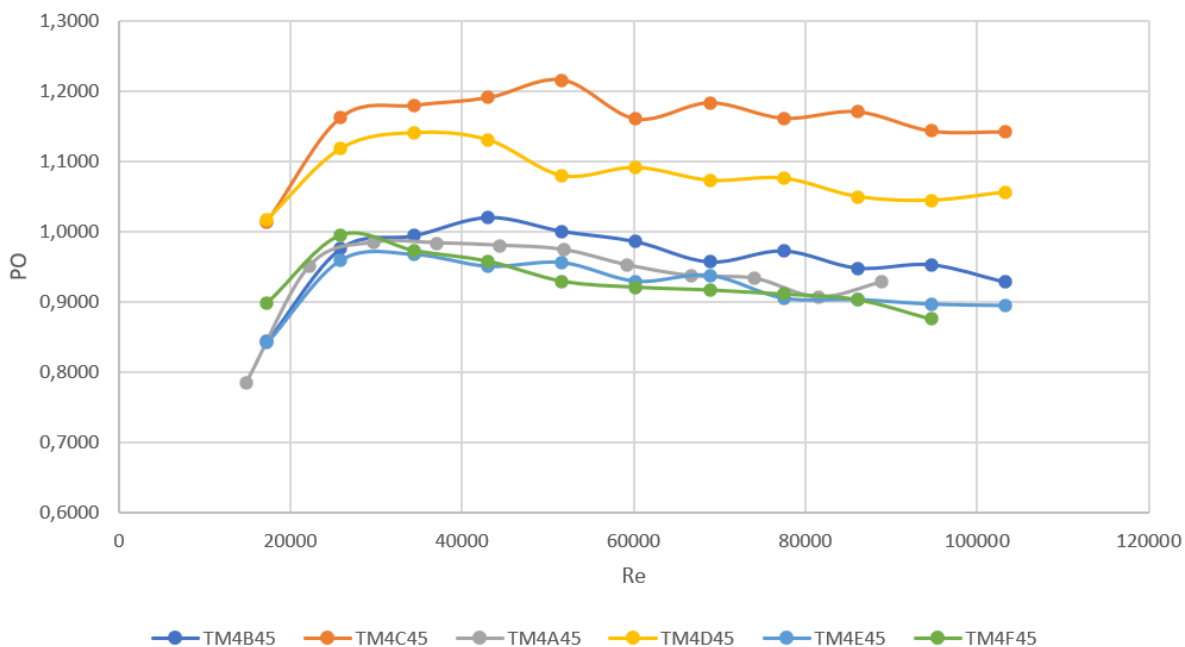
V aplikaci bez narážek lze vidět, že všechna tato míchadla dosahovala relativně podobných hodnot příkonového čísla. V případě aplikace s narážkami dosahují dvě míchadla – TM4C45 a TM4D45 vyšších hodnot, než ostatní.

P0 v aplikaci bez narážek



Obrázek 35 - příkonové charakteristiky druhé generace míchadel v aplikaci bez narážek

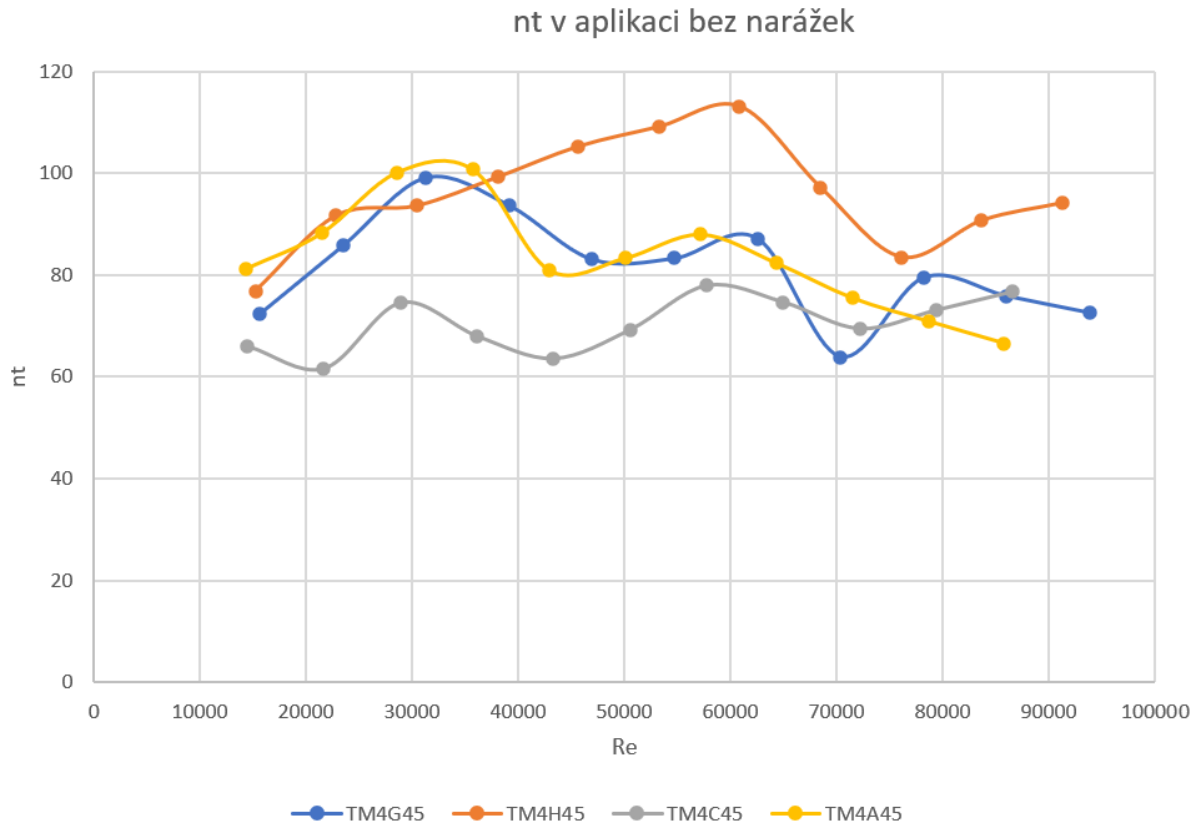
P0 v aplikaci s narážkami



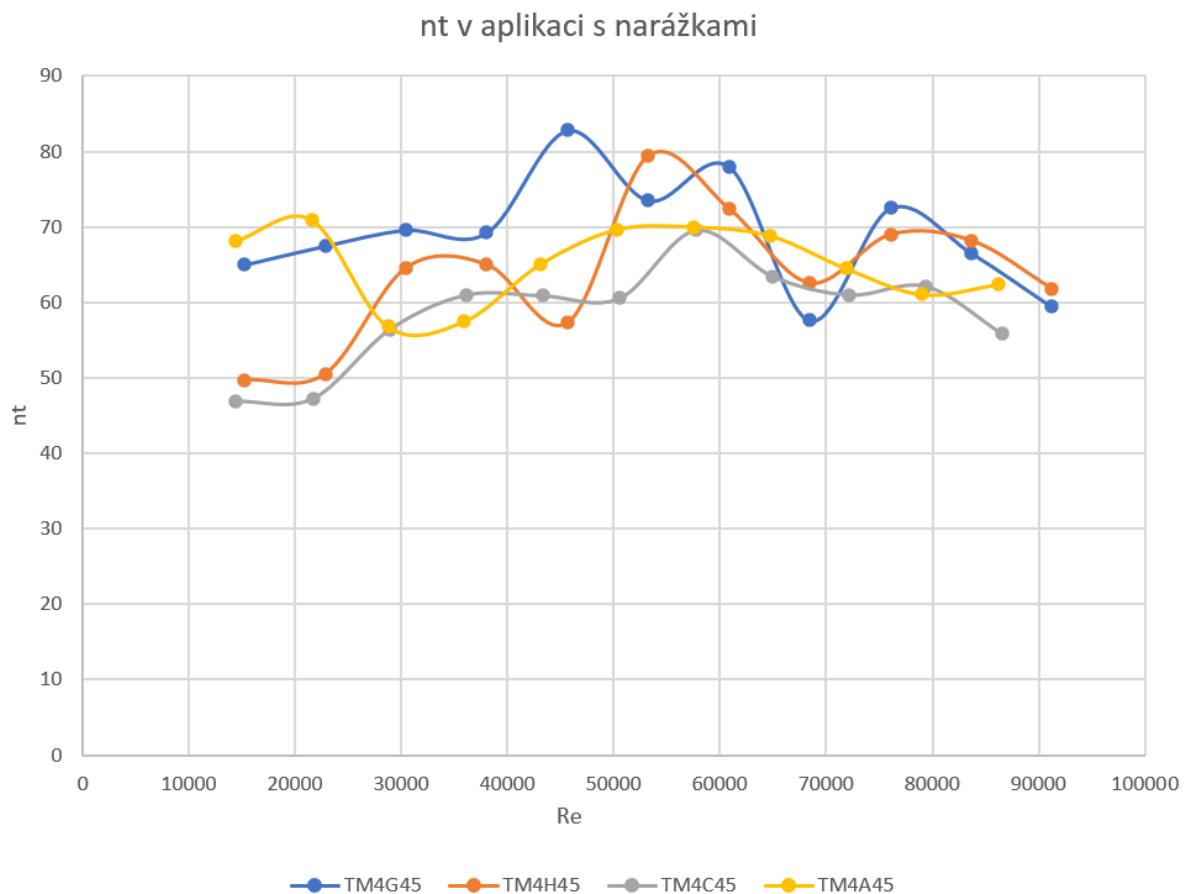
Obrázek 36 - příkonové charakteristiky druhé generace míchadel v aplikaci s narážkami

9.5 Výsledky homogenizace třetí generace míchadel

Tato míchadla vznikla modifikací míchadla TM4C45. Z výsledků vyplývá, že ani jedno nedosahuje nižších hodnot homogenizace, než právě míchadlo TM4C45.



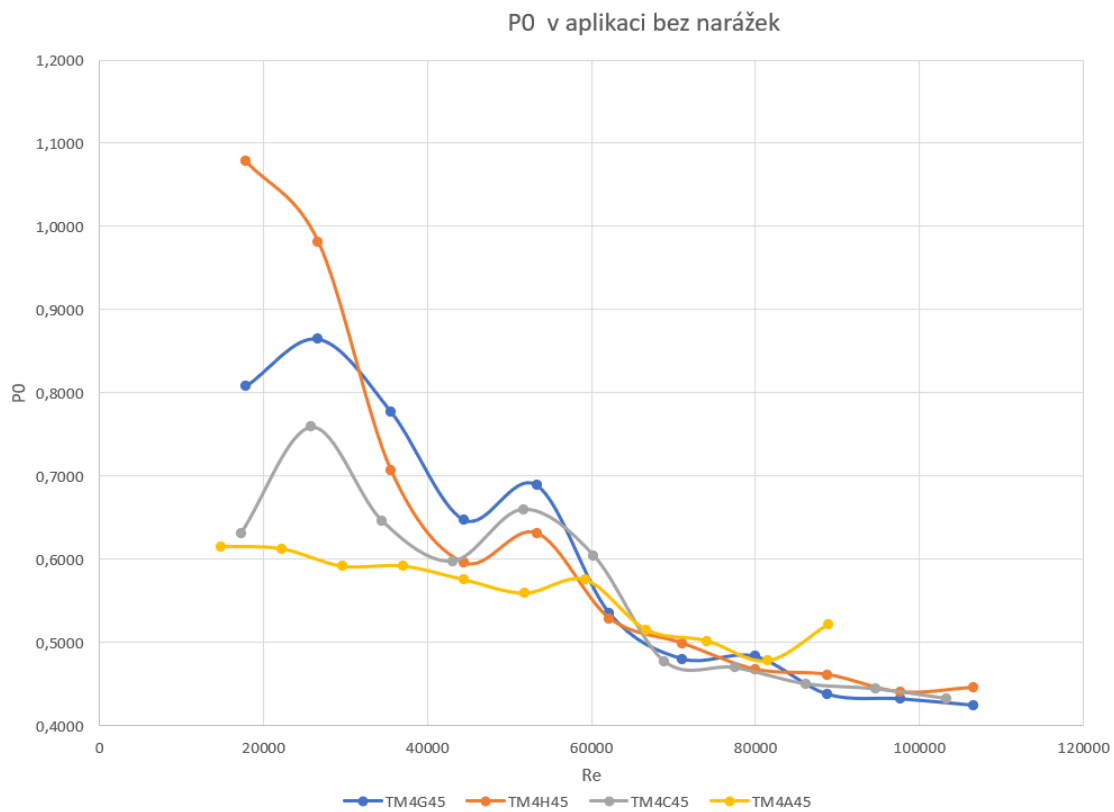
Obrázek 37 - závislost bezrozměrného času homogenizace na Reynoldsově čísle pro třetí generaci míchadel v aplikaci bez narážek



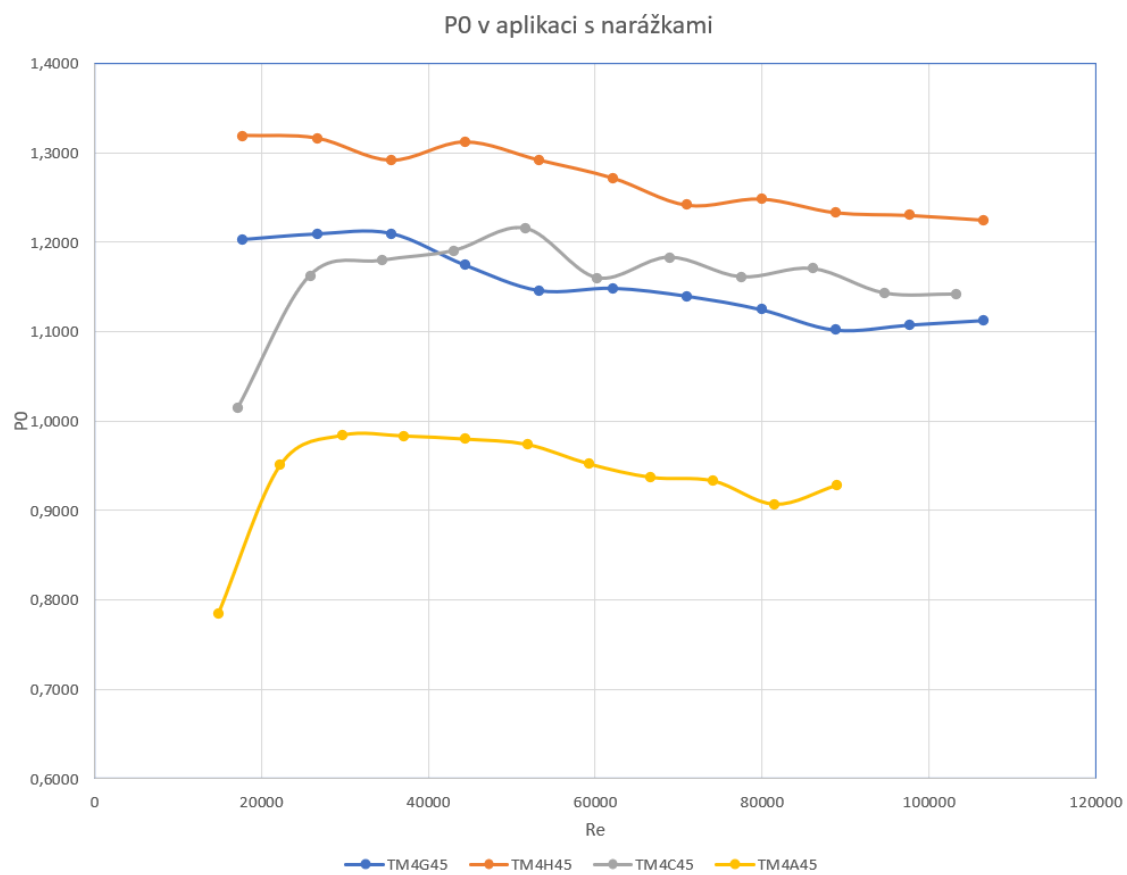
Obrázek 38 - závislost bezrozměrného času homogenizace na Reynoldsově čísle pro třetí generaci míchadel v aplikaci s narážkami

9.6 Výsledky příkonových čísel třetí generace míchadel

Při posledním měření bylo zjištěno, že daná míchadla mají prakticky shodná příkonová čísla v aplikaci bez narážek. V aplikaci s narážkami naopak můžeme pozorovat jejich výrazné odlišení.



Obrázek 39- příkonové charakteristiky třetí generace míchadel v aplikaci bez narážek



Obrázek 40 - příkonové charakteristiky třetí generace míchadel v aplikaci s narážkami

10. Diskuze výsledků měření

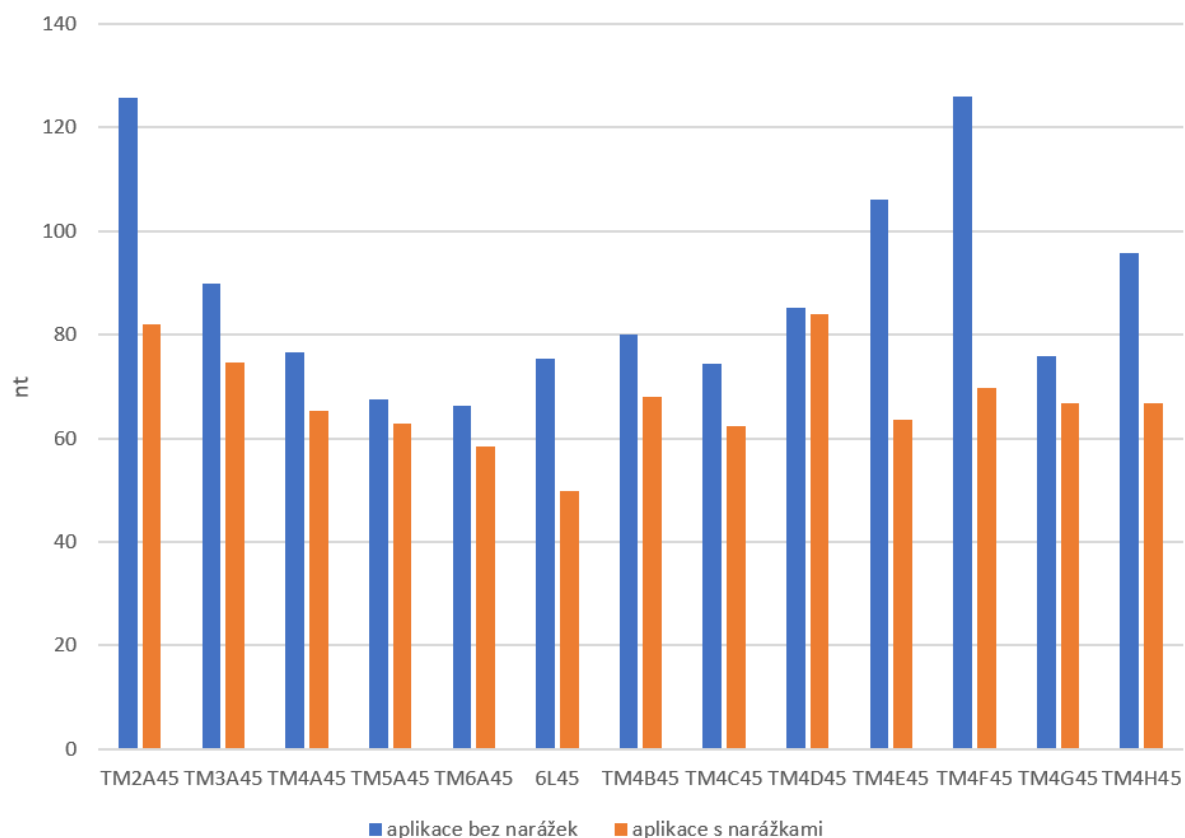
10.1 Komplikace při měření

Při měření se vyskytly komplikace dvojího druhu. V prvním případě šlo o vznik rezonančních vln. Ty vznikaly v různé míře při všech měřeních v aplikaci bez narážek. Hodnota Reynoldsova čísla se v těchto situacích typicky pohybovala mezi 40 000 až 50 000 v závislosti na míchadle. Tato situace vyžadovala řešení (viz. Způsob měření homogenizace), což mělo obvykle negativní vliv na výsledky, přesněji řečeno došlo ve většině případů ke zvýšení času homogenizace, nebo příkonového čísla. Při průmyslovém využití je tedy vhodné se rezonančním oblastem vyhnout. Hodnoty, při kterých docházelo k rezonanci, jsou v příloze označeny červeně.

Druhou komplikací bylo přisávání vzduchu. K tomu docházelo, když středový vír dosáhl úrovně míchadla. Přisávání vzduchu je nežádoucí, jelikož je velmi hlučné a může míchadlo poškodit. V příloze jsou modře vyznačeny hodnoty, při kterých se středový vír již velmi blížil k míchadlu a hrozilo tedy právě přisávání vzduchu.

10.2 Vyhodnocení homogenizačních charakteristik

Z měření homogenizačního času vyplívá několik informací. Zaprvé, Hodnota času homogenizace velmi závisí na ploše velikosti povrchu míchadla. Míchadlo s větším povrchem mělo zpravidla nižší časy homogenizace. Zadruhé, míchadla TM4E45 a TM4F45, tedy ta s ozubenou spodní stranou se ukázala jako velmi neefektivní. Jejich časy homogenizace byly velmi vysoké a navíc způsobovaly silné rezonanční vlnění. V absolutním měřítku dosáhlo nejlepších výsledků míchadlo TM6A45 v aplikaci bez narážek a míchadlo 6L45 v aplikaci s narážkami. Pro celkové zhodnocení je však nutné brát v úvahu jak čas homogenizace, tak příkonová čísla.

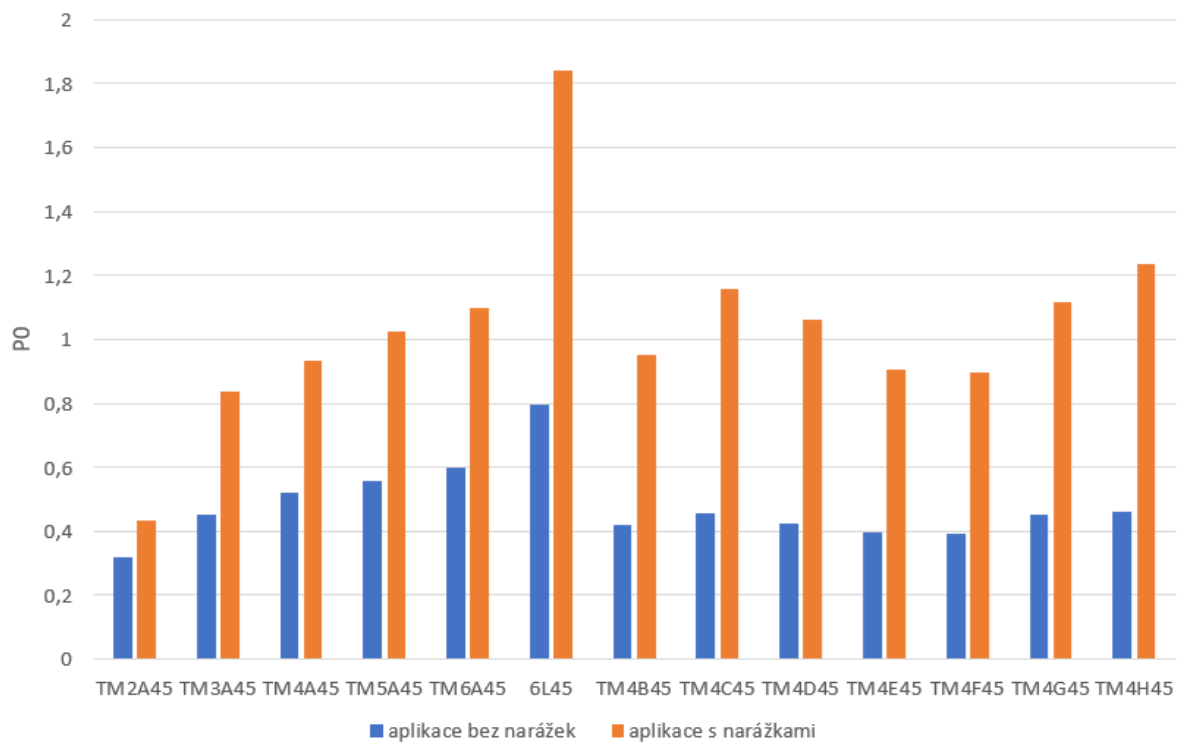


Obrázek 41 - Graf průměrných hodnot nt (průměr 5 hodnot při nejvyšších Re)

10.3 Vyhodnocení příkonových charakteristik

Stejně, jako v případě bezrozměrného času homogenizace z tohoto měření vyplívá, že naprosto zásadní vliv na příkonové číslo má plocha míchadla, avšak v tomto případě je efekt zcela opačný. Míchadla s větším povrchem měla ve většině případů i vyšší příkonová čísla. Patrně z tohoto důvodu dosáhlo nejnižších hodnot příkonového čísla míchadlo TM2A45 a to jak v aplikaci s narážkami, tak bez nich.

V oblasti nižších Re jsem místo klesajícího trendu pozoroval spíše vzrůstající trend. Předpokládám, že toto je způsobeno především nepřesností měření momentu. Při nízkých hodnotách Re je i velmi nízká naměřená hodnota momentu, ve většině případů dokonce výrazně nižší, než je jeho nejistota (viz. Příloha s výsledky). Z toho důvodu nemají tyto hodnoty příliš vypovídající hodnotu. Vzhledem k tomu, že tato míchadla jsou rychloběžná, tedy určená pro aplikaci při vysokých Re , tak to nepovažuji za problém.



Obrázek 42 - Graf průměrných hodnot příkonového čísla (průměr 5 hodnot při nejvyšších Re)

11. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout sérii toroidních míchadel, změřit jejich procesní charakteristiky a porovnat je se zavedenými míchadly. Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že toroidní vrtule byly již testovány pro využití např. u dronů, nebo jako lodní šrouby, avšak pro míchací účely zatím testovány nebyly. Celkem bylo navrženo 12 míchadel, u kterých byly změřeny příkonové a homogenizační charakteristiky.

Měření probíhalo v rozsahu 60-360 ot/min v 30 otáčkových intervalech. Všechna měření byla provedena jak pro aplikaci s narážkami, tak bez nich. Z naměřených dat a jejich následného zpracování vyplívá několik informací:

- Počet smyček, kterým je míchadlo tvořeno má zásadní vliv na procesní charakteristiky. Více smyček znamená větší plochu míchadla a následně nižší čas homogenizace, avšak vyšší příkonové číslo.
- Tvar smyček má také vliv na procesní charakteristiky, avšak je velmi těžké predikovat, jaký ten vliv je před samotným měřením, jelikož žádný vzorec nebyl nalezen. Bylo nicméně zjištěno, že ozubená hrana míchadel výrazně zvyšuje čas homogenizace a pro další testování se tedy nedoporučuje.
- Všechna toroidní míchadla dosahovala nižších příkonových čísel, než šestilopátkové míchadlo 6L45.

Nejlepšího celkového výsledku dosáhlo dle mého názoru míchadlo TM4C45, které v aplikaci bez narážek dosahovalo podobného času homogenizace, jako míchadlo 6L45, avšak s příkonovým číslem nižším přibližně o 45%.

V následující části práce byla provedena CFD simulace pro míchadlo TM4C45. Bylo zjištěno, že tvar míchadla pomáhá kapalinu usměrňovat tak, že téměř nedochází k radiálnímu výtoku z míchadla. Pomocí simulace bylo také zjištěno průtokové číslo s hodnotou 0,55.

Poslední částí práce byla statická pevnostní simulace, která srovnávala silové účinky vyvolané odporem kapaliny na míchadla TM4C45 a 6L45. Bylo zjištěno, že maximální napětí bylo v případě míchadla TM4C45 nižší přibližně o 20% a maximální průhyb dokonce o více než 60%. Lze tedy očekávat, že toroidní míchadla budou velmi dobře odolávat silovým účinkům v míchaných nádobách.

Z výsledků všech částí této práce tedy docházíme k těmto závěrům týkajících se toroidních míchadel:

- Toroidní míchadla mohou dosahovat lepších procesních charakteristik, především z hlediska potřebného příkonu. Jsou vhodná především pro aplikaci bez narážek.
- Toroidní míchadla díky své geometrii dobře odolávají silám vyvolanými odporem kapaliny v nádobě
- Primární nevýhodou těchto míchadel spočívá především v jejich výrobě, která by jistě byla výrazně nákladnější, než u jiných míchadel. Jejich komplikovaný tvar se nehodí na výrobu pomocí tváření a svařování. K výrobě je vhodné použít 3D tisk, případně odlévání.

12. Reference

- [1] F. Rieger, V. Novák, and T. Jirout, *Hydromechanické procesy II*. Praha: nakladatelství ČVUT, 2005.
- [2] T. Jirout and D. Jiroutová, “Application of theoretical and experimental findings for optimization of mixing processes and equipment,” Aug. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/PR8080955.
- [3] T. Kumaresan and J. B. Joshi, “Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 115, no. 3, pp. 173–193, Jan. 2006, doi: 10.1016/J.CEJ.2005.10.002.
- [4] J. Moravec, T. Jirout, R. Šulc, and R. Formánek, “Axial impeller with large surface blades optimized for wastewater treatment,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 193, pp. 231–244, May 2023, doi: 10.1016/J.CHERD.2023.03.027.
- [5] O. Gebouský, K. Idžakovičová, and J. Haidl, “Mixing characteristics of unbaffled bioreactor with levitating radial impeller,” *Chem Eng Sci*, vol. 276, p. 118801, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.CES.2023.118801.
- [6] N. J. Fentiman, K. C. Lee, G. R. Paul, and M. Yianneskis, “On the Trailing Vortices Around Hydrofoil Impeller Blades,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 77, no. 8, pp. 731–740, Nov. 1999, doi: 10.1205/026387699526700.
- [7] L. Blain, “Looped propellers: A noise-killing game changer in air and water,” *New Atlas*. Accessed: Jul. 19, 2024. [Online]. Available: <https://newatlas.com/aircraft/toroidal-quiet-propellers/>
- [8] T. Sebastian and C. Strem, “Toroidal Propeller,” US10836466B2, 2020 Accessed: Jul. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/other/doc/2022-09/TVO_Technology_Highlight_41_Toroidal_Propeller.pdf
- [9] “Sharrow Marine.” Accessed: Jul. 19, 2024. [Online]. Available: <https://sharrowmarine.com/>
- [10] A. King, “Emissions-free sailing is full steam ahead for ocean-going shipping,” *Horizon*, 2022. Accessed: Jul. 19, 2024. [Online]. Available: <https://projects.research-and->

innovation.ec.europa.eu/en/horizon-magazine/emissions-free-sailing-full-steam-ahead-ocean-going-shipping#linkedin

- [11] N. Bartnik, Poland. *Cooling Fan: Toroidal vs Normal*, (2023). Accessed: Jul. 19, 2024. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=MKnYFxdpcXQ&t=22s>
- [12] J. Major, USA. *I Turned MIT Award Winning Toroidal Propeller Into A PC Fan*, (2023). Accessed: Jul. 19, 2024. [Online Video]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=4ImeOKgD_Dw&t=213s
- [13] S. Bettermann, R. Stuhr, H. U. Moritz, and W. Pauer, “Customizable 3D-printed stirrers for investigation, optimization and scale-up processes of batch emulsion copolymerizations,” *Chem Eng Sci*, vol. 206, pp. 50–62, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.CES.2019.05.026.
- [14] R. Llamas-Unzueta *et al.*, “3D printed catalytic stirrers with permeable blades made of porous carbon,” *Addit Manuf*, vol. 87, p. 104233, May 2024, doi: 10.1016/J.ADDMA.2024.104233.
- [15] P. Ditl and V. Novák, “Dimenzování hřídelů míchacích zařízení,” Praha. Accessed: Jul. 19, 2024. [Online]. Available: https://users.fs.cvut.cz/tomas.jirout/vyuka/p2_hmp/dhmz.pdf

13. Seznam symbolů

ρ	Hustota	kg/m^3
t	čas	s
∇	Diferenciální operátor	$1/m$
\vec{u}	Vektor rychlosti	m/s
p	Tlak	Pa
μ	Dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
\vec{f}	Objemové síly	m/s^2
P_0	Příkonové číslo	[-]
P	Příkon	W
n	Otáčky	$1/s$
d	Průměr míchadla	m
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
t^*	Bezrozměrný čas homogenizace	[-]
t_m	Čas homogenizace	s
M	Kroutící moment	$N \cdot m$
N_{QP}	Průtokové číslo	[-]
Q_P	Čerpací výkonnost míchadla	m^3/s
F	Síla	N
b	Součinitel geometrického uspořádání	[-]