

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav procesní a zpracovatelské techniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zařízení pro míchání a homogenizaci suspenze papíroviny

(Equipment for mixing and homogenization of pulp slurry)

Autor práce: Bc. Martin Tauer

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Tauer	Jméno: Martin	Osobní číslo: 459987
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:

Zařízení pro míchání a homogenizaci suspenze papíroviny

Název diplomové práce anglicky:

Equipment for mixing and homogenization of pulp slurry

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte literární, patentovou a průmyslovou rešerši zaměřenou na míchadla a míchací systémy vhodné pro míchání vláknitých suspenzí.
2. Popište metodiku návrhu tvaru lopatek míchadel vhodných pro míchání vláknitých suspenzí např. typu papíroviny.
3. Navrhněte vlastní tvar lopatek těchto míchadel, zpracujte 3-D model míchadla s těmito lopatkami a zajistěte výrobu prototypu metodou 3-D tisku.
4. Stanovte základní procesní parametry navrženého míchadla a porovnejte je s daty dostupnými v literatuře pro standardizovaní míchadla a míchadla vhodná pro míchání vláknitých suspenzí.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce a vlastní literární, patentové a průmyslové rešerše.



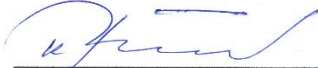
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

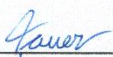
Datum zadání diplomové práce: **21.10.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2021**

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.

<u>5.1.2021</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta
--	--

Obsah

1. Úvod	8
2. Suspenze papíroviny	10
2.1 Obecná charakteristika suspenze	10
2.2 Mez toku suspenze	11
3. Návrh procesních parametrů	13
3.1 Míchání vysoce koncentrovaných suspenzí.....	13
3.2 Míchání nízko koncentrovaných suspenzí.....	14
3.3 Příkon a účinnost míchadla.....	15
4. Průmyslová a patentová řešení	17
4.1 EKATO Aquajet-B	17
4.2 Chemineer – RL-3.....	17
4.3 Techmix – TX335.....	18
4.4 Philadelphia Mixing Solutions – ARI-2	19
4.5 SPX Flow – LIGHTNIN Clean-Edge	23
4.6 Shrnutí.....	23
5. Scale-up	25
5.1 Kritéria pro vysoce koncentrované suspenze.....	25
5.2 Kritérium pro nízko koncentrované suspenze.....	26
5.3 Shrnutí.....	27
6. Metodika návrhu míchadel.....	28
6.1 Míchadlo A	28
6.2 Míchadlo B	31
7. Procesní charakteristiky navržených míchadel.....	35
7.1 Měření příkonu	35
7.1.1 Popis měření.....	35
7.1.2 Naměřené hodnoty	37
7.1.3 Vyhodnocení měření	38
7.2 Měření suspenzačních charakteristik.....	42
7.2.1 Popis měření.....	42
7.2.2 Průběh měření.....	43
7.2.3 Naměřené hodnoty	46
7.2.4 Vyhodnocení měření	46
7.3 Diskuse výsledků.....	47

8. Závěr	49
9. Seznam použitých veličin a koeficientů	51
10. Seznam použité literatury	54
11. Seznam příloh	56

Anotační list

Jméno autora:	Martin
Příjmení autora:	Tauer
Název práce česky:	Zařízení pro míchání a homogenizaci suspenze papíroviny
Název práce anglicky:	Equipment for mixing and homogenization of pulp slurry
Rozsah práce:	počet stran: 56 počet obrázků: 30 počet tabulek: 10 počet příloh: 2
Akademický rok:	2020/2021
Jazyk práce:	čeština
Ústav:	Ú 12118 – Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Strojní inženýrství – Procesní technika
Vedoucí práce:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Oponent:	
Konzultant práce:	
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ú12118

Anotace:

Hlavním cílem této práce je navrhnout a otestovat míchadla vhodná pro míchání suspenze papíroviny. Práce obsahuje teoretické informace potřebné k návrhu míchadel a procesu míchání, popis metodiky použité pro návrh experimentálních míchadel a výsledky měření s nimi provedených.

Klíčová slova: míchadlo, suspenze papíroviny, vláknitá suspenze, míchání, homogenizace

Abstract:

The main objective of this thesis is to design and to test impellers suitable for mixing of a pulp slurry. The thesis contains theoretical information necessary for design of the impeller and the mixing process, description of methodology used for designing experimental impellers and results of measurements performed with them.

Key words: impeller, pulp slurry, fibrous slurry, mixing, homogenization

Čestné prohlášení

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

V Praze dne:

.....

Martin Tauer

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Tomášovi Jiroutovi, Ph.D. za jeho čas, ochotu, trpělivost a všechny odborné rady udělené při psaní této diplomové práce a při průběhu její praktické části. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Moravcovi, Ph.D., Ing. Stanislavu Solnařovi a Ing. Martinovi Dostálovi, Ph.D. za přípravu zařízení pro praktickou část diplomové práce. Také bych rád poděkoval své rodině a blízkým za jejich podporu.

1. Úvod

Tato práce se zabývá návrhem míchadel vhodných pro přípravu suspenze papíroviny. Suspenze je tvořena odpadním papírem nebo kartonem, který je mícháním rozvlákněn ve vodě. Takto vzniklá suspenze se používá k tvarování a lisování nových výrobků.

Vláknité látky vytváří komplikované reologické a provozní podmínky při míchání suspenzí. Již u nízko koncentrovaných suspenzí dochází k namotávání vláken na míchadlo. Při míchání vysoce koncentrovaných neneutonských suspenzí dochází nejen k namotávání vláken, ale také ke vzniku tzv. kaverny, kterou je potřeba rozšířit po celém objemu míchané nádoby. Namotaná vlákna změň geometrii míchadla a způsobí pokles čerpacího účinku. Pokud míchadlo dostatečně nečerpá, nelze zajistit vnos vsádky, dostatečnou cirkulaci suspenze, a ani potřebné rozšíření kaverny. Pro správný průběh míchání vláknitých suspenzí je nezbytné zvolit nebo navrhnout vhodný typ míchadla se zakřiveným tvarem lopatek. Hydrodynamické chování suspenze nejvíce ovlivňují tyto parametry: [1]

1. Fyzikální vlastnosti kapaliny:
 - a) hustota, rozdíl hustot kapaliny a pevné látky
 - b) viskozita
2. Fyzikální vlastnosti pevné látky:
 - a) hustota
 - b) velikost a tvar částic
 - c) smáčivost
 - d) tendence vytvářet svazky, soudržnost svazků
 - e) pevnost a tvrdost
3. Provozní podmínky procesu:
 - a) hmotnostní a objemová koncentrace pevných látek v kapalině
 - b) přítomnost plynu
 - c) otáčky a příkon míchadla
 - d) reologické vlastnosti suspenze

4. Geometrické parametry
 - a) průměr nádoby a tvar dna
 - b) typ, geometrie a průměr míchadla
 - c) vzdálenost míchadla ode dna nádoby
 - d) výška hladiny kapaliny
 - e) tvar a počet narážek

2. Suspenze papíroviny

2.1 Obecná charakteristika suspenze

Suspenzi papíroviny obvykle tvoří voda a množství vláknitých složek. Vlivem sil tvoří vlákna v suspenzích souvislé svazky se značnou mechanickou pevností. Tuto pevnost je nutné vnějšími silami překonat, aby bylo možné suspenzi míchat nebo čerpat. [1]

Pro charakterizaci suspenze papíroviny se používají dva základní parametry. Prvním je hmotnostní koncentrace, která specifikuje množství vláken ve vodě a vypočítá se z rovnice: [1]

$$c_m = \frac{m_s}{m_s + m_l} \quad (1)$$

kde m_s je hmotnost vláken a m_l hmotnost vody. Se změnou hmotnostní koncentrace se prudce mění reologické vlastnosti suspenze. Suspenze se dělí na nízko koncentrované ($c_m \leq 0,20$) a vysoce koncentrované ($c_m > 0,20$).

Druhým parametrem je objemová koncentrace, která lépe popisuje chování suspenze, ale složitěji se počítá. Vlákna papíroviny jsou dutá a dutina (lumen) mění svůj objem v závislosti na mechanickém a chemickém zpracování. Stěna buňky vlákna absorbuje značné množství vody, což způsobuje bobtnání a nárůst objemu. Pro přesné určení objemové koncentrace by bylo vhodné znát alespoň dva další parametry: množství absorbované vody stěnou buňky (X_{st}) a objem lumenu vlákna. Množství absorbované vody ve stěně je možné zjistit např. určením bodu nasycení vlákna nebo extrakcí vody pomocí odstředivky. Těmito testy bylo v minulosti zjištěno obvyklé množství vody v papírovině, které se pohybuje od 0,8 do 2 kg vody na 1 kg vláken. Měření lumenu vlákna je komplikovaný proces. Pokud byla suspenze papíroviny před určováním objemové koncentrace odbarvena nebo bělena, lze předpokládat, že se vlákna vlivem tohoto zpracování smrskla, a objem lumenu je zanedbatelný. Pro nízko koncentrované suspenze, kde se množství plynu v suspenzi zanedbává, platí pro výpočet objemové koncentrace rovnice: [1]

$$c_v = \frac{1 + X_{st} \left(\frac{\rho_s}{\rho_{st}} \right)}{1 + \left(\frac{1 - c_m}{c_m} \right) \frac{\rho_s}{\rho_{st}}} \quad (2)$$

kde ρ_{st} je hustota celulózové stěny vlákna. Vysoce koncentrované suspenze obsahují obvykle značné množství plynu. Pokud je známá celková hustota suspenze (ρ_{su}), platí pro objemovou koncentraci rovnice: [1]

$$c_v = c_m \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{X_{st}}{\rho_{st}} \right) \rho_{su} \quad (3)$$

Hustotu suspenze je možné pro $c_v < 10 \%$ vypočítat ze vztahu: [2]

$$\rho_{su} = c_v \rho_s + (1 - c_v) \rho_l \quad (4)$$

2.2 Mez toku suspenze

Suspenze papíroviny nebývají rovnoměrné. Vlákna tvoří svazky i v nízko koncentrovaných suspenzích a je nutné je pro různé procesy zpracování papíroviny překonáním meze toku narušit a rozptýlit. Mez toku suspenze se zvětšuje s rostoucí koncentrací. Pro určení meze toku jako funkce hmotnostní koncentrace lze použít korelaci: [1]

$$\tau_y = 7,7 \cdot 10^5 c_m^{3,2} (1 - \phi_g)^{3,4} Z^{0,6} \quad (5)$$

kde ϕ_g představuje koncentraci plynu v suspenzi a Z poměr délky a tloušťky vláken. Mez toku musí být zohledněna při návrhu míchadla, aby při míchání nedošlo ke vzniku mrtvých zón. Při míchání koncentrované papíroviny vzniká kolem míchadla kaverna. Tento jev způsobí cirkulaci suspenze pouze v okolí míchadla, a ne na hranici kaverny. Průměr kaverny musí být roven průměru míchané nádoby, aby došlo k cirkulaci v celém objemu. Z následující rovnice lze vypočítat poloměr kaverny: [1]

$$r_c = \sqrt{\frac{M_k}{2\pi\tau_y r}} \quad (6)$$

kde M_k je krouticí moment a r poloměr míchadla.

Solomon (1981) uvažuje sférický tvar a tangenciální působení míchadla na hranici kaverny. Průměr kaverny D_c poté lze vyjádřit ze vztahu: [3]

$$\left(\frac{D_c}{d}\right)^3 = \left(\frac{4}{\pi^3}\right) P_o \left(\frac{\rho n^2 d^2}{\tau_y}\right) \quad (7)$$

kde P_o představuje příkonové číslo, n otáčky míchadla a d průměr míchadla.

Pro zachování cirkulace suspenze při míchání je nutné nepřetržitě narušovat svazky vláken, aby se suspenze chovala jako kapalná látka. To vyžaduje stálé působení síly k tomu dostatečné i s ohledem na disipaci energie v procesu. Dosažení těchto podmínek je možné při zachování turbulentního proudění.

Vzhledem k síle svazků vláken v suspenzi neroste krouticí moment souběžně s rychlostí otáčení míchadla. Krouticí moment je vysoký při uvádění míchadla do pohybu. Jakmile je překonána mez toku, dojde k značnému poklesu krouticího momentu a svazky vláken jsou postupně strhávány do proudu. Krouticí moment opět roste s nabývajícím množstvím svazků v pohybu. Oblast proudění se postupně rozšiřuje od míchadla. Při dosažení stěny míchané nádoby dochází k přechodu do turbulentního režimu proudění. V tomto momentě dojde k překonání meze toku v celé suspenzi, která je celá v pohybu. [1]

Přechod do turbulentního proudění se označuje jako počátek fluidizace. Pro určení množství měrné disipované energie (ε_F) v tomto momentě byla zavedena korelace: [1]

$$\varepsilon_F = 4,1 \cdot 10^9 c_m \left(\frac{d}{T}\right)^{2,3} \quad (8)$$

kde T je průměr míchané nádoby.

3. Návrh procesních parametrů

3.1 Míchání vysoce koncentrovaných suspenzí

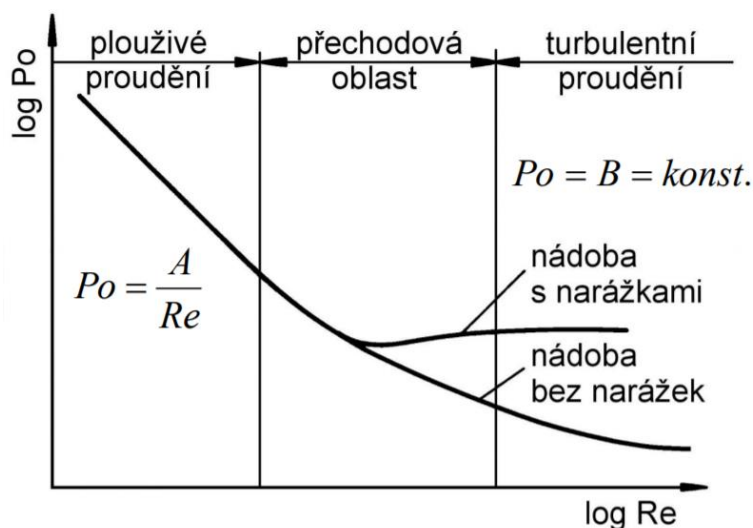
Pro míchání vysoce koncentrovaných suspenzí je nutné stanovit takové otáčky míchadla, při kterých se vzniklá kaverna rozšíří do celého objemu míchané nádoby. Za předpokladu stejného rozměru kaverny a míchané nádoby je možné ze vztahů pro určení rozměrů kaverny stanovit otáčky. Z rovnice (6) pro poloměr kaverny je tedy možné vyjádřit otáčky:

$$r_c = \sqrt{\frac{M_k}{2\pi\tau_y r}} = \sqrt{\frac{P}{4\pi^2 n \tau_y r}} \rightarrow n = \frac{P}{4r_c^2 \pi^2 \tau_y r} \quad (9)$$

Vyjádření otáček z rovnice (7) pro průměr kaverny:

$$\left(\frac{D_c}{d}\right)^3 = \left(\frac{4}{\pi^3}\right) P_o \left(\frac{\rho n^2 d^2}{\tau_y}\right) \rightarrow n = \sqrt{\frac{D_c^3 \pi^3 \tau_y}{4 P_o \rho d^5}} \quad (10)$$

Otáčky je možné také stanovit z příkonové charakteristiky míchadla, kterou obvykle dodává výrobce. Jedná se o závislost příkonového a Reynoldsova čísla míchadla. Typický průběh této charakteristiky lze vidět na obrázku 1.



Obr. 1: Typický průběh příkonové charakteristiky míchadla [2]

Tento postup je možné použít, pokud známe měrný příkon míchadla [W/m^3], ze kterého po vynásobení objemem získáme příkon. Poté je nutné zjistit Reynoldsovo číslo pro mocninou látku, které lze stanovit pomocí Metzner-Ottovy korelace: [4]

$$Re_m = \frac{nd^2\rho}{\mu_{ef}} \quad (11)$$

kde μ_{ef} představuje efektivní viskozitu látky, pro kterou platí: [4]

$$\mu_{ef} = K\dot{\gamma}_{ef}^{m-1} = K(k \cdot n)^{m-1} \quad (12)$$

kde K je Metzner-Ottův koeficient a m index toku, které závisí na míchané látce. Koeficient k je závislý na míchadle a lze ho pro určité typy najít v tabulkách. Po určení Reynoldsova čísla je možné z příkonové charakteristiky odečíst příkonové číslo a z něj poté určit otáčky.

3.2 Míchání nízko koncentrovaných suspenzí

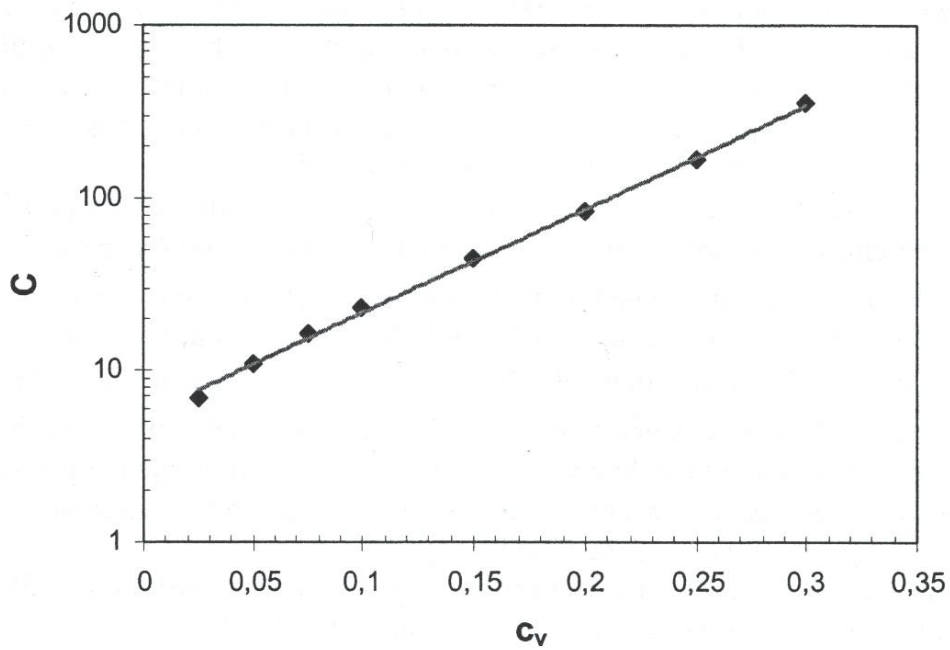
Pro míchání nízko koncentrovaných suspenzí je nutné zvolit takové otáčky, při kterých se pevné částice dostanou do vzhledu. Tyto otáčky se nazývají kritické a jejich stanovení je možné pomocí modifikovaného Froudeho čísla, získaného inspekční analýzou: [2]

$$Fr' = \frac{\rho_{su}n_{cr}^2d}{g(\rho_s - \rho_l)} \rightarrow n_{cr} = \sqrt{\frac{Fr'g(\rho_s - \rho_l)}{\rho_{su}d}} \quad (13)$$

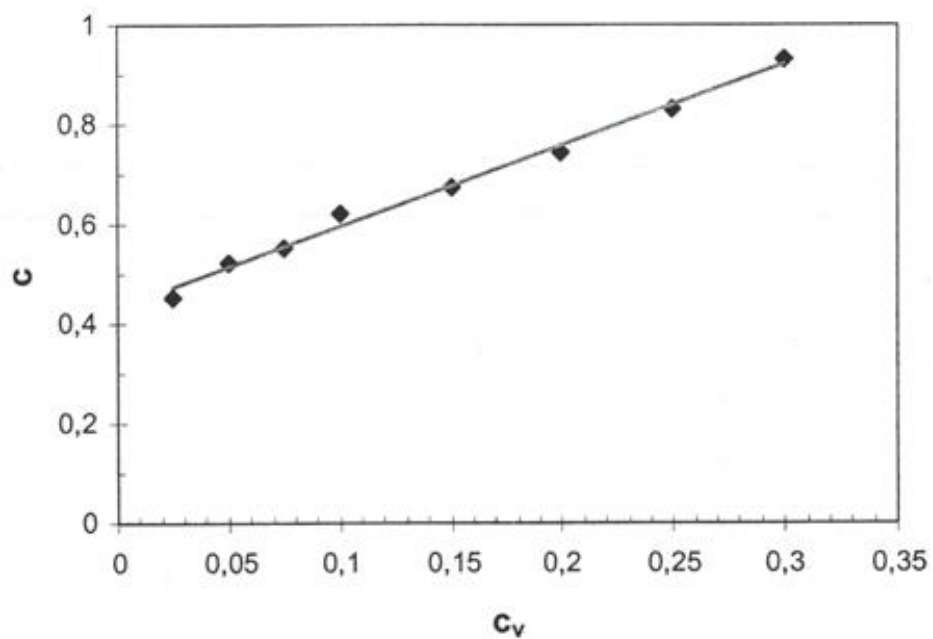
Obecně platí pro suspenzi o objemové koncentraci částic c_v : [2]

$$Fr' = C \left(\frac{D}{T}\right)^c \quad (14)$$

kde D je průměr pevné částice. Koeficient C a exponent c závisí na relativní velikosti a koncentraci částic. Na obrázcích 2 a 3 jsou vyobrazeny obvyklé tvary závislostí C a c na objemové koncentraci.



Obr. 2: Závislost koeficientu C na objemové koncentraci částic [2]



Obr. 3: Závislost exponentu c na objemové koncentraci částic pro relativně malé částice [2]

3.3 Příkon a účinnost míchadla

Příkonové číslo představuje bezrozměrný příkon na hřídeli míchadla. Příkonové číslo míchadla lze vypočítat z rovnice: [4]

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

Pro turbulentní oblast proudění je příkonové číslo konstantní.

Průtokové číslo představuje bezrozměrnou čerpací výkonnost míchadla (Q_p) a je vypočteno z rovnice: [5]

$$N_{QP} = \frac{Q_p}{nd^3} \quad (16)$$

Při míchání vysoce koncentrovaných suspenzí je nutné dosáhnout potřebného čerpacího účinku, a tím cirkulace vsádky v celém objemu. Bezrozměrnou energii potřebnou pro dosažení těchto podmínek vyjadřuje energetická (cirkulační) účinnost, pro kterou platí vztah: [5]

$$E = \frac{N_{QP}^3}{P_o} \quad (17)$$

U nízko koncentrovaných suspenzí je možné vyjádřit účinnost jako bezrozměrnou spotřebu energie potřebnou pro vnos pevných částic. Pro suspenzační účinnost platí vztah: [6]

$$\pi_s = \frac{P}{\rho_{su}} \left(\frac{\rho_l}{g(\rho_s - \rho_l)} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{T} \right)^{\frac{7}{2}} = P_o (Fr')^{\frac{3}{2}} \left(\frac{d}{T} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (18)$$

4. Průmyslová a patentová rešerše

Výrobci míchadel zmíněných v této kapitole je uvádí jako vhodná pro míchání vláknitých suspenzí. Kapitola obsahuje stručný popis míchadel a zhodnocení jejich využitelnosti pro míchání suspenze papíroviny.

4.1 EKATO Aquajet-B

Míchadlo Aquajet-B od firmy EKATO se využívá např. pro homogenizaci biomasy, vláken polymerů a potravin obsahující dlouhá vlákna. [7]



Obr. 4: Míchadlo EKATO Aquajet-B [7]

Tvar míchadla Aquajet-B odpovídá předpokladům pro míchání vláknité suspenze papíroviny. Sklon lopatek by měl zajistit sklouzávání vláken papíroviny po čelní hraně, a tím bránit jejich namotávání. Značnou výhodou míchadla je snadná vyrobitelnost lopatek. Jedná se pouze o ohnutí obdélníkového plechu ve dvou směrech, mírnou úpravu tvarů hran a následné přivaření k náboji pod úhlem. Díky těmto faktorům je míchadlo velice vhodnou volbou pro míchání suspenze papíroviny.

4.2 Chemineer – RL-3

Firma Chemineer uvádí, že se míchadlo RL-3 používá např. v papírenském průmyslu nebo při čištění odpadních vod. [8]

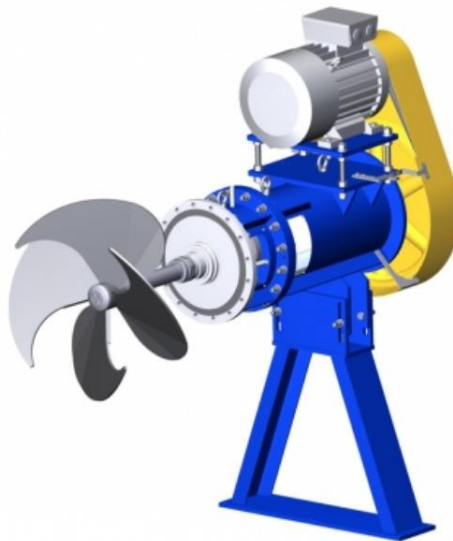


Obr. 5: Míchadlo Chemineer RL-3 [8]

Zahnutý tvar čelní hrany míchadla RL-3 by měl umožnit sklouzávání vláken. Nicméně uspořádání a tvar zbylých částí lopatek tvoří na míchadle množství ostrých záhybů, ve kterých hrozí zachytávání vláken a jejich postupná akumulace. Z tohoto důvodu RL-3 nepůsobí jako vhodná volba pro míchání suspenze papíroviny.

4.3 Techmix – TX335

Míchadlo TX335 od firmy Techmix se používá především pro směšování, míchání a homogenizaci viskózních a vláknitých suspenzí. Firma Techmix publikuje články o míchání suspenzí, které prokazují, že míchadlo TX335 dosahuje lepších výsledků, než např. standardní netvarované šestilopátkové míchadlo. [9]



Obr. 6: Míchadlo Techmix TX335 [10]

Lopatky mají čelní hranu ve tvaru kružnice o průměru shodném s průměrem míchadla. Lopatky jsou k náboji upevněny pod úhlem 60° od osy rotace míchadla. Čelní hrana lopatky je tvarově shodná s její koncovou hranou a je mírně zalomena tak, aby náběhový úhel lopatky vůči rovině rotace byl menší než úhel upevnění lopatky k náboji vzhledem ke stejné rovině. [11]

Lopatky míchadla TX335 mají vhodný tvar, který by měl bránit namotávání vláken. Přejíždění tvar lopatek znamená složitější výrobu než např. u míchadla EKATO Aquajet-B. Pro míchání suspenze papíroviny je vhodnou volbou.

4.4 Philadelphia Mixing Solutions – ARI-2

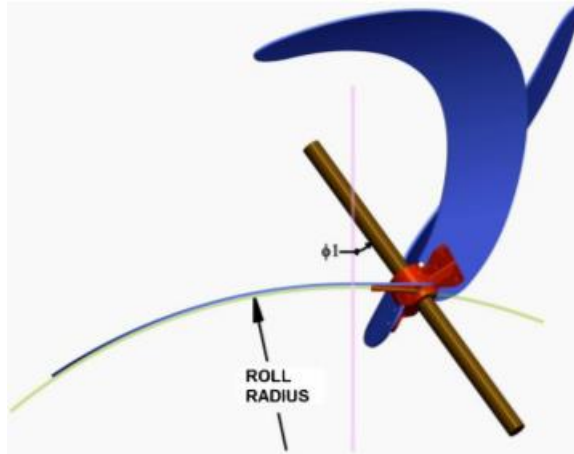
Pro optimalizaci anoxické denitrifikace vyvinula firma Philadelphia Mixing Solutions v roce 2011 míchadlo ARI-2 z nerezové oceli. Následně firma zhodnotila jeho vlastnosti ve srovnání s obdobným míchadlem předchozí generace a dalšími třemi obecně využívanými míchadly. Míchadlo ARI-2 se využívá např. pro homogenizaci odpadních vod, kalů a jiných vláknitých suspenzí. [5]



Obr. 7: Míchadlo ARI-2 [12]

Nové míchadlo bylo vytvořeno za účelem zlepšení poměru ceny a výkonu v oblasti anoxické denitrifikace a je možné jej využít i pro aerobní/anaerobní trávení. Suspenze v těchto procesech obsahují značné množství vlasů, kusů textilu a papírových vláken, které nebyly zachyceny při předchozí filtraci. Při běhu míchadla je suspenze čerpána v axiálním směru ke dnu nádoby a lopatky se otáčejí po směru hodinových ručiček při pohledu shora. Profil

a zahnutí míchadla byly zvoleny za účelem zamezení namotávání vláken. Návrhová studie brala v úvahu devět teoretických modelů míchadel s různým úhlem orientace lopatek a poloměrem odvalu: [5]



Obr. 8: Pohled na lopatku míchadla ARI-2 kolmý k ose odvalu a úhel orientace lopatky ϕ_1 [5]

Parametrem pro návrh byl zvolen poměr stoupání a vnějšího průměru míchadla (PDR). Následně byl v 3D modelech změřen úhel špičky lopatky (θ_T) v osmi rovnoměrně rozmístěných bodech, každý na jiném poloměru (r_i). Tyto úhly byly převedeny na ekvivalentní stoupání ($pitch$) pomocí rovnice: [5]

$$Pitch_i = (2\pi r_i) \tan(\theta_{Ti}) \quad (19)$$

Pro každý poloměr byl poměr PDR vypočítán z rovnice: [5]

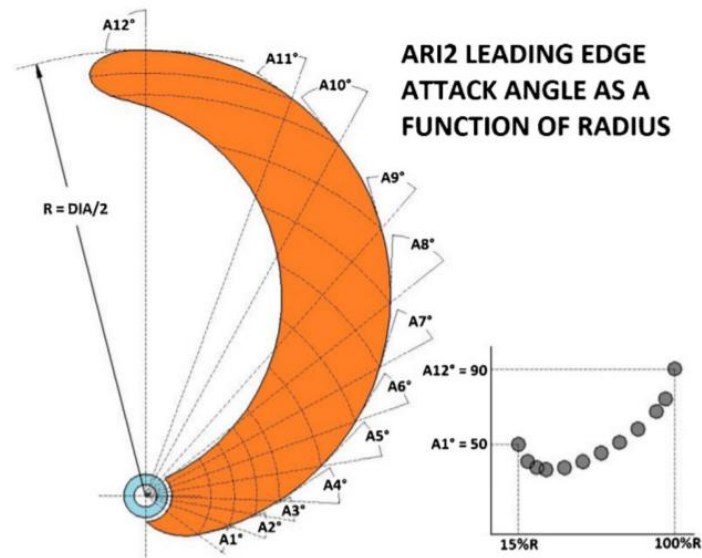
$$PDR_i = \frac{Pitch_i}{d} \quad (20)$$

Pro všech devět míchadel byla vypočtena maximální a minimální hodnota PDR , z nichž byl vypočten optimalizační parametr ΔPDR : [5]

$$\Delta PDR_i = \max(PDR_i) - \min(PDR_i) \quad (21)$$

Na základě výsledků této rovnice byl zvolen model s nejmenší hodnotou ΔPDR . Průměrná hodnota PDR_i byla použita jako návrhový parametr pro míchadlo ARI-2.

U míchadel s axiálním čerpacím účinkem závisí přilnavost vláken v suspenzi k míchadlu na několika faktorech. Jedná se o tlak kapaliny působící na vlákno (p), součinitel statického tření mezi vláknem a lopatkou (μ_b) a náběhový úhel čelní hrany lopatky (A). Obrázek 9 obsahuje vyobrazení závislosti úhlu A na poloměru lopatky. [5]



Obr. 9: Závislost úhlu A na poloměru lopatky ARI-2 [5]

V každém místě čelní hrany lopatky působí odlišný tlak p , a v každém z těchto míst je možné definovat kritický úhel sklouznutí vláken (CSA). Pokud je úhel A v daném místě menší než CSA , budou se zde vlákna namotávat a pokud větší, budou sklouzávat. Tlak kapaliny působící na čelní hranu v místě určeném poloměrem lze vypočítat ze vztahu: [5]

$$p = C_p r^2 \quad (22)$$

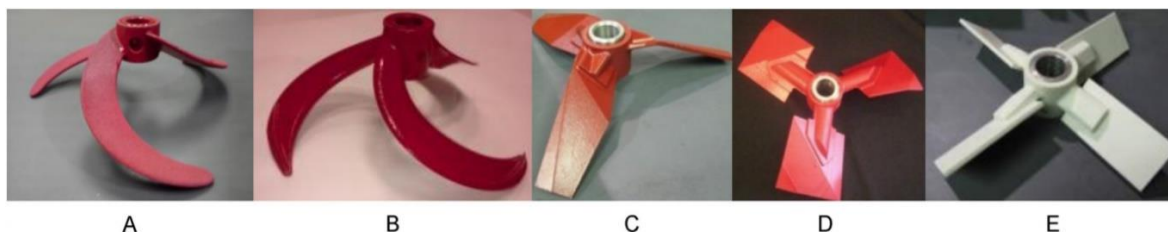
kde C_p je konstanta, která je funkcí otáček, hustoty a příkonového čísla míchadla. Součinitel tření je téměř konstantní podél celé čelní hrany. Velikost úhlu CSA roste exponenciálně od vnitřní části lopatky ke vnější. Míchadlo ARI-2 je navrženo tak, aby v každém místě čelní hrany lopatky byl úhel A větší než úhel CSA .

Hodnocení výkonu míchadla

Míchadlo bylo testováno v laboratorním měřítku a porovnáno se čtyřmi dalšími míchadly. Důležitými hodnotícími faktory jsou bezrozměrné příkonové (P_o) a průtokové číslo (N_{QP}), které jsou funkcí Reynoldsova čísla. Tato dvě bezrozměrná kritéria je možné využít pro vyhodnocení účinnosti míchadla. Posledním hodnotícím kritériem v experimentu byl poměr čerpací výkonnosti míchadla vůči příkonu potřebnému k jejímu dosažení: [5]

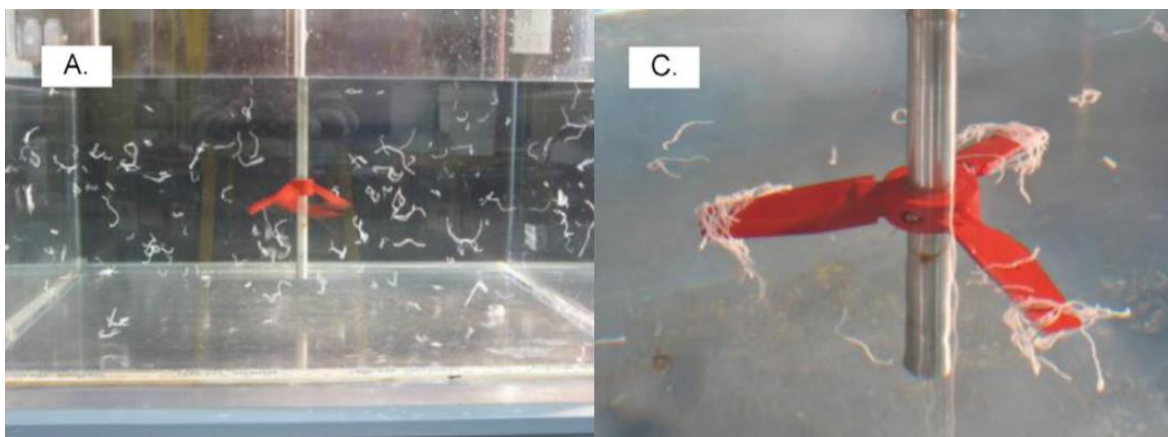
$$\frac{Q_P}{P} = \frac{N_{QP} n d^3}{P_o \rho n^3 d^5} = \frac{N_{QP}}{P_o} \left(\frac{1}{\rho n^2 d^2} \right) \quad (23)$$

Na obrázku 10 jsou vidět míchadla testovaná v experimentu společně s ARI-2 (A). Míchadlo s označením B na obrázku 10 je předchozí generací míchadel pro vláknité suspenze. Míchadla byla testována za stejných podmínek a mají stejný vnější průměr.



Obr. 10: Míchadla použitá při experimentu [5]

Experiment ukázal, že míchadlo ARI-2 dosahuje nejvyššího poměru čerpací výkonnosti ku potřebnému příkonu za nejnižšího průtokového a příkonového čísla. Účinnost byla srovnatelná s ostatními míchadly. Podle experimentu představuje nejvhodnější volbu pro anoxickou denitrifikaci, která vyžaduje jemné míchání za nízké spotřeby energie. Nejdůležitější předností ARI-2 je nulové namotávání vláken v suspenzi na lopatky. Na obrázku 11 je vidět srovnání množství namotaných vláken na ARI-2 a míchadlo C z obrázku 10. [5]



Obr. 11: Srovnání míchadla ARI-2 (A) s míchadlem C [5]

Autoři patentu míchadla ARI-2 uvádí pro konstrukci následující doporučení: [13]

- poloměr odvalu = $(0,375 \div 1,25) \cdot d$
- poměr stoupání a průměru míchadla = $0,2 \div 5,0$
- maximální šířka lopatky míchadla = $(0,025 \div 0,01) \cdot d$

Tvar míchadla ARI-2 umožňuje dosažení dobrých výsledků při míchání vláknitých suspenzí. Lopatky jsou vhodně navrženy, protože v každém bodě čelní hrany je úhel větší než kritický úhel sklouznutí vláken. ARI-2 by tedy mělo při míchání suspenze papíroviny pracovat bez namotávání vláken. Jeho tvarová složitost ale představuje i nevýhodu, a tou je komplikovaná výroba.

Informace o tomto experimentu byly využity jako doporučení k návrhu jednoho z míchadel pro experiment v této diplomové práci.

4.5 SPX Flow – LIGHTNIN Clean-Edge

Míchadlo Lightnin Clean-Edge od firmy SPX Flow se využívá v průmyslu čištění odpadních vod. [14]



Obr. 12: Míchadlo SPX Flow LIGHTNIN Clean-Edge [14]

Autor článku [14] prezentuje míchadlo jako vhodné pro míchání vláknitých suspenzí. Nicméně tvar míchadla působí velice nevhodně pro míchání suspenze papíroviny. Nevhodné jsou ostré záhyby, které napomáhají namotávání vláken. Další nevýhodou je obtížnost výroby.

4.6 Shrnutí

Cílem této kapitoly bylo zhodnotit míchadla prezentovaná výrobcem jako vhodná pro míchání vláknitých suspenzí. Mezi vhodné typy míchadel patří míchadla TX335, ARI-2 a Aquajet-B. Model Aquajet-B je vhodnou volbou pro konvenční výrobu a zároveň by měl dosahovat dobrých výsledků. Modely TX335 a ARI-2 by svým složitějším tvarem měly zajistit lepší

výsledky za cenu nákladnější výroby. Volba míchadla závisí především na vlastnostech suspenze a provozních podmínkách.

Míchadla pro míchání vláknitých suspenzí musí splňovat následující kritéria:

- plynulý zaoblený tvar lopatek, oblouk zahnutý proti směru rotace
- zahnutí lopatky směrem od náboje směrem ke dnu nádoby
- hladké lopatky se zaoblenými hranami
- úhel čelní hrany větší než kritický úhel sklouznutí vláken
- absence záhybů, které způsobují akumulaci vláken
- dostatečný čerpací účinek za co nejmenšího příkonu
- čerpání směrem ke dnu nádoby

5. Scale-up

Úkolem scale-upu je převedení fungujícího návrhu v laboratorním měřítku do průmyslového měřítku při zachování kvality procesu. Smyková rychlost a disipace energie rostou se zvětšováním objemu nádoby, a proto je nutné návrh přizpůsobit. Scale-up je možné založit na geometrické podobnosti a podobnosti fyzikálních jevů. Tato kapitola je věnována kritériím pro scale-up použitelných pro míchání suspenze papíroviny bez přenosu tepla.

Postup při scale-upu míchání směsi kapalina-pevná látka lze rozdělit do následujících kroků: [1]

1. Definice požadovaného výsledku procesu, např. stupně homogenity suspenze.
2. Vypracování nebo vyhledání vhodných korelací popisujících proces, návrh míchadla a provozních proměnných, a to na základě literatury nebo experimentu.
3. Určení klíčových fyzikálně-chemických jevů a souvisejících korelačních parametrů, nejlépe v bezrozměrné formě.
4. Použití korelací k přesnému odhadu funkce procesu v různých měřících.

5.1 Kritéria pro vysoce koncentrované suspenze

Následující kritéria pro scale-up jsou založená na předpokladu, že je zachována geometrická podobnost.

Konstantní relativní průměr kaverny

Kaverna a rovnice pro výpočet jejího rozměru jsou popsány v kapitole 2.2 (rovnice (6) a (7)). Kritérium je vhodné pro vysoce koncentrované suspenze a platí pro něj rovnice: [15]

$$\frac{D_c}{T} = konst. \quad (24)$$

Průměr kaverny je možné zvětšit navýšením otáček nebo zvětšením průměru míchadla. Pro koncentrovanou suspenzi papíroviny je vznik kaverny obvyklý a při jejím míchání je žádoucí, aby byl průměr kaverny roven průměru nádoby. Kritérium je tedy vhodné pro scale-up tohoto procesu.

Konstantní obvodová rychlost špičky míchadla

Rovnice pro výpočet obvodové rychlosti špičky míchadla: [15]

$$\omega_t = \pi n d = konst. \quad (25)$$

Toto kritérium se využívá především v případě, kdy je kladen důraz na rovnoměrnou distribuci pevných částic v kapalině.

Konstantní měrný krouticí moment

Pro toto kritérium platí: [15]

$$\frac{M_k}{V} = konst. \quad (26)$$

Kritérium je často používané pro návrh podmínek pro pohon míchacího zařízení, protože se přímo vztahuje k rozměrovým a pevnostním charakteristikám. Pro návrh procesních parametrů jej není vhodné použít.

Konstantní měrný příkon

Pro toto kritérium platí: [15]

$$\frac{P}{V} = konst. \quad (27)$$

Kritérium konstantního měrného příkonu patří mezi nejpoužívanější v průmyslu, protože je aplikovatelné pro většinu míchacích procesů. Jeho výhodou je korelace s charakteristikami přenosu hmoty v míchacím zařízení. Konstantní příkon je vhodný z hlediska energetické náročnosti procesu.

5.2 Kritérium pro nízko koncentrované suspenze

Toto kritérium se pohybuje na pomezí kritérií konstantního Froudeho čísla a konstantní obvodové rychlosti a nejčastěji se blíží metodě konstantního měrného příkonu.

Kritérium konstantní obvodové rychlosti pracuje se závislostí modifikovaného Froudeho čísla (rovnice (13)) a bezrozměrné velikosti částice (rovnice (14)). Pomocí této závislosti se stanovují kritické otáčky potřebné ke vznosu míchané vsádky. V kapitole 3.2 jsou popsány závislosti koeficientů C a c z rovnice (14) na objemové koncentraci pevných částic v suspenzi (c_v), jejich velikosti a tvaru.

Pro scale-up kritérium platí následující rovnice: [16]

$$nT^\kappa = nT^{\frac{1+c}{2}} = konst. \quad (28)$$

kde κ je scale-up exponent pro kritérium konstantní obvodové rychlosti a T je vnitřní průměr míchané nádoby.

Z definice příkonového čísla (rovnice (15)) je možné stanovit kritérium pro měrný příkon v turbulentní oblasti proudění: [16]

$$\frac{P}{V} \sim n^3 T^2 \sim T^{\frac{1-3c}{2}} = T^\delta \quad (29)$$

kde δ je scale-up exponent pro kritérium konstantního měrného příkonu. Pro koncentraci pevných částic 10-13 % se doporučuje hodnota $\delta = -0,55$. [16]

Následná volba kritéria závisí především na koncentraci, velikosti a tvaru částic.

5.3 Shrnutí

Pro scale-up zařízení pro míchání vysoce koncentrované suspenze papíroviny jsou vhodná následující kritéria:

1. konstantní relativní průměr kaverny
2. konstantní měrný příkon
3. konstantní obvodová rychlost špičky míchadla

Scale-up pomocí kritéria č. 1 zajistí rovnoměrné promíchávání v celém objemu nádoby při vysoké koncentraci vedoucí ke tvorbě kaverny. Kritérium č. 2 je průmyslem ověřené jako vhodné pro většinu míchacích procesů z hlediska energetické náročnosti pro všechny různé objemové koncentrace pevných částic. Kritérium č. 3 je vhodné i v případě, že ke tvorbě kaverny nedochází, protože se nevztahuje k jejímu rozměru.

Pro nízko koncentrované suspenze je možné vždy zvolit kritérium konstantního měrného příkonu. Kritérium konstantní obvodové rychlosti se doporučuje pro vyšší koncentrace.

6. Metodika návrhu míchadel

Pro experiment v této diplomové práci byly navrženy a vypracovány dva 3D modely míchadel v programu Autodesk Inventor. Míchadla byla navržena za účelem míchání vláknité suspenze papíroviny z odpadního papíru. Modely míchadel byly navrženy pro výrobu 3D tiskem. Standardní tiskový prostor 3D tiskárny má rozměry 250 x 250 x 250 mm. Vyrobená míchadla mají vnější průměr 100 mm, nicméně by bylo možné zvětšením měřítka vyrobit geometricky podobná míchadla o vnějším průměru až 250 mm.

6.1 Míchadlo A

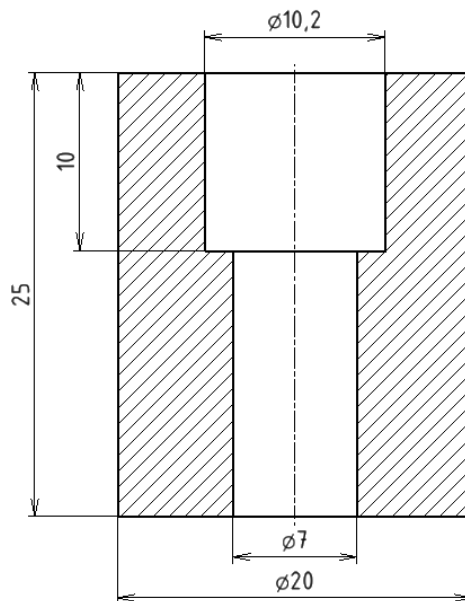
Míchadlo A je třílopatkové. Je navrženo pro otáčení po směru hodinových ručiček a pro čerpání suspenze směrem ke dnu nádoby. Návrh proběhl na základě průmyslové a patentové rešerše a je inspirován míchadlem Aquajet-B z kapitoly 4.1. Návrh je založen na předpokladu, že zahnutí lopatek proti směru rotace a směrem ke dnu nádoby zajistí sklouzávání vláken při míchání. Hrany lopatek jsou hladké a zaoblené.

Lopatky míchadla vznikly tvarováním obdélníkového plechu. Pro návrh byly zavedeny následující obecné parametry:

- rozměry plechu: $(0,47 \cdot d) \times (0,18 \cdot d)$
- úhel sklonu lopatky vůči horizontální rovině = 45°
- tloušťka lopatky = $0,03 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $0,2 \cdot d = 0,18 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $0,4 \cdot d = 0,179 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $0,6 \cdot d = 0,174 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $0,8 \cdot d = 0,164 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $1 \cdot d = 0,156 \cdot d$
- poloměr příčného ohybu = $0,8 \cdot d$
- úhel příčného ohybu = 8°
- poloměr podélného ohybu = $0,395 \cdot d$
- úhel podélného ohybu = 57°
- poloměr zaoblení hran lopatky = $(1/3) \cdot$ tloušťka lopatky
- poloměr zaoblení rohů lopatky = tloušťka lopatky

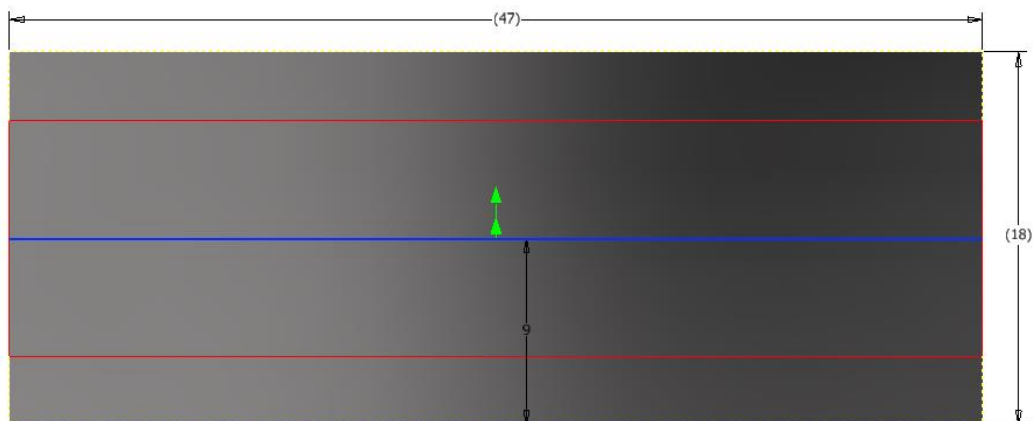
Příčné ohnutí plechu je podle osy jeho kratší strany. Počátek podélného ohnutí plechu tvoří čára ohybu umístěná ve vzdálenosti minimálně $0,25 \cdot d_n$, kde d_n představuje vnější průměr náboje míchadla.

Model míchadla A, který byl vyroben, má vnější průměr 100 mm. Míchadlo je popsáno na výkrese – příloha 1. Geometrie náboje míchadla je popsána na obrázku 13.



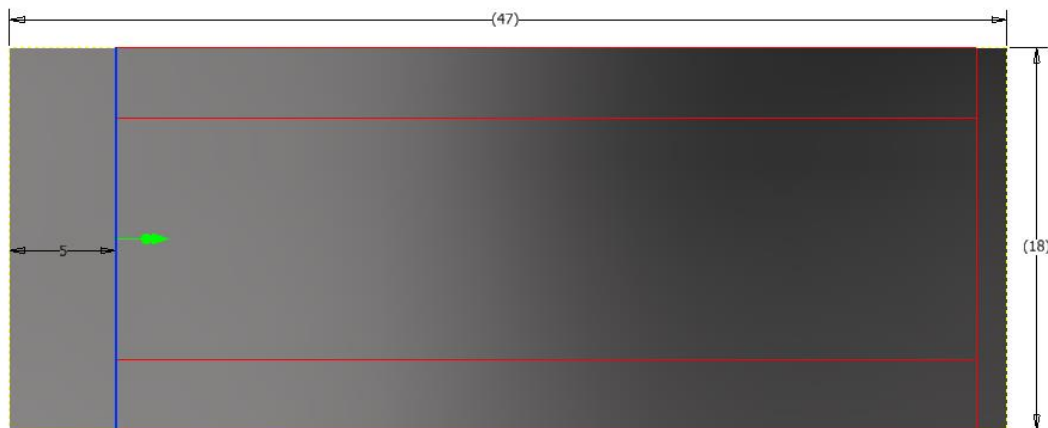
Obr. 13: Geometrie náboje míchadel

Tvar lopatek byl v programu vytvořen z jednoduchého obdélníkového plechu o rozměrech 47 x 18 mm. Tloušťka plechu je 3 mm. Plech byl dvakrát ohnutý, nejprve byla ohnuta kratší, a poté delší strana. Ohnutí kratší strany bylo provedeno s osou ohybu uprostřed plechu, s úhlem ohnutí 8° a poloměrem ohybu 80 mm.



Obr. 14: Ohnutí kratší strany plechu

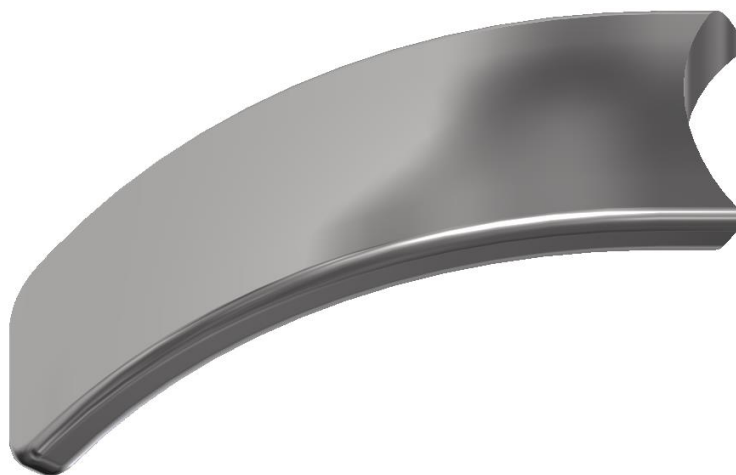
Ohnutí delší strany bylo provedeno s čarou počátku ohybu umístěnou 5 mm od hrany plechu na straně náboje, s úhlem ohnutí 57° a poloměrem ohybu 39,5 mm.



Obr. 15: Ohnutí delší strany plechu

Plech byl natočen pod úhlem 45° k ose rotace míchadla a byl do něj v rovině kolmé na osu rotace vyříznut kruhový tvar o průměru náboje. Hranice řezu protínala rohy plechu na straně náboje. Tímto řezem bylo umožněno připevnění plechu k náboji.

Rohy plechu na vnější straně míchadla byly upraveny zaoblením o poloměru 3 mm. Hrany plechu byly následně zaobleny s poloměrem 1 mm. Tvar plechu po všech zmíněných úpravách lze vidět na obrázku 16.



Obr. 16: 3D model lopatky míchadla A

Následně byly 3 lopatky upevněny k náboji míchadla, rozmístěny rovnoměrně po 120° . Konečný stav 3D modelu míchadla A lze vidět na obrázku 17.



Obr. 17: 3D model míchadla A

Na obrázku 18 se nachází skutečný model vyrobený 3D tiskem.



Obr. 18: Skutečný model míchadla A

Špička lopatky míchadla je ve vzdálenosti $0,25 \cdot h_n$ od spodní hrany náboje, kde h_n je výška válcového náboje. Lopatky jsou zahnuté směrem ke dnu nádoby a proti směru rotace.

Pokud by bylo míchadlo průmyslově vyráběno ohnutím skutečných plechů, návrh by se mírně lišil. Zejména by bylo nutné rozměry plechu přizpůsobit způsobu přivaření, protože to nahrazuje vyříznutí tvaru náboje do lopatky z návrhu pro 3D tisk. Klíčové by bylo zachovat vnější průměr míchadla, sklon lopatky a vzdálenost špičky lopatky od spodní hrany náboje.

6.2 Míchadlo B

Míchadlo B je třílopatkové. Je navrženo pro otáčení po směru hodinových ručiček a pro čerpání suspenze směrem ke dnu nádoby. Návrh proběhl na základě průmyslové a patentové rešerše a je inspirován míchadlem ARI-2 z kapitoly 4.4.

Návrh je založen na předpokladu, že zahnutí lopatek proti směru rotace a směrem ke dnu nádoby zajistí sklouzávání vláken při míchání. Hrany lopatek nebylo možné zaoblit, protože to program z důvodu tvarové složitosti neumožnil. Lopatka byla navržena tak, aby v každém místě čelní hrany byl její úhel větší než kritický úhel sklouznutí vláken.

Tvar lopatek vznikl tažením obdélníkového profilu, který se postupně zužuje. Profil byl tažen po trajektorii šroubovice s proměnlivým stoupáním. Pro návrh byly zavedeny následující obecné parametry:

- tloušťka lopatky = $0,03 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $0,2 \cdot d = 0,19 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $(1/3) \cdot d = 0,185 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $(2/3) \cdot d = 0,17 \cdot d$
- šířka lopatky na průměru $1 \cdot d = 0,095 \cdot d$
- úhel sklonu lopatky vůči horizontální rovině na průměru $0,2 \cdot d = 60^\circ$
- úhel sklonu lopatky vůči horizontální rovině na průměru $(1/3) \cdot d = 55^\circ$
- úhel sklonu lopatky vůči horizontální rovině na průměru $(2/3) \cdot d = 30^\circ$
- úhel sklonu lopatky vůči horizontální rovině na průměru $1 \cdot d = 24^\circ$

Model míchadla B, který byl vyroben, má vnější průměr 100 mm. Míchadlo je popsáno na výkrese – příloha 2. Geometrie náboje míchadla je popsána na obrázku 13.

Tvar lopatek byl v programu vytvořen tažením obdélníkového profilu o rozměrech 19 x 3 mm po trajektorii tvořené polovinou závitu šroubovice s proměnlivým stoupáním. Tento profil měl úhel sklonu vůči horizontální rovině 60° . Průměr šroubovice je 56,3 mm a výchozí hodnota stoupání je 80 mm. Průměr byl volen tak, aby bylo z taženého profilu možné vytvarovat lopatku pro míchadlo o průměru 100 mm. Šroubovice byla rozdělena na 12 bodů a v každém bodě bylo sníženo stoupání o 0,5 %. Hodnota stoupání v posledním bodě je 75,2 mm. Při tažení bylo zvoleno zkroucení profilu o 1° .

Tímto postupem byl vytvořen profil, který má ve výchozím bodě úhel sklonu vůči horizontální rovině 60° . Úhel sklonu profilu průběžně klesá až na hodnotu 24° v koncovém bodě. Profil po vytvarování výchozího bodu podle náboje lze vidět na obrázku 19.



Obr. 19: Tažený profil pro lopatku míchadla B

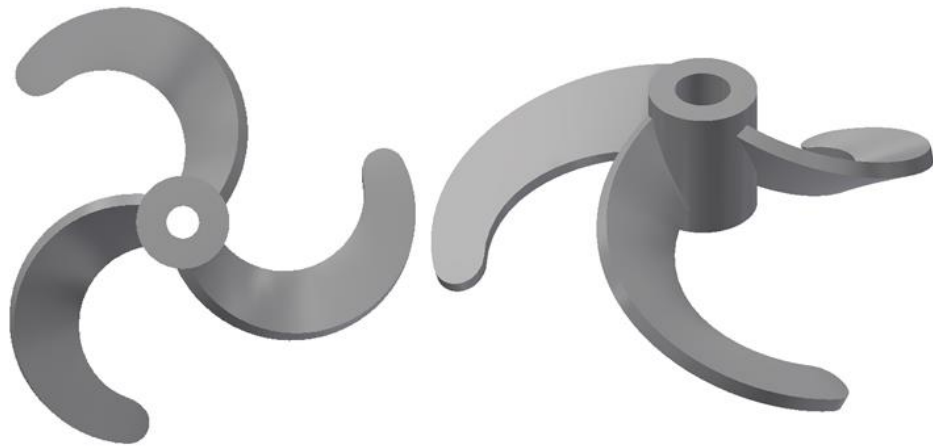
Na profil byl následně promítnut 2D náčrt požadované geometrie lopatky, který vychází z obrázku 9, kde jsou vyobrazeny vhodné úhly čelní hrany v jednotlivých místech lopatky. Profil byl podle tohoto náčrtu oříznut a výsledkem byl tvar lopatky, který se nachází na obrázku 20.



Obr. 20: 3D model lopatky míchadla B

Šířka lopatky na jejím konci je rovna polovině šířky u náboje. Při návrhu bylo překročeno doporučení pro maximální šířku lopatky z patentové rešerše, a to z pevnostních důvodů. Poměr stoupání lopatky a průměru míchadla leží v doporučeném rozmezí.

Následně byly 3 lopatky upevněny k náboji míchadla, rozmístěny rovnoměrně po 120° . Konečný stav 3D modelu míchadla B lze vidět na obrázku 21.



Obr. 21: 3D model míchadla B

Na obrázku 22 lze vidět skutečný model vyrobený 3D tiskem.



Obr. 22: Skutečný model míchadla B

Špička lopatky míchadla je ve vzdálenosti $0,72 \cdot h_n$ od spodní hrany náboje.

Jiným způsobem výroby tohoto míchadla by bylo např. postupné ohýbání plechu po krátkých úsecích, které by bylo náročnější než 3D tisk.

7. Procesní charakteristiky navržených míchadel

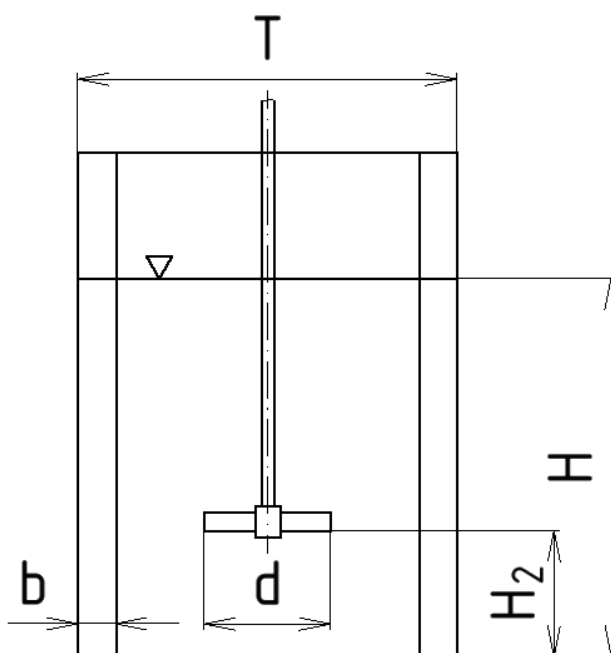
Pro navržená míchadla je nutné stanovit otáčky potřebné pro vznos a cirkulaci míchané vsádky. Dále je nutné stanovit jejich příkon na hřídeli míchadla. Tyto charakteristiky získané pomocí modelů je potřeba zobecnit. Otáčky lze pro různé geometrie získat pomocí metod scale-upu popsanych v kapitole 5. Příkon je možné zobecnit pomocí příkonové charakteristiky. Pro stanovení těchto procesních charakteristik bylo provedeno měření v laboratoři Ústavu procesní a zpracovatelské techniky ČVUT v Praze na míchací stanici.

7.1 Měření příkonu

7.1.1 Popis měření

Cílem měření bylo určit příkonové charakteristiky a z nich příkonová čísla navržených míchadel. Měření probíhalo ve válcové nádobě s plochým dnem naplněné 20 litry vody. Schéma nádoby lze vidět na obrázku 23. Geometrické parametry procesu jsou následující:

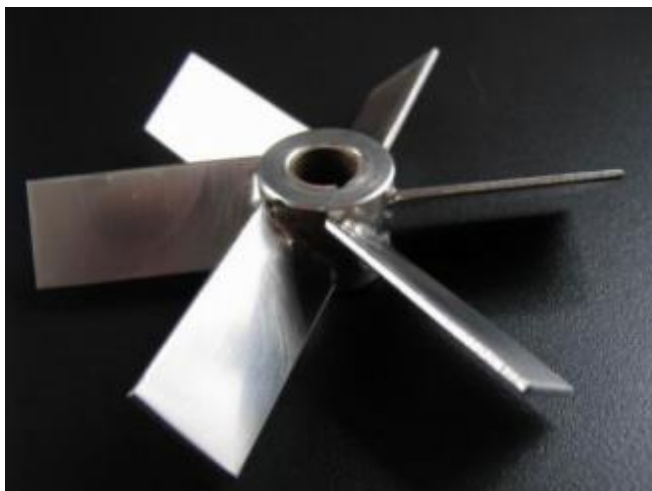
- vnitřní průměr nádoby $T = 300$ mm
- poměr výšky hladiny a vnitřního průměru nádoby $H/T = 1$
- poměr vnějšího průměru míchadla a vnitřního průměru nádoby $d/T = 1/3$
- vzdálenost míchadla ode dna nádoby $H_2 = d$
- 4x narážky o šířce $b = (1/10) \cdot T$



Obr. 23: Schéma nádoby použité při měření příkonu a suspenčních charakteristik

Data byla získána pomocí tenzometrického snímače krouticího momentu typu DR-2500 od firmy LORENZ MESSTECHNIK GmbH s výrobním číslem 145790. Rozsah nominálního momentu snímače je $\pm 0,5$ N.m. Třída přesnosti odpovídá 0,1 % nominálního momentu.

Při měření byla použita navržená míchadla A, B a šestilopátkové míchadlo se sklonem lopatek $\alpha = 45^\circ$ a šířkou lopatek $h = 0,2 \cdot d$ (zjednodušené označení: 6SL45). Směr rotace míchadel byl volen tak, aby míchadla čerpala kapalinu směrem ke dnu nádoby. Míchadlo 6SL45 bylo použito pro ověření platnosti měření, neboť jeho příkonová charakteristika a příkonové číslo jsou dostupné v literatuře. Míchadlo lze vidět na obrázku 24.



Obr. 24: Míchadlo 6SL45 [4]

Pro každé ze tří míchadel proběhlo měření pro otáčky $n = 250\text{--}550$ min^{-1} s krokem 50. Rozsah otáček byl zdola omezen přesností snímače a shora tvorbou středového víru. Pro otáčky $n < 200$ min^{-1} byl naměřený krouticí moment velice malý a pro otáčky $n > 550$ min^{-1} docházelo díky víru k narušení jednofázového systému. Následně bylo pro stejné otáčky provedeno měření naprázdno, tedy mimo nádobu. Míchadla A a B při procesu měření lze vidět na obrázku 25.



Obr. 25: Průběh měření příkonu míchadel A (vlevo) a B (vpravo)

7.1.2 Naměřené hodnoty

Pro dané otáčky bylo snímačem naměřeno napětí, které je možné přepočítat na krouticí moment. Naměřené hodnoty lze vidět v tabulce 1.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty napětí

	Míchadlo A	Míchadlo B	6SL45	naprázdno
n [min ⁻¹]	U [V]			
250	0,375	0,370	0,624	0,199
300	0,476	0,449	0,836	0,229
350	0,548	0,543	1,058	0,205
400	0,661	0,635	1,333	0,215
450	0,781	0,745	1,624	0,227
500	0,946	0,905	1,976	0,230
550	1,079	1,045	2,346	0,249

Skutečný krouticí moment je možné vypočítat pomocí rovnice:

$$M_k = 0,1(U_M - U_N) \quad (30)$$

kde U_M je napětí naměřené pro dané míchadlo a U_N je napětí naměřené naprázdno. V tabulce 2 se nachází přepočtené krouticí momenty.

Tabulka 2: Krouticí momenty

	Míchadlo A	Míchadlo B	6SL45
n [min ⁻¹]	M _k [N.m]		
250	0,018	0,017	0,043
300	0,025	0,022	0,061
350	0,034	0,034	0,085
400	0,045	0,042	0,112
450	0,055	0,052	0,140
500	0,072	0,068	0,175
550	0,083	0,080	0,210

7.1.3 Vyhodnocení měření

Prvním krokem vyhodnocení je vypracování příkonových charakteristik míchadel, tedy závislost příkonového a Reynoldsova čísla v logaritmickém měřítku. Příkon míchadla z krouticího momentu a otáček je možné vypočítat z rovnice:

$$P = 2M_k\pi n \quad (31)$$

Pro výpočet příkonového čísla platí rovnice (15). Pro výpočet Reynoldsova čísla platí:

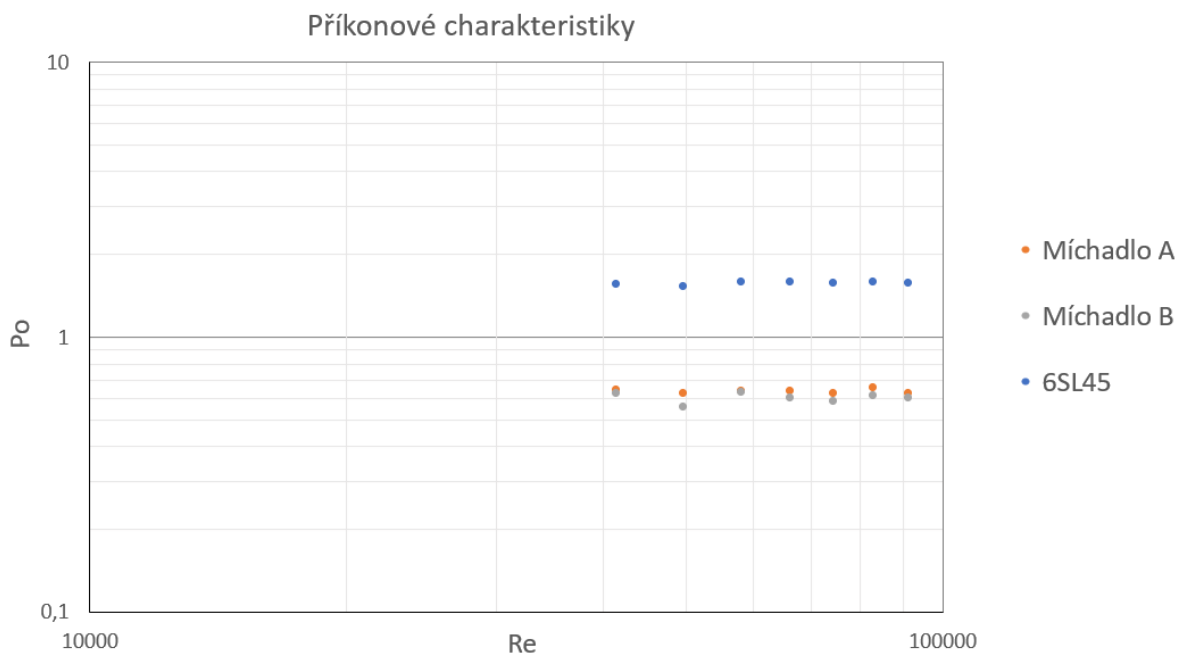
$$Re = \frac{\rho n d^2}{\mu} \quad (32)$$

Vypočtená příkonová a Reynoldsova čísla lze vidět v tabulce 3.

Tabulka 3: Příkonová a Reynoldsova čísla míchadel

n [min ⁻¹]	Míchadlo A		Míchadlo B		6SL45	
	Po	Re	Po	Re	Po	Re
250	0,640	41460	0,622	41460	1,545	41460
300	0,623	49750	0,555	49750	1,530	49750
350	0,635	58040	0,626	58040	1,581	58040
400	0,633	66330	0,597	66330	1,586	66330
450	0,620	74630	0,580	74630	1,565	74630
500	0,650	82920	0,613	82920	1,584	82920
550	0,623	91210	0,597	91210	1,573	91210

Z hodnot v tabulce 3 byly vypracovány příkonové charakteristiky míchadel, které lze vidět na obrázku 26.



Obr. 26: Příkonové charakteristiky míchadel

Konstantní hodnotu příkonového čísla je možné získat pomocí statistického vyhodnocení naměřených hodnot, které bylo provedeno pomocí následujících rovnic. Pro příkonovou charakteristiku $Po = f(Re)$ platí mocninová závislost: [17]

$$Po = C \cdot Re^c \quad (33)$$

Konstanta C a exponent c jsou určeny z lineární regrese v logaritmických souřadnicích: [17]

$$\log(Po) = \log(C) + c \cdot \log(Re) \quad (34)$$

Pro zjednodušení následujících rovnic platí: $\log(Po) = y$; $\log(Re) = x$

Exponent c představuje směrnici regresní přímky a je vypočten z rovnice: [17]

$$c = \frac{m \sum_1^m (x_i y_i) - (\sum_1^m x_i)(\sum_1^m y_i)}{\sum_1^m x_i^2 - (\sum_1^m x_i)^2} \quad (35)$$

kde m je počet měření. Konstanta C je vypočtena z rovnice: [17]

$$\log(C) = \frac{\sum_1^m y_i - c \sum_1^m x_i}{m} \quad (36)$$

Dále je třeba z následující rovnice spočítat směrodatnou odchylku směrnice regresní přímky: [17]

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum_1^m y_i^2 - [\log(C) \sum_1^m y_i + c \sum_1^m (x_i y_i)]}{(m-2) \left[\sum_1^m x_i^2 - \frac{(\sum_1^m x_i)^2}{m} \right]}} \quad (37)$$

V turbulentní oblasti by mělo být příkonové číslo konstantní. Pro ověření této teorie je nutné statisticky otestovat hypotézu, že směrnice regresní přímky $c = 0$. Nejprve je nutné porovnat poměr $t = \frac{c-0}{S_c}$ s kritickou hodnotou Studentova rozdělení pro $(m-2)$ stupňů volnosti a zvolenou hladinu významnosti, která je rovna 0,05 pro technické výpočty. Po vypočtení všech výše zmíněných hodnot musí platit následující vztah: [17]

$$|t| < t_{(m-2);0,05} \quad (38)$$

aby bylo možné přijmout hypotézu, že je směrnice regresní přímky $c = 0$.

Vypočtené hodnoty z výše popsaných rovnic lze vidět v tabulce 4.

Tabulka 4: Vypočtené hodnoty pro statistické vyhodnocení

	Míchadlo A	Míchadlo B	6SL45
c	-0,006	-0,004	0,033
C	0,677	0,627	1,091
S_c	0,027	0,068	0,016
t	-0,232	-0,063	2,060
t_{(m-2);0,05}	2,571	2,571	2,571
 t < t_{(m-2);0,05}	PLATÍ	PLATÍ	PLATÍ

Z tabulky 4 je patrné, že hypotézu $c = 0$ je možné přijmout pro příkonové charakteristiky všech tří míchadel. Za těchto podmínek naměřené hodnoty příkonových čísel nezávisí na Reynoldsově čísle a jejich konstantní hodnota se vypočítá jako aritmetický průměr s mezemi 95 % intervalu spolehlivosti. Pro výpočet platí rovnice: [17]

$$P_o = \frac{\sum_1^m P_{o_i}}{m} \pm \frac{S * t_{(m-1);0,05}}{\sqrt{m}} \quad (39)$$

kde S je směrodatná odchylka vypočtená ze vztahu:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^m (P_o)_i^2 - \frac{[\sum_1^m P_{o_i}]^2}{m}}{m-1}} \quad (40)$$

Hodnoty Studentových koeficientů byly získány z tabulek v dokumentu [17].

Hodnoty pro výpočet příkonových čísel a příkonová čísla všech tří míchadel jsou uvedeny v tabulce 5. Příkonová čísla jsou platná pouze v uvedeném rozsahu Reynoldsových čísel.

Tabulka 5: Konečné výpočty statistického vyhodnocení

	Míchadlo A	Míchadlo B	6SL45
S	0,011	0,025	0,021
$t_{(m-1);0,05}$	2,447	2,447	2,447
Po	0,632 ± 0,01	0,599 ± 0,023	1,566 ± 0,02
Re	40000 – 100000	40000 – 100000	40000 – 100000

Zjištěná příkonová čísla budou použita ve vyhodnocení druhé části měření. V tabulce 6 lze vidět porovnání příkonových čísel v turbulentním režimu proudění. Byla porovnána data z měření s daty dostupnými v článku [18], konkrétně pro míchadlo 6SL45, poté pro jeho třílopatkovou variantu 3SL45 a pro míchadlo TX335, které je popsáno v rešerši. Příkonová čísla platí pro stejné geometrické parametry.

Tabulka 6: Porovnání příkonových čísel

Typ míchadla	Po (měření)	Typ míchadla	Po (literatura)
Míchadlo A	0,632	3SL45	1,060
Míchadlo B	0,599	TX335	0,944
6SL45	1,566	6SL45	1,660

Navržená míchadla A a B mají příkonové číslo značně nižší než ostatní míchadla. Z výsledků měření je patrné, že bylo provedeno v oblasti turbulentního proudění. Bylo prokázáno, že v turbulentní oblasti příkonové číslo nezávisí na Reynoldsově čísle. Výsledek je tedy možné zobecnit pro celou oblast turbulentního proudění.

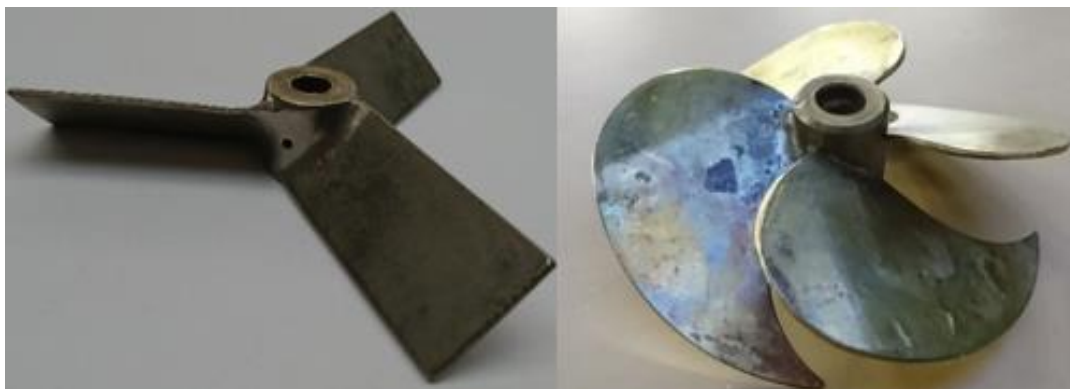
Ověřením platnosti měření je fakt, že naměřené příkonové číslo pro míchadlo 6SL45 je téměř stejné, jako je hodnota získaná z článku [18]. Odchylka těchto hodnot je pravděpodobně způsobena nepřesností měření nebo statistického vyhodnocení.

7.2 Měření suspenčních charakteristik

7.2.1 Popis měření

Měření probíhalo ve válcové nádobě s plochým dnem se stejnými geometrickými parametry jako měření příkonu (viz kapitola 7.1), s rozdílem použití dvou narážek místo čtyř. Jedná se o komparativní měření zaměřené především na vlastnosti míchadel.

Byla použita míchadla A, B, TX335 a třílopatkové míchadlo se sklonem lopatek $\alpha = 45^\circ$ a šířkou lopatek $h = 0,2 \cdot d$ (zjednodušené označení: 3SL45). Směr rotace míchadel byl volen tak, aby míchadla čerpala suspenzi směrem ke dnu nádoby. Skutečné modely míchadel 3SL45 a TX335 použité při měření lze vidět na obrázku 27.



Obr. 27: Míchadlo 3SL45 (vlevo) a TX335 (vpravo)

Cílem měření bylo změřit kritické otáčky, které jsou definovány jako stav, při kterém se všechny částice pohybují a cirkulují v míchané vsádce. Žádné částice neleží na dně nádoby a nejsou přilepené na stěně nebo narážkách. Tento stav lze vidět na obrázku 30.

Suspenze byla vytvořena smícháním vláken skartovaného papíru s vodou o objemu 20 litrů. Vláknina byla obdélníkového tvaru o šířce $0,5 \pm 0,1$ cm a délce 7 ± 1 cm. První měření proběhlo pro suspenzi se 100 gramy papírových vláken, druhé měření s 200 gramy.

Měření probíhalo tak, že byly postupně zvyšovány otáčky míchadla až do fáze, kdy došlo ke vznosu částic a k cirkulaci míchané vsádky. Pro každé z jednotlivých míchadel proběhlo měření třikrát pro nižší i vyšší koncentraci pevných částic. Ze tří měření byla získána průměrná hodnota otáček, se kterou se pracovalo při vyhodnocení. Na obrázku 28 lze vidět vláknité suspenze o obou koncentracích v klidovém stavu.



Obr. 28: Vlákenná suspenze o nižší koncentraci (vlevo) a o vyšší koncentraci (vpravo)

7.2.2 Průběh měření

U každého z jednotlivých míchadel byly po zahájení míchaní zvyšovány otáčky s krokem 3, přičemž docházelo k postupnému vznosu pevných částic míchané vsádky. Jakmile se otáčky začaly blížit kritické hodnotě, byly už téměř všechny částice ve vznosu, kromě těch, které se akumulovaly u narážek. Bylo tedy nutné otáčky ještě mírně zvýšit, a jakmile i částice u narážek začaly cirkulovat, byla momentální nastavená hodnota otáček zapsána. Pro dosažení spolehlivých výsledků měření bylo nutné nechat suspenzi po změně otáček ustálit.

Chování suspenze značně záviselo na způsobu zahájení procesu a intenzitě zvyšování otáček. V případě prudkého zahájení procesu nastavením otáček přibližně na dvě třetiny předpokládané hodnoty kritických otáček suspenze působila dojmem, že již plně cirkuluje. Po přibližně dvaceti sekundách provozu za těchto podmínek začaly ale některé částice opět usedávat ke dnu a hromadit se u narážek. Tento jev si lze vysvětlit postupným hromaděním vláken na lopatkách míchadla, které bylo odhalitelné pouze při ručním očištění po jednotlivých měřeních, neboť suspenze byla zakalená a míchadlo nebylo viditelné. Míru namotávání vláken nebylo možné vizuálně ověřit po vytažení míchadla z nádoby, protože právě vytažením se na lopatky nahromadilo mnohem více vláken než při procesu. U míchadla s rovnými lopatkami bylo podle hmatu patrné větší množství namotaných vláken.

Na obrázku 29 vlevo lze vidět částečný vznos koncentrovanější suspenze a vpravo téměř úplnou cirkulaci, při které jsou některá vlákna nahromaděna na narážce a na stěně nádoby.



Obr. 29: Částečný vznos (vlevo) a téměř úplná cirkulace (vpravo) míchané vsádky s vyšší koncentrací

Úplnou cirkulaci koncentrovanější míchané vsádky, pro kterou byly změřeny otáčky je možné vidět na obrázku 30.



Obr. 30: Úplná cirkulace míchané vsádky s vyšší koncentrací

Obě suspenze vykazovaly obdobné chování. Při míchání nedocházelo ke tvorbě kaverny. Jediným rozdílem při míchání koncentrovanější suspenze bylo hromadění částic u narážek ve vyšší míře než u méně koncentrované suspenze a potřeba vyšších otáček ke vznosu.

Následující podkapitoly obsahují subjektivní popis chování suspenzí během míchání jednotlivými typy míchadel.

Míchadlo A

Míchadlo A působilo nejlepším dojmem při míchání obou vláknitých suspenzí. Již za nízkých otáček suspenze téměř úplně cirkulovala, pouze malé množství vláken zůstávalo nahromaděné na narážkách. Po nepatrném navýšení otáček suspenze dokonale a intenzivně cirkulovala.

Míchadlo B

U míchadla B bylo pro suspendaci potřeba nastavit téměř dvojnásobné otáčky než u míchadla A. Suspenze vždy pár sekund působila dojmem, že již úplně cirkuluje, krátce poté však značné množství vláken opět usedlo na dno. Po dosažení suspendace těchto částic bylo ještě nutné mnohokrát zvýšit otáčky, než se vlákna přestala hromadit u narážek. V této fázi suspenze cirkulovala bez problémů, ale ne tak intenzivně, jako u míchadla A.

3SL45

Toto míchadlo působilo při míchání trochu hůře než míchadla A a B. Nejčastěji pozorovaným jevem bylo periodické hromadění vláken u narážek. Svazek, který se u narážky utvořil, se vždy kompletně uvolnil a po chvíli se vlákna opět nahromadila. Po navýšení otáček začala suspenze cirkulovat, nicméně s občasným hromaděním malého množství vláken u narážek.

TX335

U míchadla TX335 bylo možné pozorovat hromadění vláken u narážek v největší míře. Jakmile byl tento jev navýšením otáček překonán, suspenze cirkulovala podobně, jako u míchadla B.

7.2.3 Naměřené hodnoty

V tabulkách 7 a 8 lze vidět naměřené hodnoty kritických otáček a jejich průměrnou hodnotu pro obě vytvořené vláknité suspenze.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty pro suspenzi s nižší koncentrací

100 g vláken v suspenzi	Měření			průměr
	1	2	3	
	Kritické otáčky [min ⁻¹]			
Míchadlo A	114	120	120	118
Míchadlo B	180	174	186	180
3SL45	111	123	120	118
TX335	138	141	138	139

Tabulka 8: Naměřené hodnoty pro suspenzi s vyšší koncentrací

200 g vláken v suspenzi	Měření			průměr
	1	2	3	
	Kritické otáčky [min ⁻¹]			
Míchadlo A	190	192	180	187
Míchadlo B	342	333	339	338
3SL45	220	223	216	220
TX335	285	282	288	285

7.2.4 Vyhodnocení měření

Pro vyhodnocení míchadel byl vypočítán měrný příkon potřebný k dosažení suspendace míchané vsádky. Nejprve byl vypočítán příkon z upravené rovnice pro příkonové číslo:

$$P = \rho n^3 d^5 P_o \quad (41)$$

kde za otáčky byly dosazeny naměřené průměrné kritické otáčky a dosazená hustota je z rovnice (4) pro výpočet hustoty suspenze. Pro výpočet měrného příkonu (P/V) je nutné vydělit příkon míchadla objemem suspenze.

V tabulce 9 se nachází výsledky pro suspenzi s nižší koncentrací a v tabulce 10 pro suspenzi s vyšší koncentrací.

Tabulka 9: Měrný příkon míchadel při míchání suspenze s nižší koncentrací

	Po	P [W]	P/V [W/m³]
Míchadlo A	0,632	0,048	2,39
Míchadlo B	0,599	0,161	8,04
3SL45	1,060	0,080	4,01
TX335	0,944	0,117	5,83

Tabulka 10: Měrný příkon míchadel při míchání suspenze s vyšší koncentrací

	Po	P [W]	P/V [W/m³]
Míchadlo A	0,632	0,192	9,53
Míchadlo B	0,599	1,069	53,03
3SL45	1,060	0,519	25,76
TX335	0,944	1,010	50,10

7.3 Diskuse výsledků

Míchadla byla porovnána na základě měrného příkonu potřebného pro uvedení částic do vznosu a na základě míry cirkulace vsádky. Z tabulek je patrné, že míchadlo A pracuje s nejnižší hodnotou měrného příkonu, a je tedy pro daný proces nejvýhodnější z energetického hlediska. Další v pořadí je míchadlo 3SL45 a po něm TX335. Nejvyšší měrný příkon má míchadlo B.

Z naměřených hodnot dále plyne, že při míchání koncentrovanější suspenze vzrostla hodnota kritických otáček u míchadla A přibližně o 60 % vůči hodnotě naměřené při míchání méně koncentrované suspenze. U míchadla B a 3SL45 otáčky vzrostly o 87 % a u míchadla TX335 až o 105 %.

Míchadlo A pracovalo nejlépe i z vizuálního hlediska. Míchadlo B má nejvyšší měrný příkon, ale dosahovalo dobrých výsledků z hlediska míry cirkulace vsádky. Oproti míchadlu A ale nemá žádnou patrnou výhodu a je hůře vyrobitelné. Ani modely míchadel TX335 a 3SL45 nepředčily míchadlo A v žádném ohledu. Míchadlo A tedy představuje nejlepší volbu pro míchání vláknitých suspenzí ze všech testovaných míchadel.

Z experimentu vyšlo najevo, že při použití míchadla s rovnými lopatkami není dosaženo dostatečného čerpacího účinku, protože hůře brání namotávání vláken na lopatky. Míchadla s tvarovanými lopatkami prokázala lepší čerpací účinek, a tedy větší odolnost vůči namotávání vláken. Vlákniatá suspenze cirkulovala vždy lépe při použití míchadel s tvarovanými lopatkami. Z toho vyplývá, že závěry z rešerše v diplomové práci byly měřením ověřeny, a tedy že míchadla s tvarovanými lopatkami jsou vhodnější pro míchání vláknitých suspenzí.

Míchadlo B působilo podle rešerše jako nejvhodnější volba pro daný proces, ale nedosáhlo nejlepších výsledků. To si lze vysvětlit např. drsností lopatek, která mohla napomáhat namotávání vláken. Další možnou příčinou je nízká čerpací účinnost míchadla. Dále je možné, že proces, pro který bylo vzorové míchadlo výrobci navrženo, je příliš odlišný od procesu provedeného při měření. Koncentrace vláken při měření byla taková, že žádné z použitých míchadel určených pro vláknité suspenze nebylo schopno míchat s nulovou akumulací vláken. Za těchto podmínek je tedy vhodnější použít míchadlo, které neztrácí čerpací účinek na úkor složitějšího tvarování lopatek.

8. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo nejprve zpracovat rešerši zaměřenou především na míchadla vhodná pro míchání vláknitých suspenzí. Dalším cílem bylo na základě vypracované rešerše navrhnout dva 3D modely míchadel a zajistit jejich výrobu. Posledním cílem bylo pro navržená míchadla provést měření příkonu a měření suspenzačních charakteristik. V práci bylo dosaženo následujících výsledků:

- Byla vypracována literární, průmyslová a patentová rešerše zaměřená na míchací zařízení vhodná pro proces míchání vláknitých suspenzí.
- Bylo navrženo a vyrobeno míchadlo A se třemi lopatkami a vnějším průměrem 100 mm. Tvar lopatek vznikl dvojitým ohnutím obdélníkového plechu se zaoblenými hranami a rohy, a to po kratší a delší straně. Návrh míchadla vycházel z vypracované rešerše a byl inspirován míchadlem Aquajet-B od firmy EKATO.
- Bylo navrženo a vyrobeno míchadlo B se třemi lopatkami a vnějším průměrem 100 mm. Tvar lopatek je postupně se zužující obdélníkový profil tažený po trajektorii šroubovice s proměnlivým stoupáním. Špička lopatek je zaoblená. Návrh míchadla vycházel z vypracované rešerše a je inspirován míchadlem ARI-2 od firmy Philadelphia Mixing Solutions.
- Byl popsána metodika návrhu lopatek míchadel A a B.
- Pro míchadla A a B proběhlo měření příkonové charakteristiky, které bylo posléze využito k porovnání čerpací účinnosti. Při měření bylo použito šestilopátkové míchadlo 6SL45 se sklonem lopatek $\alpha = 45^\circ$ a šířkou lopatek $h = 0,2 \cdot d$ jako referenční. Příkonová čísla byla porovnána s daty dostupnými v literatuře. Bylo potvrzeno, že v turbulentní oblasti proudění nezávisí příkonové číslo na Reynoldsově čísle, a tudíž je možné příkonové číslo pro tuto oblast zobecnit.
- Proběhlo měření suspenzačních charakteristik míchadel ve vláknité suspenzi papíroviny vzniklé z odpadního papíru. Byly vytvořeny dvě suspenze s nižší a vyšší koncentrací pevných částic. Jednalo se o komparativní měření, pro které bylo použito míchadlo A, míchadlo B, třílopatkové míchadlo 3SL45 se sklonem lopatek $\alpha = 45^\circ$ a šířkou lopatek $h = 0,2 \cdot d$ a míchadlo TX335. Zmíněná míchadla byla porovnána na základě měrného příkonu potřebného pro vnos a cirkulaci všech pevných částic. Z tohoto porovnání vychází nejlépe míchadlo A.

Z vizuálního hodnocení intenzity cirkulace vláknité suspenze bylo patrné, že suspenze cirkuluje intenzivněji při použití míchadel s tvarovanými lopatkami. Nejlepšího výsledku dosáhlo míchadlo A.

Poznatky o míchání vláknitých suspenzí uvedené v této diplomové práci mohou sloužit jako návrhové podklady. Pro návrh průmyslového zařízení pro míchání vláknitých suspenzí obdobného charakteru lze doporučit použití míchadla A. Ze shrnutí výsledků v této kapitole plyne, že stanovené cíle práce byly splněny.

Vzhledem k omezenému přístupu do fakultních prostor kvůli koronaviru nebylo bohužel možné uskutečnit více měření a navýšit tím rozsah práce.

9. Seznam použitých veličin a koeficientů

A	náběhový úhel čelní hrany lopatky	[-]
b	šířka narážky	[m]
C	koeficient pro mocninovou závislost	[-]
c	exponent pro mocninovou závislost	[-]
c_m	hmotnostní koncentrace	[-]
C_p	konstanta pro tlak na čelní hraně míchadla	[-]
CSA	kritický úhel sklouznutí vláken	[°]
c_v	objemová koncentrace	[-]
d	vnější průměr míchadla	[m]
d_n	vnější průměr náboje míchadla	[m]
D_c	průměr kaverny	[m]
E	energetická účinnost	[-]
Fr'	modifikované Froudeho číslo	[-]
g	gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
H	výška hladiny v míchané nádobě	[m]
h	šířka lopatky míchadla	[m]
H_2	vzdálenost míchadla ode dna nádoby	[m]
h_n	výška náboje míchadla	[m]
K	Metzner-Ottův koeficient	[-]
k	koeficient míchadla pro Metzner-Ottovu korelaci	[-]
M_k	krouticí moment	[N.m]
m	index toku, počet měření	[-]

m_l	hmotnost kapalné fáze	[kg]
m_s	hmotnost pevné fáze	[kg]
N_{QP}	průtokové číslo	[-]
n	otáčky míchadla	[s ⁻¹]
n_{cr}	kritické otáčky míchadla	[s ⁻¹]
P	příkon	[W]
p	tlak	[Pa]
P/V	měrný příkon	[W/m ³]
Po	příkonové číslo	[-]
Q_p	čerpací výkonnost míchadla	[m ³ .s ⁻¹]
r	poloměr míchadla	[m]
r_c	poloměr kaverny	[m]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Re_m	Reynoldsovo číslo pro mocninou látku	[-]
S	směrodatná odchylka	[-]
S_c	směrodatná odchylka směrnice	[-]
T	vnitřní průměr míchané nádoby	[m]
t	Studentův koeficient	[-]
U	napětí	[V]
V	objem vsádky	[m ³]
X_{st}	množství absorbované vody stěnou buňky vlákna	[kg.kg ⁻¹]
Z	poměr délky a tloušťky vláken	[-]

δ	exponent pro konstantní měrný příkon	[-]
ε_F	měrná disipovaná energie při fluidizaci	[W.m ⁻³]
ϕ_g	koncentrace plynu v suspenzi	[-]
$\dot{\gamma}_{ef}$	efektivní rychlost smykové deformace	[s ⁻¹]
κ	exponent pro konstantní obvodovou rychlost	[-]
μ_b	součinitel statického tření	[-]
μ_{ef}	efektivní viskozita	[Pa.s]
ω_t	obvodová rychlost špičky míchadla	[m.s ⁻¹]
π_s	suspendační účinnost míchadla	[-]
ρ	hustota míchaného média	[kg.m ⁻³]
ρ_l	hustota kapalné fáze	[kg.m ⁻³]
ρ_s	hustota pevné fáze	[kg.m ⁻³]
ρ_{st}	hustota stěny vlákna	[kg.m ⁻³]
ρ_{su}	hustota suspenze	[kg.m ⁻³]
τ_y	mez toku suspenze	[Pa]
θ_T	úhel špičky lopatky	[°]

10. Seznam použité literatury

- [1] PAUL, Edward L., Victor A. ATIEMO-OBENG a Suzanne M. KRESTA, ed. *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [2] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN ISBN 80-01-03302-3.
- [3] SOLOMON, J., T.P. ELSON, A.W. NIENOW, 1981. *Cavern sizes in agitated fluids with a yield stress*. Chemical Engineering Communication 11, 143–164
- [4] JIROUT, Tomáš. *Míchání v kapalném prostředí* [online]. [cit. 2020-10-05]. Dostupné z: http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmp/hmp_soubory/hmp10.pdf
- [5] HIGHBEE, Robert W., Jason J. GIACOMELLI a Wojciech R. WYCZALKOWSKI. *Advanced impeller design: Anti-ragging impeller, AR12*. Chemical Engineering Research and Design. 2013, 91(11), 2190-2197.
- [6] JIROUT, Tomáš a František RIEGER. *Impeller design for mixing of suspensions*. Chemical Engineering Research and Design. 2011, (89), 1144-1151.
- [7] AQUAJET-B. EKATO [online]. [cit. 2020-10-05]. Dostupné z: <https://www.ekato.com/en/products/agitator-components/impellers/aquajet-b/>
- [8] RL-3. Chemineer [online]. [cit. 2020-10-05]. Dostupné z: <https://www.chemineer.com/products/chemineer/impellers/rl-3.html>
- [9] Techmix s.r.o: Publikace [online]. [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.techmix.cz/publikace/>
- [10] Míchadla HP. PAPCEL [online]. [cit. 2020-10-05]. Dostupné z: <https://www.papcel.cz/produkty/papir/lepenka/pripravna-latky/strojni-zarizeni/cerpadla-nadrze-zahustneni-vyplivu/michadla-hp/>
- [11] SEICHTER, Pavel. *Axiální míchadlo s tvarovanými lopatkami*. Česká republika. CZ5003U1. Uděleno 11.09.1996. Zapsáno 18.04.1996.

- [12] Anti-Ragging Impeller (ARI-2) Anaerobic/Anoxic. In: Philadelphia Mixing Solutions [online]. [cit. 2020-10-05]. Dostupné z:
<https://www.philamixers.com/products/impellers/axial-flow-impellers/ari2-anoxic/>
- [13] HIGHBEE, Robert W., Wojciech WYCZALKOWSKI a Jason J. GIACOMELLI. *High efficiency, non-ragging, formed axial impeller*. Spojené státy americké. US9962665B2. Uděleno 08.05.2018. Zapsáno 08.05.2018.
- [14] *Impeller design prevents buildup of ragging matter*. World Pumps. 2016, (10), 20-21.
- [15] WILKENS, Robert, Christopher HENRY a Lewis E. GATES. *How to Scale-Up Mixing Processes in Non-Newtonian Fluids*. Chemical Engineering Progress. 2003.
- [16] JIROUT, Tomáš, František RIEGER a Dorin CERES. Scale-Up of Mixing Equipment for Suspensions. *Processes*. 2020, **8**(8).
- [17] BEDÁŇOVÁ, Iveta a Vladimír VEČEREK. *Základy statistiky pro studující veterinární medicíny a farmacie* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-01-04]. Dostupné z:
<https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Skripta.pdf>
- [18] JIROUT, Tomáš a Dita JIROUTOVÁ. Application of Theoretical and Experimental Findings for Optimization of Mixing Processes and Equipment. *Processes*. 2020.

11. Seznam příloh

Příloha 1: MÍCHADLO A, DP - 001, A3

Příloha 2: MÍCHADLO B, DP - 002, A2