



# Nanášecí zařízení jemných částic na přízi obsahující nanovláknna

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojní inženýrství

*Autor práce:*

**Ondřej Ďuračka**

*Vedoucí práce:*

Ing. Josef Skřivánek, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů





## Zadání bakalářské práce

# Nanášecí zařízení jemných částic na přízi obsahující nanovlákná

*Jméno a příjmení:* **Ondřej Ďuračka**  
*Osobní číslo:* S18000029  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávací katedra:* Katedra textilních a jednoúčelových strojů  
*Akademický rok:* **2019/2020**

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši problematiky dopravy jemných částic (aktivní uhlí, jíł apod.)
2. Na základě provedené rešerše navrhňte vhodný způsob dodávání jemných částic na přízi.
3. Konstrukčně zpracujte variantu zařízení pro nanášení jemných částic na přízi obsahující nanovlákná
4. Vypracujte výrobní dokumentaci nového řešení.

Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy:  
Forma zpracování práce:  
Jazyk práce:

CAD dokumentace  
30 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### Seznam odborné literatury:

- [1] Jirsak, O., Sanetnik, F., Lukas, D., Kotek, V., Martinova, L., Chaloupek, J. (2005). A method of Nanofibers production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method. Patent, WO2005024101
- [2] Pokorny, P., et al. (2014). Effective AC needleless and collectorless electrospinning for yarn production. Physical Chemistry and Chemical Physics (PCCP), Royal Society of Chemistry, Cambridge. DOI: 10.1039/c4cp04346d.
- [3] FILATOV, Y., A. BUDYKA, V. KIRICHENKO a David LETTERMEN. *Electrospinning of micro-and nanofibers: fundamentals and applications in separation and filtration processes*. New York: Begell House, 2007. ISBN 978-1-56700-241-6.
- [4] JUVINALL, Robert C. a Kurt M. MARSHEK. *Fundamentals of machine component design*. 4th ed. Hoboken: John Wiley, 2006. ISBN 978-0-471-66177-1.

Vedoucí práce:

Ing. Josef Skřivánek, Ph.D.  
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání práce:

25. února 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

27. června 2021

Ondřej Ďuračka

# PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval především mé rodině a přátelům za jejich trpělivost a podporu při psaní této práce v takto obtížné době. Dále bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Josefu Skřivánkovi, Ph.D. za cenné rady a skvělé vedení. Na závěr bych rád poděkoval katedře textilních a jednoúčelových strojů na Technické univerzitě v Liberci za poskytnutí prostředků nutných k tvorbě této práce.

# ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá návrhem a především konstrukcí laboratorního zařízení pro nanášení aditiva do nanovlákněné vrstvy kompozitní příze. V této práci jsou jako aditivum použity velmi jemné částice. Účelem vytvořeného zařízení je rovnoměrný nános aditiva do nanovlákněné vrstvy s co největší účinností a opakovatelností.

V teoretické části jsou popsány vybrané technologie výroby nanovláken, jejich výhody a nevýhody. Dále je definován termín jemná částice, hlavně především problémy a rizika spojené s jejich pneumatickým přepravováním.

V praktické části jsou uvedeny konstrukční návrhy řešení pro nanášení jemných částic, diskutovány jejich výhody a nedostatky. Následně je vybrán návrh s nejlepšími vlastnostmi a zhotoven zkušební model, který je otestován v laboratoři. Výsledky funkčního modelu ukazují slibné výsledky konzistentního nánosu aditiva a také ukazují možnost ovládat koncentraci aditiv v nanovlákněné vrstvě příze pomocí změny koncentrace aditiva v zařízení.

**Klíčová slova:** nanovláknena, příze, jemné částice, aplikace aditiv

## **ANOTATION**

This bachelor thesis is focusing on design and especially construction of laboratory applicator of additives into the nanofiber layer of composite yarn. In this thesis the used additives are very fine particles. The focus of the created machine will be uniform application of additives, with highest possible efficiency and repeatability.

In theoretical part are described chosen technologies of nanofiber manufacturing, their advantages and disadvantages. Next is defined term fine particle, mainly the problems and dangers of their pneumatic conveying.

The practical part contains proposed designs of fine particle applicators, it also contains discussion focused on their advantages and deficiencies. Next is chosen the best design and created functioning model, which is tested in laboratory. Results of test run are showing that additives were successfully incorporated into the outer layer of nanofibers, and also that their concentration depends on concentration of additives in mixing chamber.

Key words: nanofibers, yarn, fine particle, application of additives

# OBSAH

Úvod.....	12
1 Výroba nanovláken.....	13
1.1 Drawing.....	13
1.2 Forcespinning.....	14
1.3 Meltblowing.....	15
1.4 Zvlákňování účinkem stejnosměrného proudu (DC elektrospinning).....	15
1.5 Zvlákňování účinkem střídavého proudu (AC elektrospinning).....	17
1.5.1 Příze s obsahem nanovláken.....	17
2 Doprava jemných částic.....	20
2.1 Fáze nastávající uvnitř potrubí.....	20
2.2 Problémy dopravy jemných částic.....	21
2.2.1 Opotřebení potrubí.....	21
2.2.2 Opotřebení přepravovaného materiálu.....	22
2.2.3 Zdravotní a bezpečnostní rizika při přepravě jemných částic.....	23
3 Teoretické návrhy nanášecích zařízení.....	24
3.1 Využití fluidizace aditiva.....	24
3.2 Průchod příze vířící komorou.....	25
3.3 Vířící komora napojena na trysku.....	26
4 Funkční model zařízení.....	27
4.1 Konstrukce vířící komory.....	28
4.2 Ejektor.....	29
4.2.1 CFD ejektoru.....	29
4.3 Nastavení pro zkušební provoz funkčního modelu.....	35
4.4 Experimentální ověření funkčního modelu.....	36



4.5	Poznatky z provozu funkčního modelu.....	37
5	Návrh upraveného modelu pro kontinuální Inkorporaci aditiv do nanovlákné vrstvy .....	38
5.1	Výpočet motoru pro použití v upraveném modelu.....	38
5.2	Zásobník aditiva .....	41
5.3	Úprava vřící komory .....	42
Závěr	.....	43

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKY
$\mu$	hmotnostní poměr	[1]
$c$	rychlost zvuku v médiu	[m/s]
$e$	vzdálenost od rotoru od středu nádoby	[mm]
$E$	excentricita	[1]
$E_k$	kinetická energie	[J]
$\dot{G}$	hmotnostní tok přepravovaných částic	[kg.s <sup>-2</sup> ]
$I$	proud	[A]
$J$	moment setrvačnosti	[g.cm <sup>2</sup> ]
$J_{RED}$	redukovaný moment setrvačnosti	[g.cm <sup>2</sup> ]
$k_M$	momentová konstanta	[Nm/A]
$m$	hmotnost	[kg]
$M$	Machovo číslo	[1]
$M_k$	silový moment působící na kolo	[Nm]
$M_R$	moment vyvolaný pasivními odpory motoru	[Nm]
$M_{ROZ}$	rozběhový moment	[Nm]
$M_v$	moment udržení stálé rychlosti	[Nm]
$M_{ZP}$	moment zrychlení posuvných hmot	[Nm]
$M_{ZR}$	moment zrychlení rotačních hmot	[Nm]
$n$	otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$p$	tlak	[Pa]
$\dot{Q}$	hmotnostní průtok média	[kg.s <sup>-2</sup> ]
$r$	poloměr nádoby	[mm]
$R$	odpor	[ $\Omega$ ]
$t$	čas	[s]
$U$	napětí	[V]
$u$	rychlost	[m/s]
$V$	objem	[dm <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	úhlové zrychlení	[rad/s <sup>2</sup> ]
$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	úhlová rychlost	[rad/s]

<b>ZKRATKA</b>	<b>VÝZNAM</b>
CFD	computational fluid dynamics
DNS	direct numerical simulation
LES	large Eddy simulation
PA6	polyamid 6
PC	polykarbonát
PES	polyester
PLA	polykyselina mléčná
PMMA	polymethylmetakrylát
PP	polypropylen
PTT	polytrimethylentereftalát
PVB	polyvinyl butyral
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations
SEM	rastrovací elektronový mikroskop

# ÚVOD

V současné době je výroba a práce s nanovláknami velice dynamicky se rozvíjející oblast, která si získala pozornost veřejnosti především díky událostem posledního roku. Ovšem kvůli průlomovým objevům, které proběhly od začátku milénia a umožnily výrazně zvýšit produktivitu výroby těchto vláken, se otevřela možnost jejich výroby v průmyslovém měřítku. Materiály obsahující tato vlákna se využívají zejména v medicínském, textilním a filtračním průmyslu. Do popředí technické výroby nanomateriálů se dostává přidávání různých aditiv za účelem zlepšení a získání nových technologických vlastností.

Cílem této bakalářské práce je vytvoření zařízení, které bude součástí technologické linky na výrobu kompozitní příze s obsahem nanovláken. Toto zařízení musí být schopné rovnoměrně nanášet aditivum do nanovláknenné vrstvy kompozitní příze, regulovat množství nanosených částic a zároveň nesmí poškozovat nanovláknennou vrstvu.

V teoretické části práce jsou popsány technologické postupy výroby nanovláken, především technologie AC a DC elektrospinning. Jelikož jsou aditivem jemné částice, budou takovéto částice definovány a také budou jmenovány problémy a rizika spojené s jejich pneumatickou dopravou. Dále budou popsány metody a zařízení pro generování podtlaku.

V praktické části budou odprezentovány návrhy konstrukcí zařízení pro nanášení jemných částic na přízi s obsahem nanovláken, popsání jejich předností a nedostatků. Bude zvolen nejvhodnější návrh a vytvořen funkční model, který bude zprovozněn. Na základě pozorování funkčnosti tohoto modelu bude zhodnocen proces nánosu. Ve finále bude vytvořen modifikovaný model funkčního zařízení, kde budou upraveny nedostatky zjištěné při jeho provozu nebo přidány funkce.

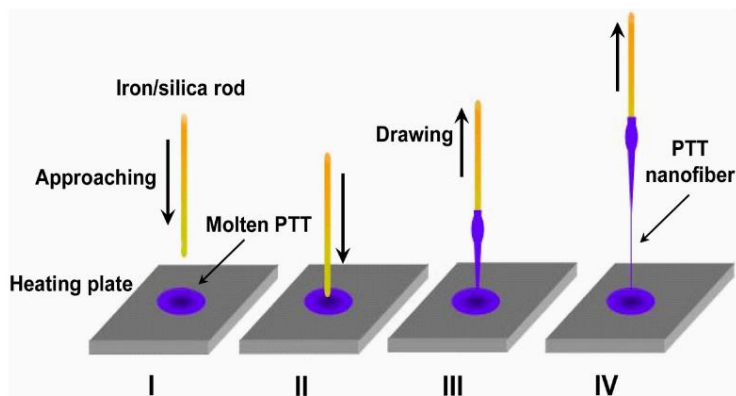
# 1 VÝROBA NANOVLÁKEN

Nanovlákná mají průměry menší než jeden mikrometr a jejich výroba se provádí z roztoků, případně tavenin polymerů. Hlavní princip výroby spočívá v tuhnutí polymeru vlivem odpaření rozpouštědla, případně zchladnutím polymeru. Metod výroby těchto vláken je několik, ale ty nejproduktivnější metody využívají elektrostatické síly k vytahování vláken.

## 1.1 Drawing

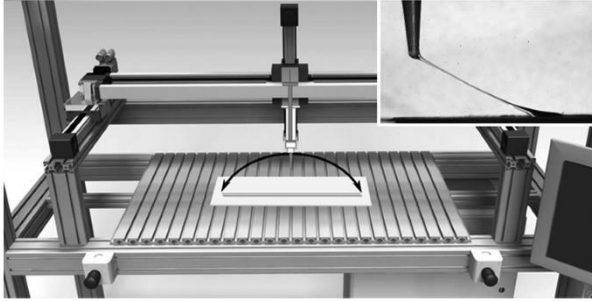
Drawing je málo produktivní metoda, která ale umožňuje dobře kontrolovatelné tažení jednotlivých vláken. Základní forma této metody je vložení mikropipety do roztoku polymeru a její následné kontrolované odtahování. Díky tomu dochází k dloužení vlákna a zároveň k odpařování rozpouštědla. [1]

Potenciální využití této metody je zejména v oblastech, kde je nutné vyrobit jednotlivé vlákno a také při vytváření uspořádané struktury z nanovláken. Drawing jednotlivých vláken pro výrobu základních optoelektronických členů (rozdělovače, slučovače) byl ověřen v práci [2], kde byla vyráběna nanovlákná z polytrimethyltereftalátu (PTT) a autor jejich výkon zhodnotil kladně.

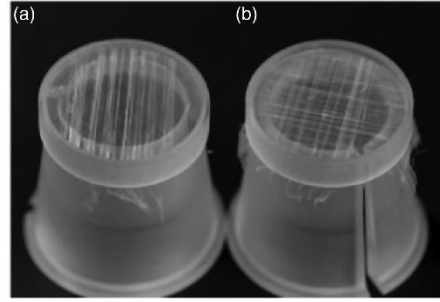


Obr. 1 Schéma výroby nanovláken pomocí drawingu [2]

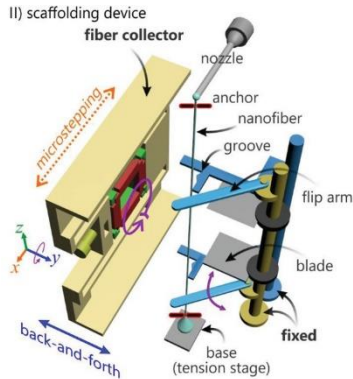
O použití uspořádaných nanovláknenných struktur se v tuto dobu mluví především v oblasti bioinženýrství. Tyto struktury byly v práci [3] vytvářeny na rámeček umístěný na pracovní desce portálového manipulátoru, kde místo efektoru byla připevněna injekční stříkačka, ze které se dávkoval roztok polymeru. Kombinací přesného dávkování a pohybu manipulátoru se vytvářela nanovlákná. Podobná metoda byla i v práci [4], kde byl rámeček umístěný v jednotce, která umožňovala lineární pohyb ve dvou osách a rotaci v jedné ose. K samotné tvorbě nanovlákná se využívala gravitační síla a dávkování z injekční stříkačky.



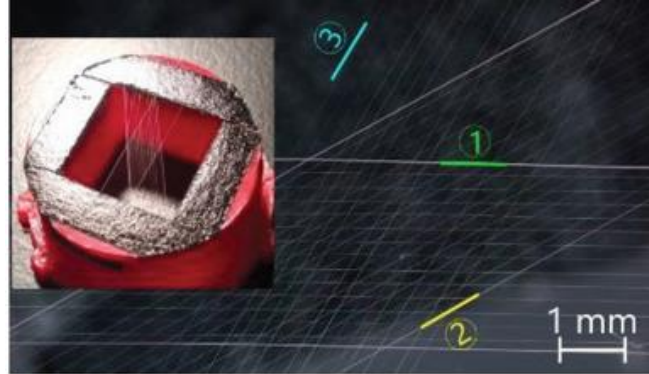
Obr. 2 Portálový manipulátor [3]



Obr. 3 Uspořádaná nanovláknenná struktura; a) vlákna v jednom směru; b) vlákna ve dvou směrech [3]



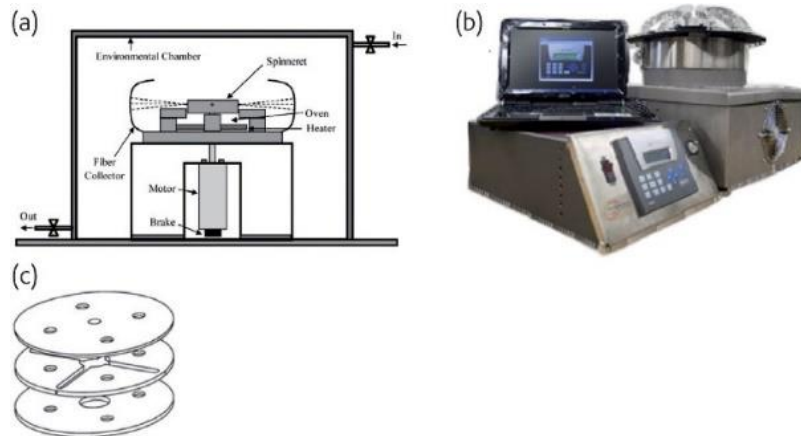
Obr. 4 Stroj pro tvorbu nanovláken gravitačním tažením [4]



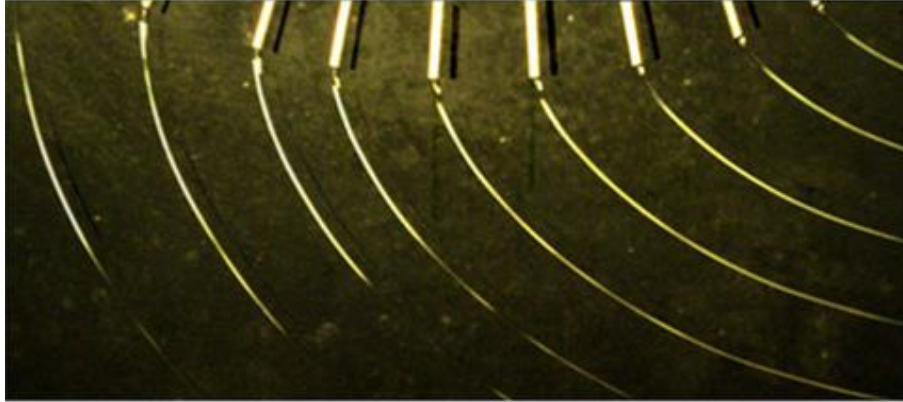
Obr. 5 Uspořádaná nanovláknenná struktura s vlákny ve třech směrech [4]

## 1.2 Forc spinning

Forc spinning je metoda s potenciálem pro průmyslové využití. Tato metoda využívá k dloužení vláken vliv odstředivé síly. Jelikož je tato metoda schopná zvláknovat roztoky i taveniny polymerů, což umožňuje použít velké spektrum materiálů. Hlavní částí zařízení pro tuto metodu je spinner, ten může být jak chlazený, tak i vytápěný. Do tohoto spinneru je přiváděn roztok, případně tavenina polymeru, ta je vlivem odstředivé síly tlačena do trysek, tyto trysky mohou mít k zajištění co nejlepších výsledků libovolný tvar. V okamžiku, kdy materiál opustí trysku, začne docházet k dloužení a tvoření vlákna. [5]



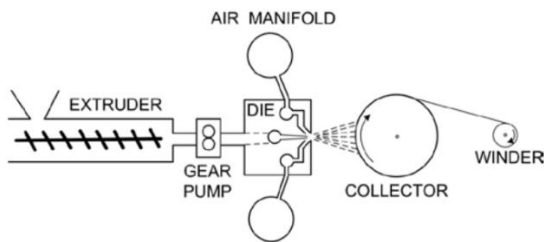
Obr. 6 Schéma (a), Prototyp (b), Spinner (c) [5]



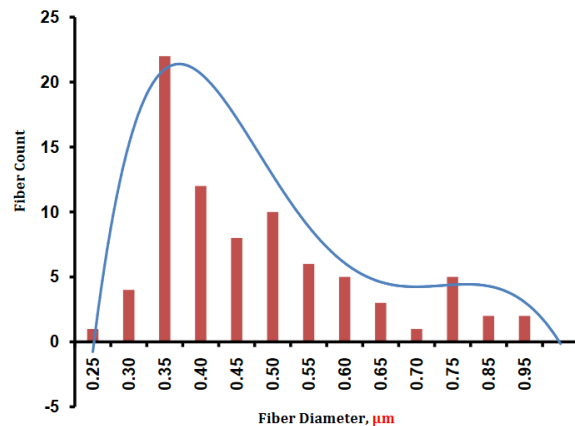
Obr. 7 Proložený snímek polymeru opouštějícího trysku [6]

### 1.3 Meltblowing

U této metody je k zvlákňování použita tavenina termoplastického polymeru. K zvlákňování dochází vlivem proudu horkého vzduchu, ten zároveň unáší vlákna na kolektor, kde chladnou a tvoří provázanou vrstvu. Hlavní výhodou je vysoká produktivita a absence potenciálně toxických rozpouštědel, ovšem vznikající vlákna mají poměrně širokou distribuci průměrů vláken. [7]



Obr. 8 Schéma zařízení pro meltblowing [7]

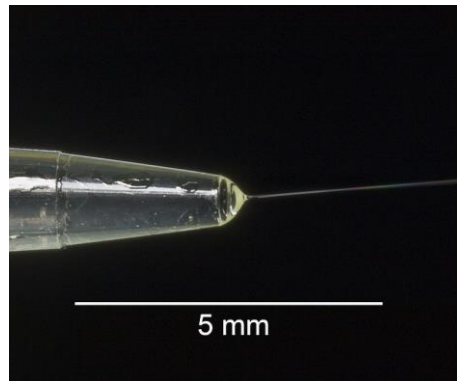


Obr. 9 Distribuce průměrů vláken [7]

### 1.4 Zvlákňování účinkem stejnosměrného proudu (DC elektrospinning)

Základem této metody jsou dvě elektrody, zvlákňovací elektroda a kolektor. Zvlákňovací elektroda je připojena ke kladnému potenciálu a je na ni přiváděn roztok polymeru. Kolektor je připojen buď k zápornému nebo nulovému potenciálu a mívá systém na odvod nanovláknenné vrstvy. [1]

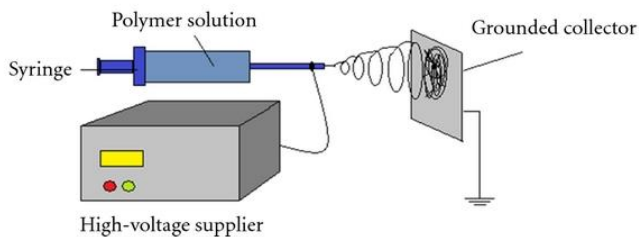
Vlákno samotné vzniká tím, že na kapku roztoku působí Coulombovy síly. Jakmile se zvýší náboj, naroste Coulombova síla a po překonání povrchového napětí polymeru dojde ke vzniku Taylorova kuželu. Při dalším nárůstu síly dojde k vytahování polymeru směrem ke kolektoru. Jelikož se během pohybu rychlost zvyšuje, dochází k zúžení vytahovaného polymeru. Současně se zúžením se také odpařuje rozpouštědlo, čímž vzniká velmi tenké vlákno. [1]



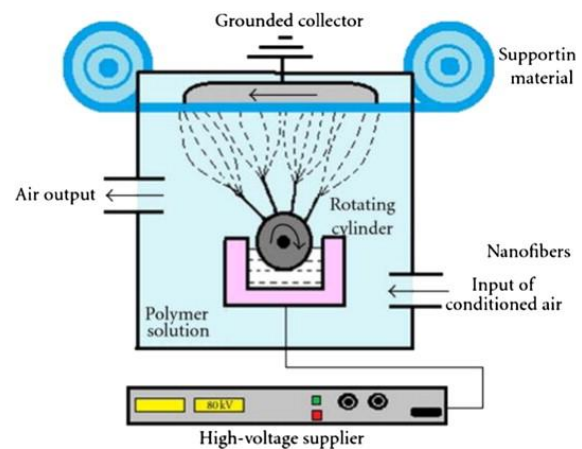
Obr. 10 Taylorův kužel, Robert Lamberts at The New Zealand Institute for Plant and Food Research Ltd

Základní verzí této metody byla injekční stříkačka, která fungovala zároveň jako elektroda a dávkovala roztok polymeru. Tato technologie také umožňuje vytvářet kompozitní vlákno použitím koaxiálních jehel. Pro zvýšení efektivity této technologie bylo zkoumáno několik modifikací. Jednou z nich bylo umístění několika injekčních stříkaček blízko sebe, což ale přinášelo problém se vzájemným ovlivňováním elektrických polí. Dalším problémem použití dávkování injekční stříkačkou je riziko ucpání jehly, to především při použití polymerních roztoků s vyšší hustotou nebo použitím roztoku obsahující částice. [8]

Další modifikací bylo opustit dávkování pomocí injekční stříkačky a přejít k zvláknování nanovláken z volné plochy roztoku polymeru na elektrodě. To umožňuje mít vysokou efektivitu výroby. Ovšem vlákna jsou vytvářena s různým průměrem a také není možné vytvářet kompozitní vlákna. Nejznámějším využitím této metody je Nanospider™, na kterém s českou společností Elmarco spolupracovala Technická univerzita v Liberci. U této technologie je elektrodou rotující válec, který je částečně ponořený v roztoku polymeru. Udává se střední tloušťka vláken 200 nm a výrobní kapacita až 50 miliónů metrů čtverečních za rok. [8]



Obr. 11 Schéma DC elektrospinningu s jehlou jako elektrodou [9]



Obr. 12 Schéma technologie Nanospider™ [9]

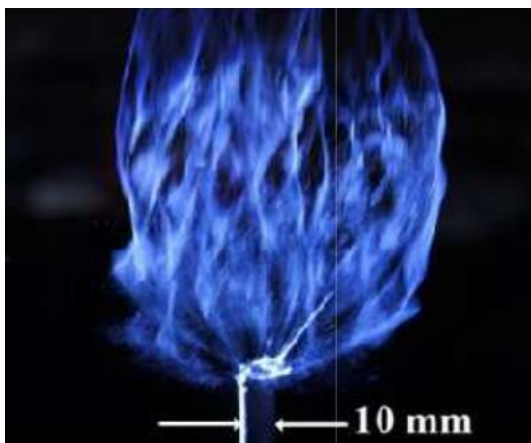


## 1.5 Zvlákňování účinkem střídavého proudu (AC elektrospinning)

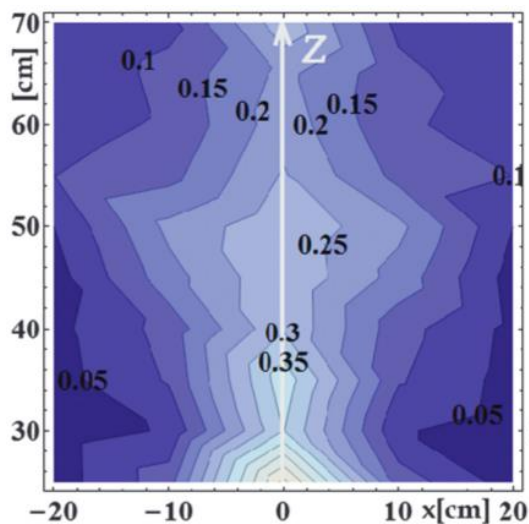
Princip je velice podobný DC elektrospinningu, ovšem díky použití střídavého napětí se z kapky roztoku polymeru tvoří několik Taylorových kuželů najednou, což umožňuje zvýšení produktivity. Ještě dalšího zvýšení produktivity se dosáhne výměnou jehlové elektrody za elektrodu, která umožňuje zvlákňování z volné hladiny. Další výhodou je schopnost vzniklých nanovláken stát se tzv. virtuálním kolektorem, což znamená, že se nemusí používat kolektor a technologie se lépe zapojí do technologického procesu. Vytvořená nanovlákná jsou unášena vzhůru od elektrody elektronovým větrem a při použití vhodných metod se s nimi dá manipulovat. [10]

Tabulka 1 Rychlosti zpracování roztoku polyvinyl butyralu (PVB) při napětí 30 kV, uváděno v ml/h [10]

	AC electrospinning	DC electrospinning
Zvlákňování s jehlou $\varnothing$ 0,7 mm jako elektrodou	80	1-3
Zvlákňování z volné hladiny roztoku polymeru na elektrodě $\varnothing$ 10 mm	180	30



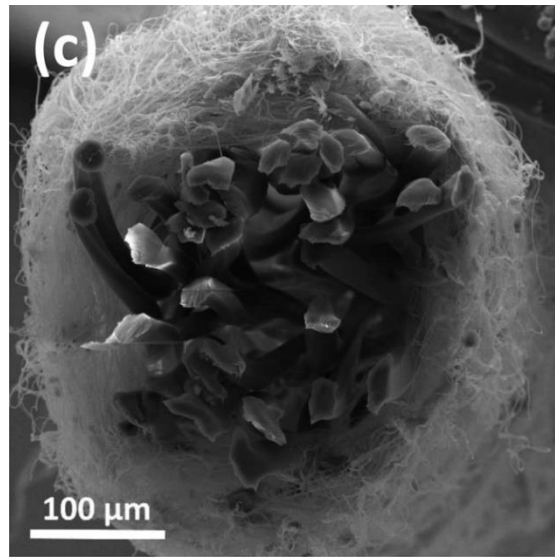
Obr. 13 Nanovláknenná vlečka stoupající od elektrody [10]



Obr. 14 Grafické zobrazení vertikální složky rychlosti elektronového větru okolo elektrody v m/s [10]

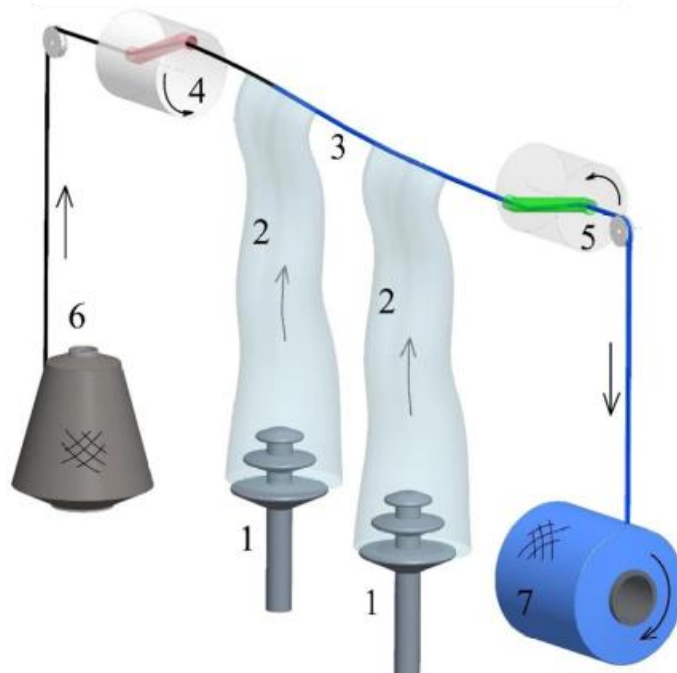
### 1.5.1 Příze s obsahem nanovláken

Tato příze je kompozitní, kde jednou částí je základová příze fungující jako jádro, která dává přízi mechanickou pevnost. Další částí je nanoobal, který jí dodává funkční vlastnosti. V laboratoři byla tato příze vyráběna rychlostí až 60 m/min, což už se přibližuje k rychlostem vhodným k použití v průmyslu. [11]



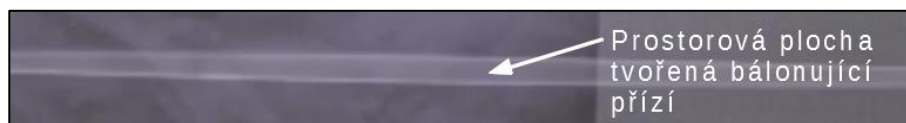
Obr. 15 Průřez kompozitní příze s jádrem z polyesteru (PES) 330 dtex a nanoobalem z polyamidu 6 (PA6) [11]

Na obr. 16 je vidět zařízení pro tvorbu kompozitní příze, kde se odvíjí základová příze (6), ta je vedena otvorem vedoucí skrz odvíjecí hlavu (4). Tento otvor je na straně, kde se odvíjí základová příze, umístěn v ose a na straně umístěné do prostoru stroje je otvor vyveden excentricky. Poté dochází k namotávání nanovláknenné vlečky (2) na základovou přízi (3). Takto vytvořená kompozitní příze je vedena skrz navíjecí hlavu (5), která má stejnou konstrukci jako odvíjecí hlava. Poslední krok je navíjení finálního produktu na cívku (7). [11]



Obr. 16 Schéma výroby příze s obsahem nanovláken; 1) elektroda 2) nanovláknenná vlečka 3) základová příze 4) odvíjecí hlava 5) navíjecí hlava 6) odvíjení základové příze 7) navíjení finálního produktu [11]

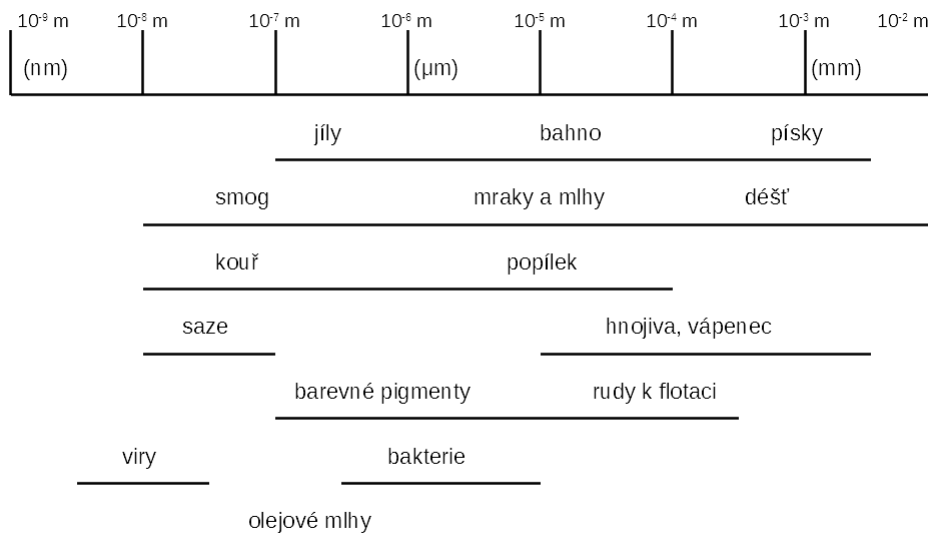
Příze mezi rotujícími částmi (4) a (5) balónuje. K tomuto jevu dochází v případě, že alespoň jeden z konců příze je uchycen excentricky. Pokud by se při balónování na procházející přízi fixoval nějaký bod, tak by se tento bod z pohledu pozorovatele pohyboval po trajektorii podobné šroubovici. Tento efekt pomáhá k namotávání nanovláknenné vlečky na základní přízi. [11]



Obr. 17 Balónující příze [11]

## 2 DOPRAVA JEMNÝCH ČÁSTIC

Nejdříve je nutné definovat jemné částice. Neexistuje jednotná definice jemných a hrubých částic, proto budu jako hraniční velikost uvádět  $3,5 \cdot 10^{-4}$  m [12]. Z toho plyne, že jemnými částicemi jsou zejména jíly, bahno, nebo například práškové aktivní uhlí. U práškového aktivního uhlí je uváděno, že 95 % částic je menší než  $7,5 \cdot 10^{-5}$  m [13].



Obr. 18 Velikost částic [14]

Tyto jemné částice je možné přepravovat užitím nespočtu dopravníků, kde by jejich popis a výpis předností či nedostatků zabral několik stovek stran. Proto se v rámci této práce budu věnovat pouze problematice dopravy jemných částic v plynném pomocném médiu, především vzduchu.

### 2.1 Fáze nastávající uvnitř potrubí

V závislosti na množství přepravovaných částic dochází uvnitř potrubí k různým fázím. Tyto fáze závisí na směšovacím poměru [12].

$$\mu = \frac{\dot{G}}{\dot{Q}} \quad (1)$$

V případě, kdy  $\mu \leq 15$ , nastává zředěná fáze. Materiál v této fázi tvoří suspenzi se vzduchem. Aby bylo možné dosáhnout této fáze, je nutná velká rychlost média. Když  $\mu > 15$ , nastává hustá fáze tuto fázi lze ještě rozdělit na dva druhy. Buď se na dně trubice začne tvořit polštář materiálu, který se bude pohybovat, nebo se utvoří zátka, která je protlačována potrubím. [12] [15] [16]

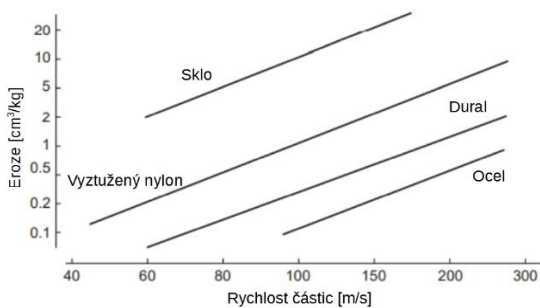
## 2.2 Problémy dopravy jemných částic

### 2.2.1 Opotřebení potrubí

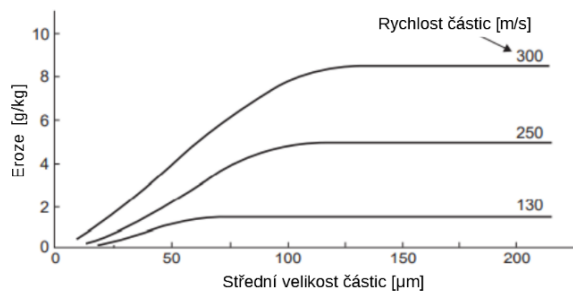
Jedním z největších problémů pneumatických dopravních systémů je opotřebení potrubí. Vlivů na rychlost opotřebení je několik, avšak nejdůležitější jsou rychlost, úhel dopadu, velikost a směšovací poměr částic.

Z grafů je vidět, že největší eroze nastává při přepravě ve zředěné fázi. Hlavním důvodem je vysoká rychlost média nutná k zajištění žádaného směšovací poměru. Největší problém nastává v ohybech, kdy částice kvůli setrvačnosti vystoupí z proudu média a naráží do stěn potrubí. U přímých částí potrubí eroze probíhá také, ale ne v takové míře jako v ohybech. U přímých úseků jsou důvodem eroze nárazy částic mezi sebou. Nárazem se částice vychýlí z proudu vzduchu a narazí do stěny potrubí.

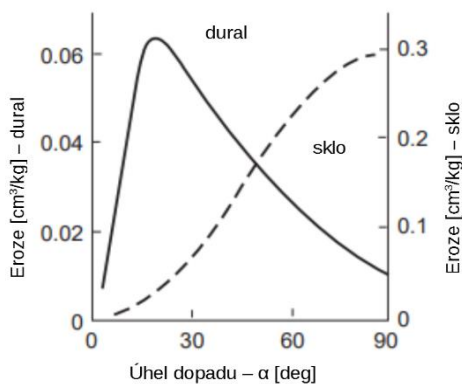
Erozi se nelze bránit přímo, ale je možné ji zpomalit úpravami v konstrukci. Například použitím vhodného materiálu potrubí v závislosti na přepravovaném materiálu a na poloměru ohybu. Dále je možné použít segmentovaný ohyb, kde se při poruše vymění jen poškozený segment, případně slepý T-ohyb, u kterého se při správném návrhu akumuluje materiál vytvářející ochranný polštář, který snižuje opotřebení jak potrubí, tak i přepravovaného materiálu. [16] [17]



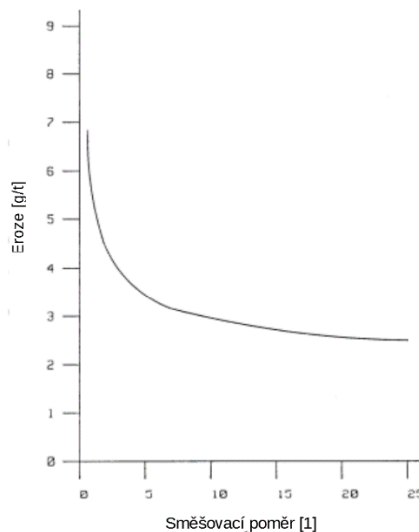
Obr. 19 Eroze v závislosti na rychlosti pro potrubí z různých materiálů, částicemi je křemík o velikosti 125–150  $\mu\text{m}$ , úhel dopadu částic je  $90^\circ$  [16] [18]



Obr. 20 Eroze v závislosti na velikosti částic a rychlosti, úhel dopadu  $90^\circ$  [16]



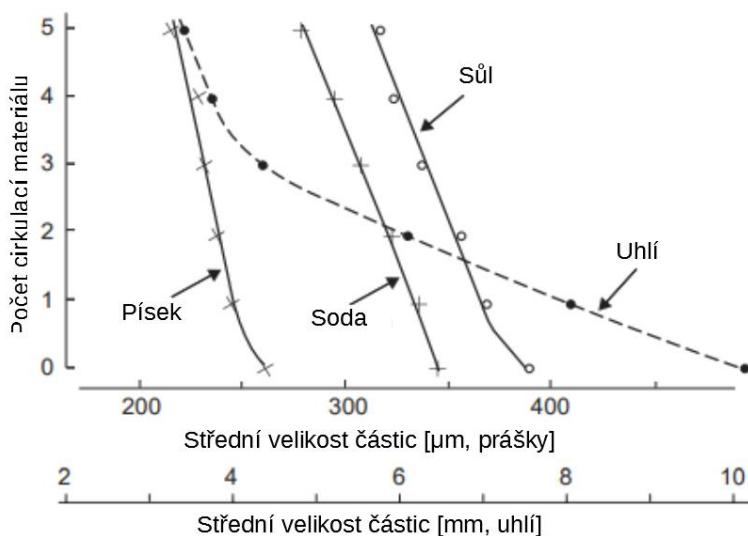
Obr. 21 Eroze v závislosti na úhlu dopadu a křehkosti potrubí, částicemi je písek o velikosti 60-125  $\mu\text{m}$ , rychlost částic 100 m/s [16]



Obr. 22 Eroze v závislosti na směšovacím poměru, částicemi je písek o velikosti 17  $\mu\text{m}$ , v 90° kolenu z nízkouhlíkové oceli [16]

## 2.2.2 Opotřebení přepravovaného materiálu

Jak částice narážením do stěn erodují potrubí, dochází zároveň i k jejich degradaci. To představuje problém pro částice, u kterých se vyžaduje, aby byly po dopravě nepoškozené. Toto je problém především při přepravě granulovaných plastů, kdy se při nárazu granule rozbijí a vzniká prach. Dále také se vlivem tření o stěnu začnou granulované plasty zvláknovat. Tyto vadné kusy je potom nutné odfiltrovat, jelikož by mohly mít negativní vliv na kvalitu následujících operací. [16]



Obr. 23 Opotřebení částic po cirkulaci systémem dlouhým 37,5 m, průměrem 53 mm, 7 x 90° ohyb s 6:1 průměr ohybu ku průměru potrubí [16]

Ke snížení opotřebení částic se používá stejných technik jako při snižování eroze potrubí. Tedy nejvíce pomáhá snížení rychlosti přepravy a konstrukční úpravy ohybů. U přepravování plastového granulátu lze omezit zvlákňování hrubším povrchem potrubí, ovšem pak začne vznikat více prachu. [16]

### 2.2.3 Zdravotní a bezpečnostní rizika při přepravě jemných částic

Přepravování jemných částic představuje značné zdravotní riziko, neboť jejich vdechování nebo kontakt s pokožkou může vést k závažným zdravotním problémům. Proto je nutné používat systémy, které omezí vniknutí částic do vnějšího prostředí a mít připravené mechanismy na zachycení nebo odvedení uniklých částic od obsluhy zařízení.

Dalším vážným problémem je značné riziko výbuchu vzniklé suspenze. Největší intenzita výbuchu nastává při stechiometrickém poměru a klesá směrem k mezím výbušnosti. Pro nejčastěji přepravované materiály se horní mez pohybuje v rozmezí 2 až 10 kg/m<sup>3</sup>, což odpovídá směšovacímu poměru 1,5 až 8. Z toho vyplývá, že největší riziko vznícení je u systémů, kde se částice přepravují ve zředěné fázi. Dále je vysoké nebezpečí výbuchu na vstupu a výstupu dopravního systému. Výrazné nebezpečí představuje sekundární exploze, jelikož bývá daleko ničivější. Sekundární exploze proběhne v případě, když první exploze zdvihne za léta naakumulovaný prach ve vnitřních prostorách a přivede ho do mezí výbušnosti.

Předcházet katastrofě se dá zabráněním výbuchu materiálu použitím inertního dopravního média a odstraněním potenciálních zdrojů jisker. Případně nasměrováním výbuchu pomocí protiexplozní membrány a deflektorů do míst, kde nedojde k ohrožení personálu. Poslední možnost je použití aktivní ochrany, kdy snímač při zaznamenání vyššího tlaku vlivem začínajícího vznícení zastaví příjem materiálu do systému, otevře poklopy, případně vypustí hasicí médium do systému. [16]



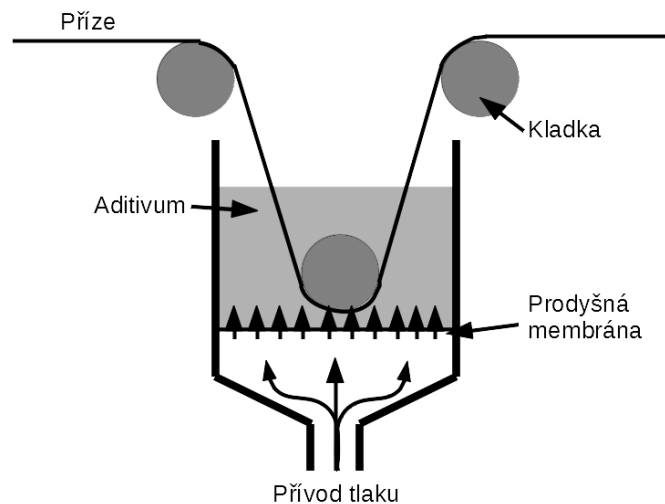
Obr. 24 Protiexplozní membrány na silu [19]



Obr. 25 Hasicí systém [20]

# 3 TEORETICKÉ NÁVRHY NANÁŠECÍCH ZAŘÍZENÍ

## 3.1 Využití fluidizace aditiva



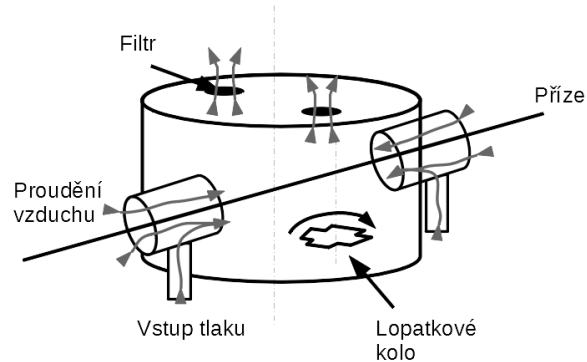
Obr. 26 Schéma pro nanášení jemných částic pomocí fluidizace aditiva

Tento návrh využívá toho, že se syký materiál vlivem proudícího vzduchu fluidizuje. Fluidizace je jev, při kterém se pevné látky začnou chovat jako kapaliny vlivem tekutiny, která proudí od spodu nádoby směrem vzhůru [21]. Díky tomuto jevu by mělo být možné přízi vést přímo skrz aditivum, což by zajistilo prakticky 100% pokrytí příze aditivem. Další výhodou je možnost používat i kapalně aditivum a také jednoduchost konstrukce.

Na druhou stranu nelze nijak regulovat objem naneseného aditiva. Naváděcí kladka může poškozovat vytvořenou vrstvu nanovláken a také bude ovlivňovat parametry „balónu“ příze, což může vést k horšímu vytváření nanovlákněné vrstvy. Také je nutné v případě použití jemných částic vytvořit vnější kryt, který by zabraňoval úniku částic do zbytku stroje. Vzhledem k nemožnosti regulovat objem naneseného aditiva a také riziku poškození nanovlákněné vrstvy, je tento návrh nevhodný.



### 3.2 Průchod příze vířící komorou

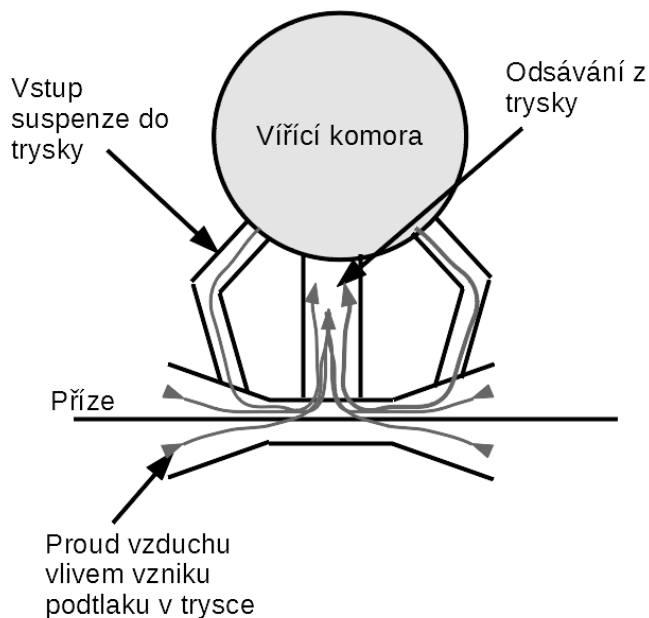


Obr. 27 Schéma průchodu příze nanášecí komorou

U tohoto návrhu je válcová komora s excentricky uloženým lopátkovým kolem. To svou rotací vytváří suspenzi, která se skládá z aditiva a vzduchu, ta se uvnitř komory udržuje pomocí dvou ejektorů, které fungují jako aerodynamické těsnění. Příze je vedena do komory skrz zmíněné ejektory. U této konstrukce by teoreticky mělo být možné ovládat objem nanesených aditiv pomocí otáček lopátkového kola a koncentrací aditiva v komoře.

V tomto řešení je hlavní problém konstrukce ejektorů. Jelikož příze balónuje, je nutné vytvořit ejektory s dostatečně velkým otvorem tak, aby se příze neotírala o stěnu a nedocházelo k poškozování nanovláknenné vrstvy. Ovšem při tomto zvětšení se bude obtížně předvídat chování ejektorů, a to především při nárůstu tlaku uvnitř komory vlivem ucpávání filtrů.

### 3.3 Vířící komora napojena na trysku



Obr. 28 Schéma pro nanášení aditiva pomocí trysky spojené s vířící komorou

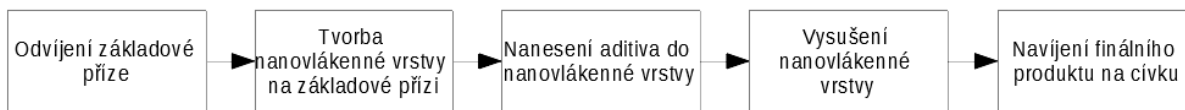
Zde je využita vířící komora předchozího návrhu, ale je umístěna mimo oblast, kde dochází k nánosu aditiv. To dovoluje zmenšit ejektory, ale musí být zkonstruována nanášecí tryska. Suspenze z jemných částic a vzduchu je tedy vytvořena ve vířící komoře a následně pomocí ejektorů dopravena do nanášecí trysky. Z nanášecí trysky se pomocí ejektoru odtahuje přebytečné aditivum zpět do vířící komory.

Výhodou tohoto návrhu je možnost umístit nanášecí trysku přímo do stroje a vířící komoru mít lehce přístupnou vně stroje. Dále je teoretická možnost pomocí geometrie trysky a rychlosti přívodu aditiva ovládat objem naneseného aditiva na přízi.

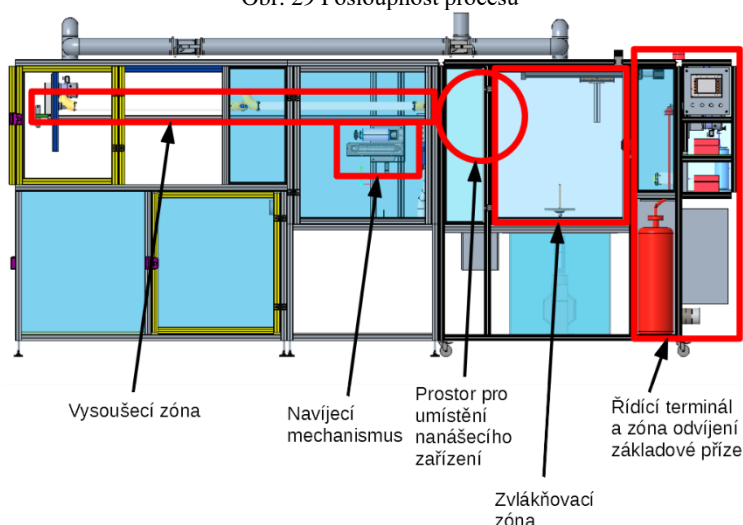
Hlavní nevýhodou je složitá geometrie nanášecí trysky. A také nutnost zajistit, aby odtahový ejektor měl vyšší hmotnostní průtok než ejektory přivádějící suspenzi do trysky. Tím se zabrání úniku aditiva z trysky do stroje.

## 4 FUNKČNÍ MODEL ZAŘÍZENÍ

Jelikož bude nanášecí zařízení umístěno do již postaveného a fungujícího stroje, je důležité brát ohledy na rozměry zařízení. Dále je nutné vzít v potaz sled operací tak, aby příze nemusela být složitě vedena vnitřkem stroje pomocí systému kladek. Na obr. 29 je vidět sled operací, kde byl nános aditiva umístěn ještě před vysoušením. Důvodem je především zajištění dostatečné přilnavosti aditiva k nanovlákněné vrstvě.



Obr. 29 Posloupnost procesů



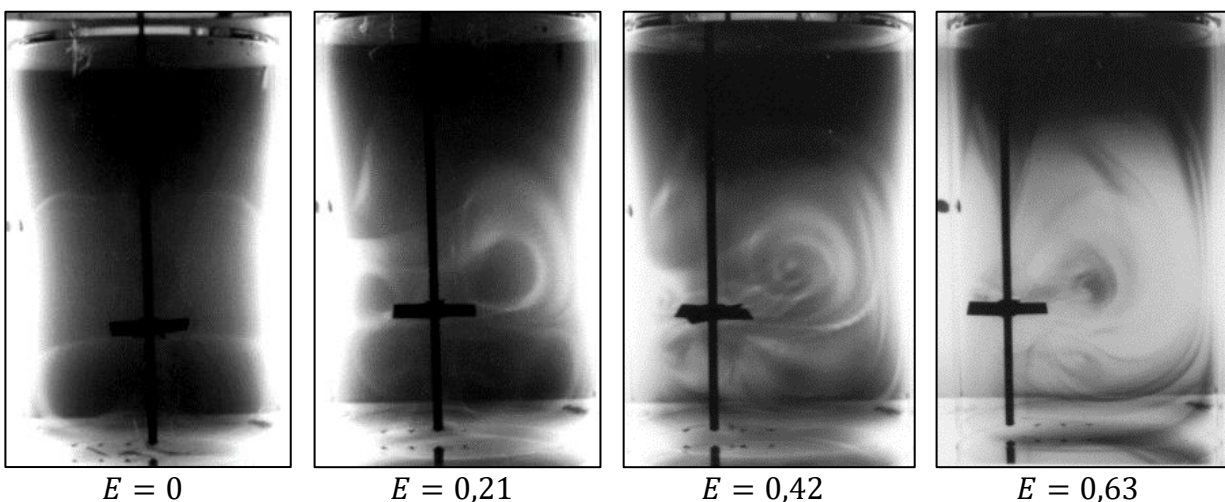
Obr. 30 Zóny stroje

Pro výrobu funkčního modelu byl zvolen návrh, při kterém prochází příze vřící komorou, jak je vidět v kapitole 3.2 na obr. 27. Hlavním důvodem byl předpoklad rovnoměrného pokrytí vzniklé nanovlákněné vrstvy aditivem a teoretická možnost ovládní nanoseného objemu aditiva otáčkami motoru a koncentrací aditiva ve vřící komoře. Další dobrou vlastností tohoto návrhu je schopnost téměř dokonale zabránit úniku aditiva a jednoduchá konstrukce. Základem vřící komory je válcová nádoba s excentricky uloženým lopatkovým kolem uvnitř této nádoby. Důvodem pro excentrické uložení kola je snaha o vytvoření co největšího chaosu v nádobě, aby se částice pokud možno pohybovaly v jejím celém objemu.

## 4.1 Konstrukce vířící komory

Na obr. 31 je vidět stav tekutin uvnitř nádoby 30 s po přidání kyselého traceru, excentricita zde byla autory [22] popsána jako bezrozměrná veličina. Tmavá barva označuje homogenní část, ta po promísení s tracerem zesvětlá. Na obrázcích je jasně vidět, že s rostoucí excentricitou dochází k rychlejšímu promísení. [22]

$$E = \frac{e}{r} \quad (2)$$

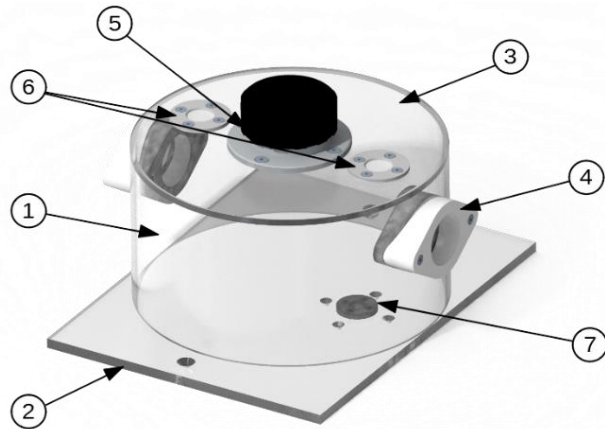


Obr. 31 Snímky pořízeny při laminárním proudění  $Re = 25$ , 30 s po přidání traceru [22]

Na obr. 32 je vidět, že vířící komora je tvořena ze tří hlavních částí, které jsou vzájemně slepeny a stmeleny. Základna vířící komory (2) je tvořena průhlednou polymethylmethakrylátovou (PMMA) deskou o tloušťce 8 mm, k té je připevněna příruba (7) zabraňující vniku částic do motorové jednotky. Na této základní desce je také vyvrtáno i několik otvorů. Ty slouží k uchycení motorové jednotky ke komoře a k uchycení komory k hliníkovému profilu.

Stěna vířící komory (1) je vytvořena z průhledné polykarbonátové (PC) trubky o tloušťce 4 mm, kam jsou naproti sobě vyvrtány dva otvory, do kterých jsou uloženy dvoudílné příruby (4) pro ejektory. Tyto příruby jsou vyrobeny pomocí 3D tisku z polykyseliny mléčné (PLA).

Poslední částí je víko komory (3), ke kterému jsou mechanicky připevněny tři příruby. Velká příruba (5) je opatřena závitem a víčkem. Tato příruba slouží k doplňování aditiva do komory. Zbylé dvě příruby (6) slouží k přidržení filtrační textilie.



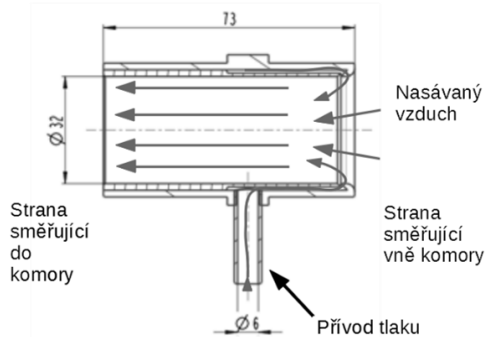
Obr. 32 Render vřící komory



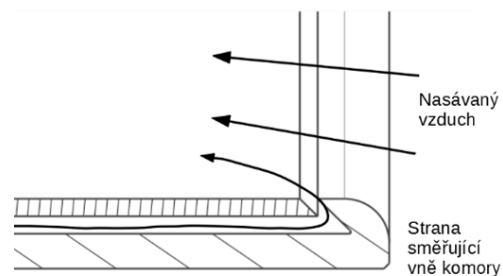
Obr. 33 Render funkčního modelu

## 4.2 Ejektor

Dílece ejektoru jsou vyrobeny z hliníku a jejich vzájemná soudržnost je zajištěna nalisováním a lepením. Základní geometrie ejektoru byla převzata z jiného projektu, kde se využíval k nanášení jemných částic přímo z komory na plošný nanovlákněný útvar. Konstrukčně se jedná o dvouplášťovou trubku, ke které je připojen přívod tlakového vzduchu. Mezera mezi trubkami je na jednom konci zaslepena a na druhém konci je výstup orientován tak, aby vznikl unášivý proud vzduchu. Zásadní změny jsou v celkových rozměrech, kde průměr ejektoru byl přibližně zdvojnásoben. To vede k problémům zmíněných v kapitole 0. Zbylé úpravy dílců byly provedeny z důvodu zjednodušení výroby.



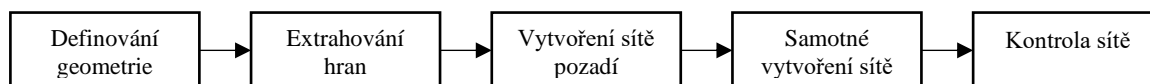
Obr. 34 Geometrie ejektoru



Obr. 35 Detail záhybu uvnitř ejektoru

### 4.2.1 CFD ejektoru

CFD simulace jsou velmi komplexním oborem, ve kterém stačí pouze malá chyba a výsledky budou dramaticky ovlivněny. V tom nejhorším případě budou výsledky vypadat v pořádku, ale budou se výrazně lišit od experimentů. Proto je dobré ověřit finální výsledek simulace pomocí experimentu, následně provést úpravy výpočtového modelu a předpokladů tak, aby se simulace a experiment lišil co nejméně. Porovnávání výsledků simulace a experimentu ovšem není v rozsahu této práce, proto je nutné brát tyto výsledky pouze jako informativní. V této práci bude využit opensource program OpenFOAM.



Obr. 36 Proces tvorby sítě

Ještě před samotnou tvorbou sítě je nutné vytvořit geometrii. Ta byla vytvořena v programu SALOME verze 9.6.0. V tomto programu ještě došlo k rozdělení a pojmenování jednotlivých ploch tak, aby na ně mohly být aplikovány okrajové podmínky. Dále také byly v modelu vytvořeny oblasti, ve kterých se definovalo zjemnění sítě. Jelikož SALOME nepodporuje export tzv. „multisolid STL“ bylo nutné z hlavní části geometrie obsahující popis ploch vytvořit prvotní nestrukturovanou síť. Ta se exportovala ve formátu .unv, tento soubor byl následně kombinací příkazů ideasUnvToFoam a foamToSurface převeden do formátu .stl. Díky tomu se zachovala designace jednotlivých ploch. Tento soubor byl nakonec ještě ručně rozdělen na několik .stl souborů obsahující pouze specifikované plochy. Oblasti které určovaly zjemnění sítě, se mohly exportovat přímo ze SALOME ve formátu .stl.

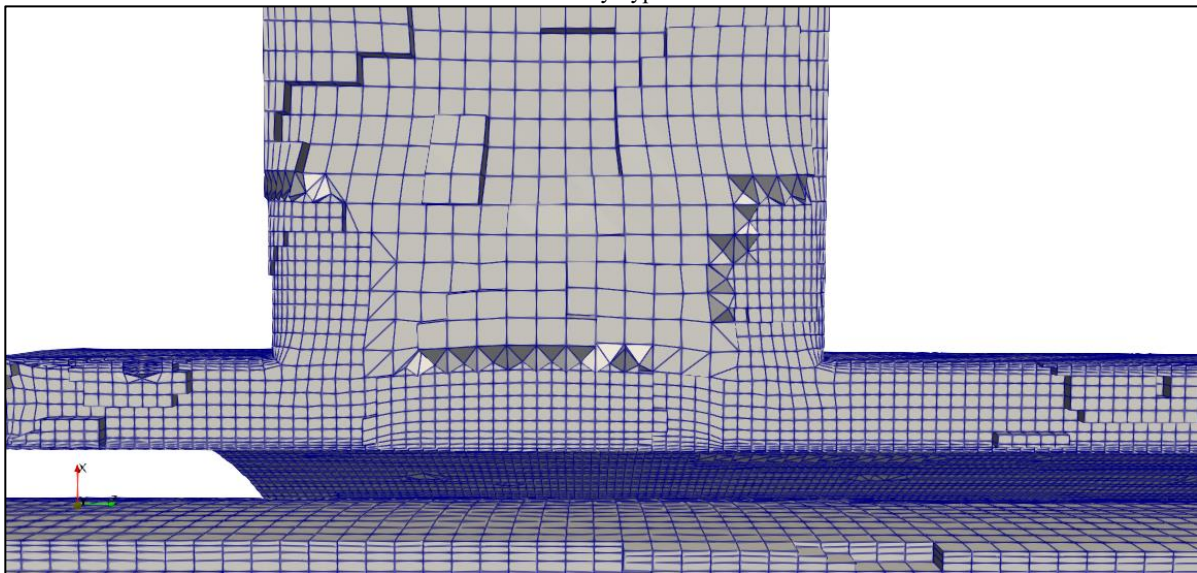
Dále byla použita utilita surfaceFeatures, která pomocí slovníku surfaceFeaturesDict extrahovala hrany z definovaných .stl souborů do formátu .eMesh. To bylo provedeno z důvodu explicitní definice hran, jelikož snappyHexMesh dosahoval při testech lepších výsledků než při použití implicitně definovaných hran. Síť pozadí je tvořena šestistěny a pro nejlepší výsledky jsou elementy krychlové. K tvorbě byla použita utilita blockMesh, která si bere hodnoty z blockMeshDict.

Samotná síť byla vytvořena pomocí utility snappyHexMesh. V souboru snappyHexMeshDict se nachází nastavení jednotlivých částí tvorby sítě, další informace o funkcích a průběhu tvorby sítě lze zjistit přímo z dokumentace [23]. Jako poslední se spustí utilita checkMesh, která zkontroluje stav výsledné sítě.

```
Checking geometry...
Overall domain bounding box (-0.017998972 -0.01799984 0) (0.023
0.017999701 0.073004001)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (9.6638587e-16 -1.4981193e-16 -2.0774156e-17) OK.
Max cell openness = 3.2950865e-16 OK.
Max aspect ratio = 9.1768308 OK.
Minimum face area = 7.0260883e-10. Maximum face area = 6.6719949e-
06. Face area magnitudes OK.
Min volume = 4.1834093e-13. Max volume = 1.6802306e-08. Total volume
= 6.2650968e-05. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 64.999611 average: 7.3824847
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 3.1378469 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

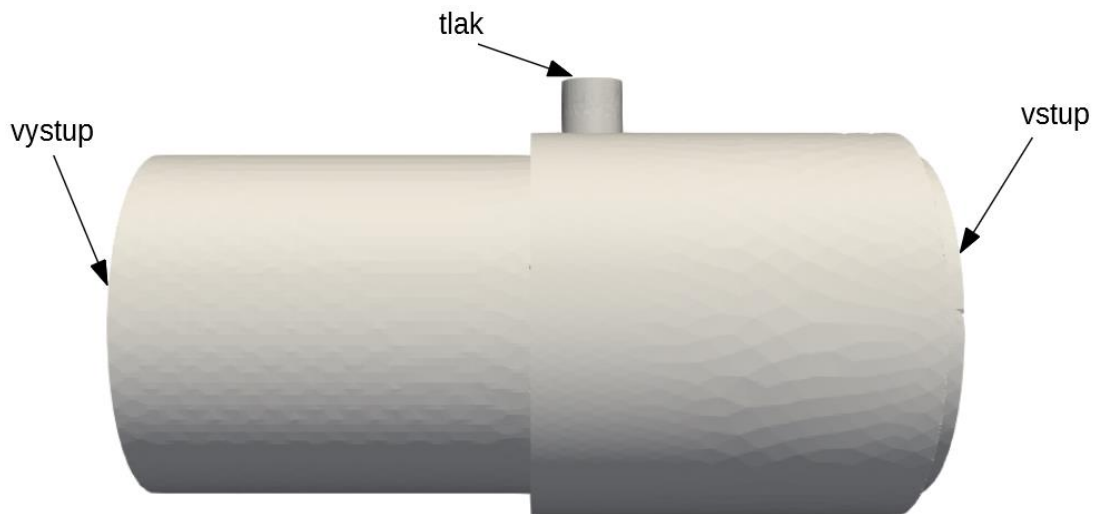
Mesh OK.
```

Obr. 37 Poslední řádky výpisu z checkMesh



Obr. 38 Detail sítě v okolí přípojky tlaku

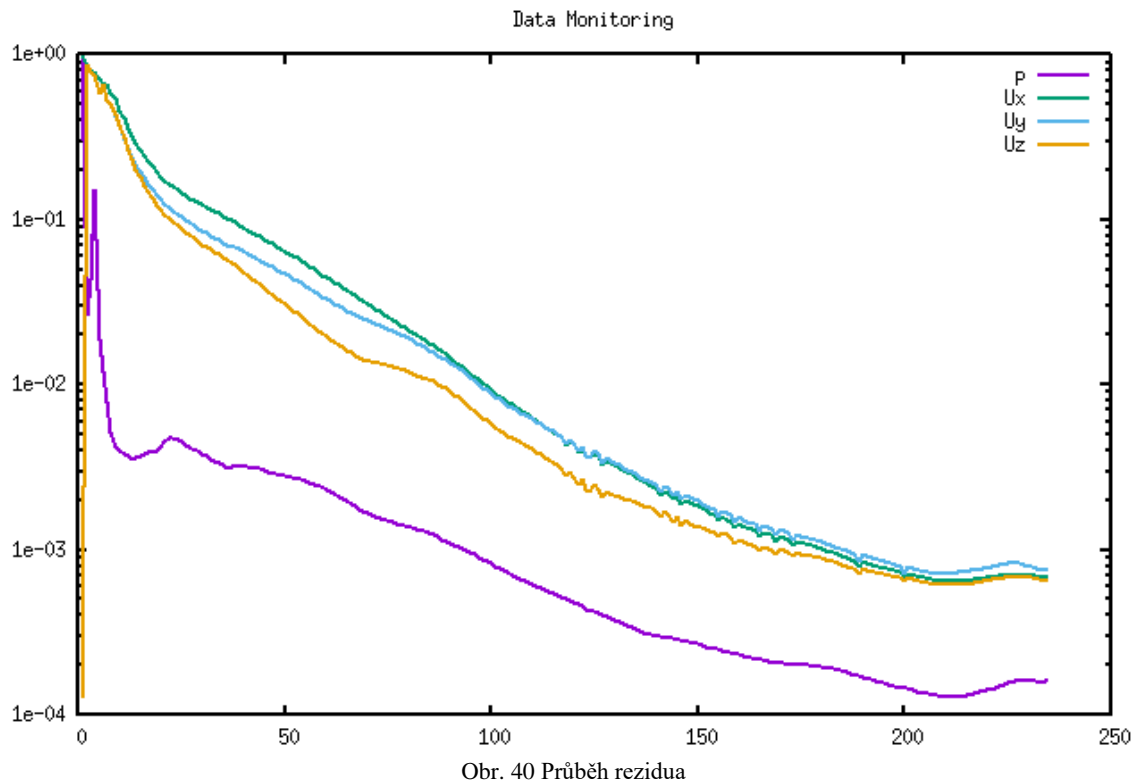
Vzhledem ke složitosti celého modelu byly okrajové podmínky stanoveny tak, aby docházelo k co nejjednoduššímu případu. To sice nereflektovalo skutečné použití, ale umožnilo to vizualizovat chování ejektoru s vyšší šancí na konvergenci než při použití skutečných podmínek. Zde to znamenalo ustálené nestlačitelné proudění. Okrajové podmínky na vstupu tlakové přípojky byly nastaveny na rychlost  $40 \text{ m/s}$  vstupujících do ejektoru, na vstupu a výstupu ejektoru byl nastaven tlak  $0 \text{ Pa}$ .



Obr. 39 Okrajové podmínky

Samotný výpočet byl proveden v programu OpenFOAM za použití modelování typu RANS, které počítá střední hodnotu rychlosti, na rozdíl od metod LES, nebo DNS menší náročnost na síť. Pro výpočet byl použit řešič simpleFoam s  $k-\omega$  SST se základními koeficienty pro modelování interakce tekutiny se stěnou. Jak je vidět z obr. 40, hodnoty rezidua se po 200 iteracích dostaly na hodnotu  $1 \cdot 10^{-3}$  a začaly oscilovat. Vzhledem k malé hodnotě rezidua byl výpočet považován za úspěšný a mohl být ukončen.





Postprocessing byl proveden v programu ParaView verze 5.9.0. Jelikož se při výpočtu používal řešič simpleFoam, je tlak vypočten ve formě  $\frac{p}{\rho}$ . proto pro získání správné hodnoty tlaku je nutné výsledné hodnoty vynásobit hustotou tekutiny, v tomto případě vzduchu.





Obr. 42 Řez ejektorem zobracující přetlak/podtlak v ejektoru v Pa

Jak je vidět na obr. 41, je zde maximální rychlost  $94 \text{ m/s}$ , což je už na hranici stlačitelnosti, jelikož se dá proudění brát jako nestlačitelné maximálně do rychlosti  $0,3 M$ . Ze vzorce (3) lze dopočítat, že maximální rychlost, do které se dá vzduch brát jako nestlačitelný, je  $102 \text{ m/s}$ .

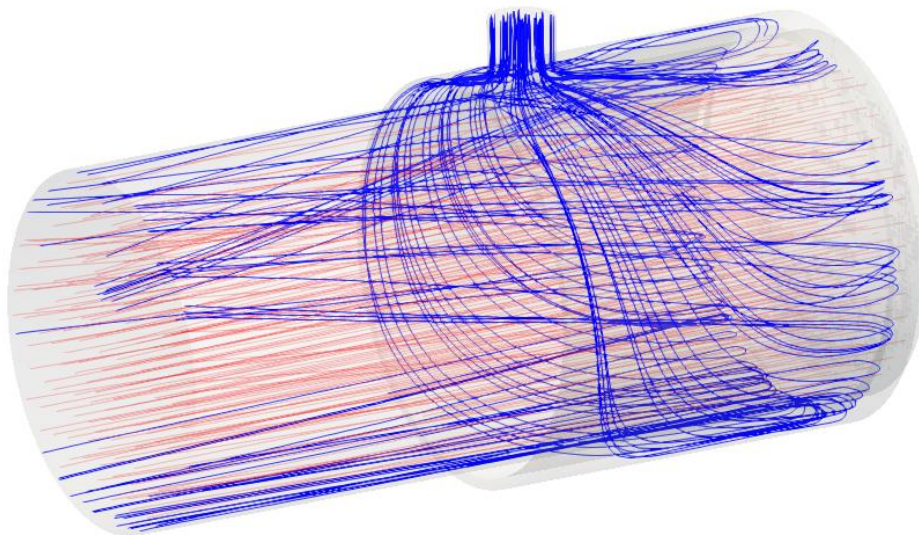
$$u = M \cdot c \quad (3)$$

$u$  – lokální rychlost tekutiny

$M$  – lokální Machovo číslo

$c$  – rychlost zvuku v médiu (přibližně  $340 \text{ m/s}$  pro vzduch při  $15 \text{ °C}$ )

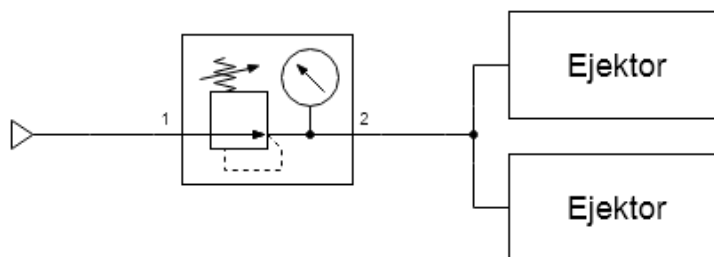
Také byl vypočítán přetlak na vstupu o hodnotě  $0,038 \text{ bar}$ , ovšem nastavení tohoto přetlaku je prakticky nemožné. Proto by v rámci získání správných výsledků bylo nutné zjemnit síť v okolí rozdělování proudů od tlakové přípojky a přejít na řešič `rhoSimpleFoam`, který už bere v potaz stlačitelnost tekutiny. Tím by se dalo použít vyšších tlaků na vstupu tlakové přípojky. Ovšem díky složitosti nastavení a časové náročnosti těchto výpočtů budou použity stávající výsledky.



Obr. 43 Proudnice; modré - přívod tlaku, červené - vstup

### 4.3 Nastavení pro zkušební provoz funkčního modelu

Pro zkušební provoz byl použit tlakový vzduch z rozvodů uvnitř budovy bez přidání mazacích olejů. Pomocí redukčního ventilu s manometrem byl nastaven přívodní tlak vzduchu do ejektorů na 0,5 bar.



Obr. 44 Schéma pneumatického zapojení funkčního modelu

Laboratorním elektrickým zdrojem bylo nastaveno přívodní napětí do DC motoru na hodnotu 27,4 V, při této hodnotě napětí laboratorní zdroj zobrazoval proudovou zátěž o hodnotě 0,8 A. Pomocí vztahu (4) lze snadno dopočítat vlastní otáčky motoru a silový moment, který na lopatkové kolo vyvozuje odpor vzduchu při vypočtených otáčkách. Vzorci a elektromechanické parametry, které se v něm vyskytují, byly převzaty z katalogu Faulhaber [25].

$$n = \frac{U - R \cdot I}{2\pi \cdot k_M} \quad (4)$$

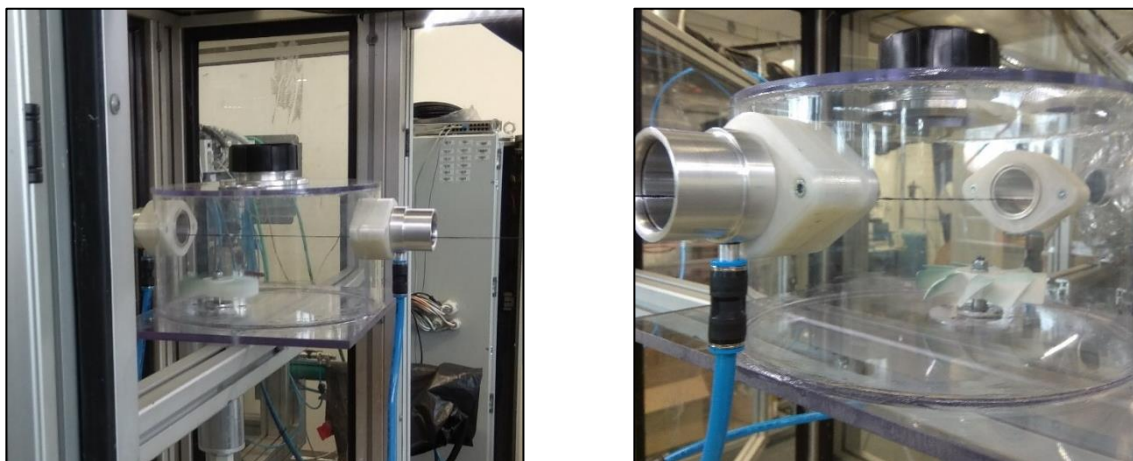
$$M_k = I \cdot k_M - M_R \quad (5)$$

Tabulka 2 Elektromechanické parametry motoru a vypočtené hodnoty

$U = 27,4 \text{ V}$	napětí zdroje
$R = 6,78 \Omega$	vnitřní odpor motoru
$I = 0,8 \text{ A}$	proudová zátěž
$k_M = 52,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$	momentová konstanta motoru
$M_R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$	silový moment vyvolaný pasivními odpory motoru
$n = 3989 \text{ min}^{-1}$	vypočtené otáčky motoru
$M_k = 34 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$	vypočtený silový moment, působící na lopatkové kolo vlivem odporu vzduchu

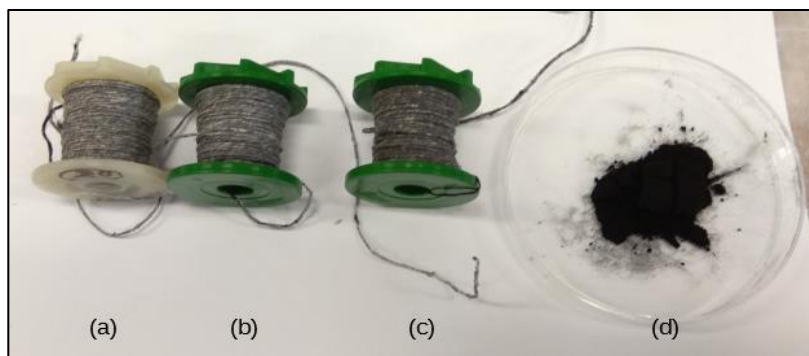
#### 4.4 Experimentální ověření funkčního modelu

Experiment měl jako první cíl ověřit úspěšný nános aditiva do nanovlákněné vrstvy. Druhým cílem bylo ověření, jestli se na třech vzorcích výrazně změní objem nanoseného aditiva při výrazné změně koncentrace aditiva v komoře. Použitá základová příže měla 1200 dtex a z polypropylenu (PP). Pro výpočty koncentrace se vnitřní prostor vířící komory zjednodušil na válec o průměru 222 mm a výšce 120 mm, což dává celkový vnitřní objem 4,645 l.

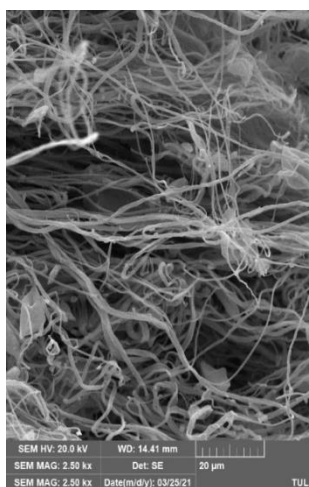


Obr. 45 Funkční model uvnitř stroje

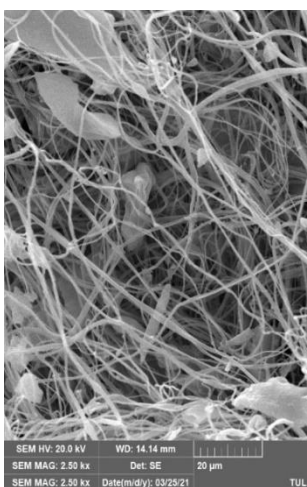
První cíl byl ověřen pouze vizuálně pomocí 1,4 g aditiva, což odpovídá hmotnostní koncentraci 0,3 g/l. Toto se zároveň stalo prvním vzorkem pro ověření druhého cíle. Při výrobě dalších vzorků nastal problém s reziduem aditiva po předchozím vzorku. Tento problém se zmírnil dostatečně dlouhou dobou provozu tak, aby ve vířící komoře zůstalo co nejméně aditiva. Další snahou o zmírnění tohoto efektu bylo použití násobků první dávky u zbylých dvou vzorků, jmenovitě 2,8 g a 4,2 g. Proto lze předpokládat, že tento jev nemá žádný efekt na finálním zhodnocení funkčního modelu. Jelikož se pouze zkoumalo, jestli při nárůstu koncentrace aditiva v komoře, naroste i množství nanosených částic.



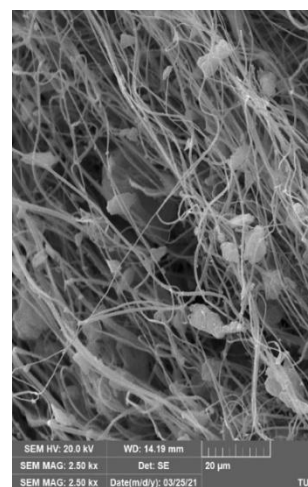
Obr. 46 Cívky se zkušebními vzorky; a) 1,4 g (0,3 g/l) aditiva; b) 2,8 g (0,6 g/l) aditiva; c) 4,2 g (0,9 g/l) aditiva; d) 1,4 g aditiva



1,4 g (0,3 g/l) aditiva



2,8 g (0,6 g/l) aditiva



4,2 g (0,9 g/l) aditiva

Obr. 47 Snímky ze SEM, 2500krát zvětšené

## 4.5 Poznatky z provozu funkčního modelu

Ze snímků z rastrovacího elektronového mikroskopu je evidentní, že počáteční předpoklad byl správný a množství naneseného aditiva lze regulovat koncentrací aditiva uvnitř vířící komory. Také bylo zjištěno, že aditivum nebylo nanášeno pouze na povrch nanovlákněné vrstvy, ale i hluboko uvnitř.

Na základě zkušeností ze zkušebního provozu funkčního modelu je nutné přidat systém na doplňování aditiva během provozu. Tento systém bude obsahovat zásobník, dávkovací zařízení a zařízení pro měření koncentrace aditiv v komoře. Dále je nutné ke stávajícímu modelu přidat aktivní odsávání. Důvodem je již zmíněná nepředvídatelnost chování ejektorů při vyšším tlaku ve vířící komoře. Ejektory se při prvních dvou vzorcích zdály plně funkční, ovšem při větší dávce aditiva začalo docházet k úniku aditiva ejektory do vnitřku stroje. Přidáním aktivního odsávání vznikne ve vířící komoře podtlak, který zlepší funkčnost ejektorů, které budou sloužit pouze ke korekcím v případě nutnosti.

## 5 NÁVRH UPRAVENÉHO MODELU PRO KONTINUÁLNÍ INKORPORACI ADITIV DO NANOVLÁKENNÉ VRSTVY

### 5.1 Výpočet motoru pro použití v upraveném modelu

Pro pohon lopatkového kola bude použit 36 V DC mikromotor 2657 CR od firmy Faulhaber. Jelikož je k dispozici pouze 30 V laboratorní zdroj, bude výpočet proveden pro maximální provozní otáčky 4000 ot/min. Důvodem je zkušenost ze zkušebního provozu, kde se otáčky pohybovaly těsně pod touto hranicí.

$$M_{ROZ} = M_v + M_{ZP} + M_{ZR} \quad (6)$$

Kde  $M_R$  je rozběhový moment,  $M_v$  je moment udržení stále rychlosti,  $M_{ZP}$  je moment zrychlení posuvných hmot a  $M_{ZR}$  je moment zrychlení rotačních hmot.

Při výpočtu (6) bude předpoklad, že díky parametrům aditiva a jeho množství v komoře dojde k minimálnímu ovlivnění zatížení motoru, proto lze tento vliv zanedbat. Dále se předpokládá, že silový moment působící na lopatkové kolo vlivem odporu vzduchu bude stejný jako při zkušebním provozu funkčního modelu v kapitole 4.3. Důvodem je malý rozdíl otáček (3989 ot/min vypočtených při zkušebním provozu a 4000 ot/min požadovaných), to znamená, že moment potřebný k udržení stále rychlosti je  $34 \cdot 10^{-3}$  Nm při 4000 ot/min.

Jelikož nedochází k posuvnému pohybu, ze vztahu (7) vznikne:

$$M_R = M_v + M_{ZR} = M_v + J_{RED} \cdot \varepsilon \quad (7)$$

Kde  $J_{red}$  je redukovaný moment setrvačnosti a  $\varepsilon$  je úhlové zrychlení, které se kvůli zjednodušení předpokládá za konstantní.

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

Jelikož se motor rozbíhá z klidného stavu,  $\omega(0) = 0$

$$\int_0^t \varepsilon dt = \int_0^{\omega(t)} 1 d\omega \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{\omega(t)}{t} = \frac{\omega}{t} = \frac{2\pi n}{60t} \quad (10)$$

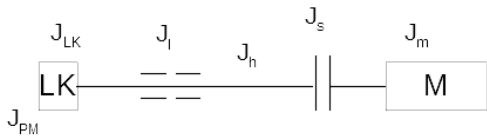
Redukovaný moment setrvačnosti  $J_{red}$  lze spočítat ze zákona o zachování kinetické energie, kde na levé straně je kinetická energie soustavy  $E_k$ , a na pravé straně je algebraický součet kinetických energií jednotlivých členů  $E_{k1} \dots E_{kn}$ .

$$E_k = E_{k1} + E_{k2} + \dots + E_{kn} \quad (11)$$

Pokud kinetická energie soustavy závisí jen na rotačních členech, je možné rovnici (11) rozepsat následovně:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}J_{red} \cdot \omega^2 &= \left(\frac{1}{2}J_1 \cdot \omega_1^2 + \frac{1}{2}m_1 \cdot v_1^2\right) + \left(\frac{1}{2}J_2 \cdot \omega_2^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot v_2^2\right) + \dots \\ &+ \left(\frac{1}{2}J_n \cdot \omega_n^2 + \frac{1}{2}m_n \cdot v_n^2\right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$J_{red} = \frac{1}{\omega^2} \sum_{i=1}^n (J_i \cdot \omega_i^2 + m_i \cdot v_i^2) \quad (13)$$



- $J_{PM}$  ... moment setrvačnosti pojistné matice
- $J_{LK}$  ... moment setrvačnosti lopatkového kola
- $J_l$  ... moment setrvačnosti vnitřního kroužku ložiska
- $J_h$  ... moment setrvačnosti hřídele
- $J_{PM}$  ... moment setrvačnosti spojky
- $J_{PM}$  ... moment setrvačnosti rotoru motoru
- LK ... lopatkové kolo
- M ... DC motor

Obr. 48 Schéma pohonu lopatkového kola

Všechny členy soustavy konají pouze rotační pohyb a z obr. 48 je také vidět, že tento pohyb konají stejnou rychlostí, rovnice (13) se tedy po dosazení zjednoduší do následující podoby:

$$J_{red} = J_{PM} + J_{LK} + 2J_l + J_h + J_s + J_m \quad (14)$$

Po kombinaci vztahů (7), (10) a (14) lze získat rozběhový moment jako funkci času.

$$M_R(t) = M_v + \frac{(J_{PM} + J_{LK} + 2J_l + J_h + J_s + J_m)}{10^7} \cdot \frac{2\pi n}{60t} \quad (15)$$

$$J_{PM} = 0,4329 \text{ g cm}^2 \text{ (Creo 6.0.4.0)}$$

$$J_{LK} = 132,6 \text{ g cm}^2 \text{ (Creo 6.0.4.0)}$$

$$J_l = 1,145 \text{ g cm}^2 \text{ (Creo 6.0.4.0)}$$

$$J_h = 3,751 \text{ g cm}^2 \text{ (Creo 6.0.4.0)}$$

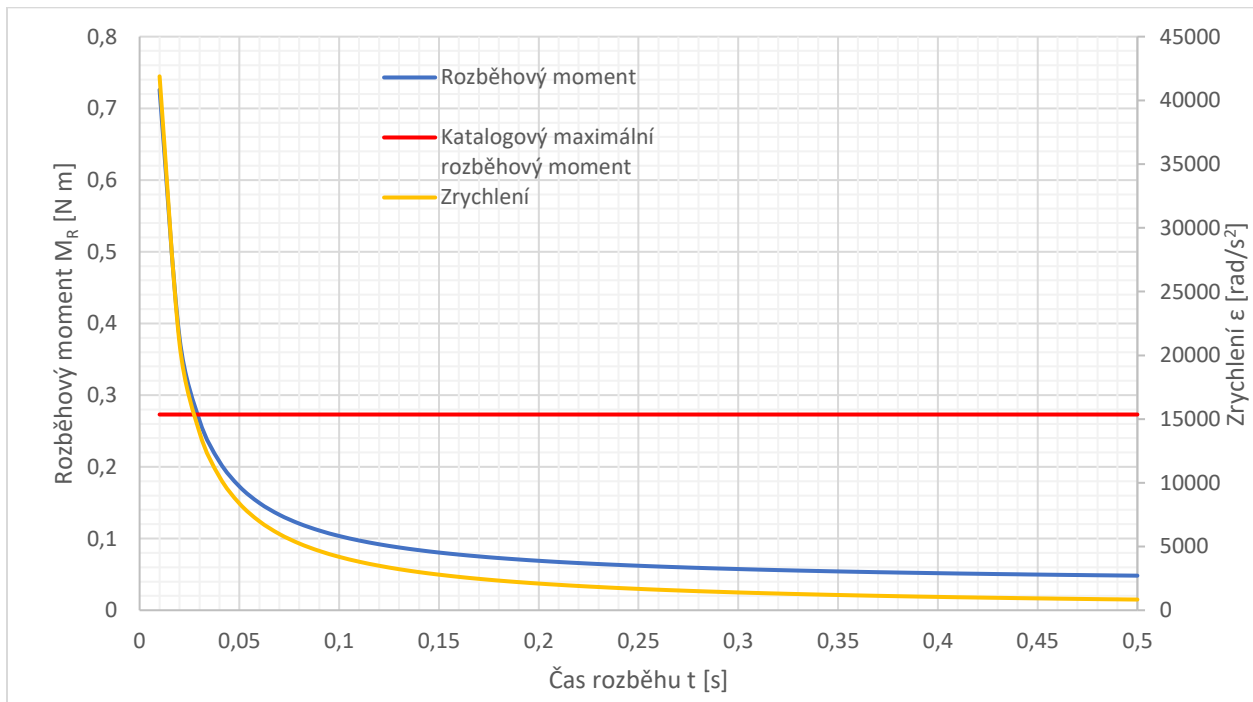
$$J_s = 10 \text{ g cm}^2 \text{ [24]}$$

$$J_m = 16 \text{ g cm}^2 \text{ [25]}$$

$$n = 4000 \text{ ot/min}$$

$$M_v = 34,4 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

$$M_R(t) = 0,0344 + 0,006915 \frac{1}{t} \quad (16)$$



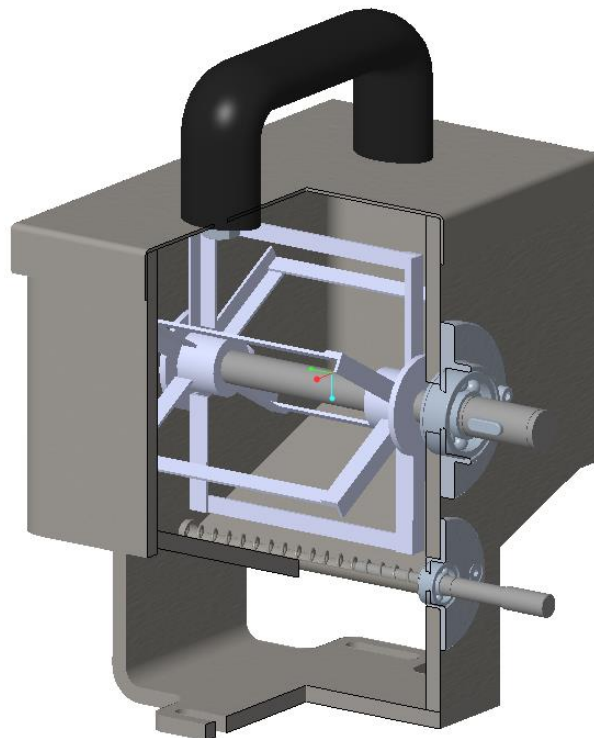
Obr. 49 Křivka požadovaného rozběhového momentu v závislosti na rozběhovém čase

Z obr. 49 jde vidět, že se nesmí překročit zrychlení  $15000 \text{ rad/s}^2$ , což přibližně koresponduje s časem rozběhu  $0,025 \text{ s}$ . Z hlediska bezpečnosti volím minimální čas rozběhu  $0,08 \text{ s}$ , což je zrychlení přibližně  $5000 \text{ rad/s}^2$ .



## 5.2 Zásobník aditiva

Zásobník a metoda dávkování aditiva do vířící komory s měřením koncentrace aditiva byla převzata z diplomové práce Tomáše Kořínka [26]. Jelikož byly tyto části navrženy pro totožné aditivum, nebylo potřeba razantních úprav. Zásadní změna byla modifikace konstrukce zásobníku, původní návrh od Kořínka předepisoval výrobu komory zásobníku z jednoho kusu materiálu frézováním, což by vedlo ke značným materiálovým ztrátám, vysokým strojním časům a celkové neekonomičnosti. Proto byla komora zásobníku upravena tak, aby se dala vyrobit z několika zahýbaných plechů svařených dohromady. Případné netěsnosti se zatěsní pomocí tmelu nebo silikonu. To vedlo k dalším úpravám ostatních částí, tam už ovšem docházelo pouze k menším změnám rozměrů tak, aby si dílce udržely funkčnost. Jedinou částí beze změny zůstalo čechrací kolo.

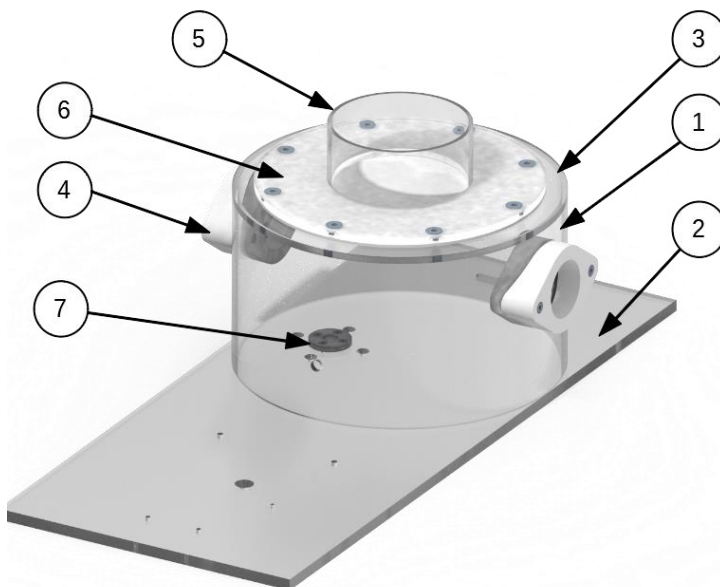


Obr. 50 Upravený zásobník aditiva

### 5.3 Úprava vířící komory

Jedinou úpravou stěny (1) vířící komory bylo přidání otvoru, kterým je možné kontinuálně doplňovat aditivum, příruby pro ejetory (4) zůstaly beze změn. Základna (2) byla rozšířena tak, aby na ni bylo možné umístit zásobník aditiva a jeho pohon. Dále byla přidána možnost natáčet celé zařízení kolem svislé osy tak, aby se dalo ve stroji lépe umístit. Příruba (7) pro protáhnutí hřídele lopatkového kola zůstala beze změn. Víko (3) komory prošlo nejvíce úpravami. Byla přidána příruba (5), která umožní připojení odtahového potrubí. Kvůli odtahu zde byla také umístěna filtrační textilie (6). Touto úpravou byla razantně zvětšena filtrační plocha, což dovoluje pomalejší rychlost proudění skrz filtr. To má za následek menší opotřebení filtru.

Jak již bylo zmíněno, metoda měření koncentrace aditiva v komoře bude použita z diplomové práce [26]. Vzhledem k tomu, že ještě nebyla vyzkoušena její funkčnost a přesnost, tak otvory pro měřicí zařízení nebyly umístěny.



Obr. 51 Render upravené vířící komory

Pro aktivní odtah byly na výběr dvě možnosti. První možností bylo použít přímo ventilaci stroje, což by snížilo náklady, ale také by se výrazně omezila možnost ovládat rychlost odsávání. Druhou možností, která nakonec byla zvolena, byl samostatný ventilátor, který umožňuje ovládat rychlost odsávání. Jako druh ventilátoru byl zvolen radiální ventilátor, jelikož dovoluje větší tlakový spád než ventilátor axiální.

## ZÁVĚR

Provoz funkčního modelu ověřil schopnost nanášení aditiva do nanovlákněné vrstvy a také to, že s rozdílnou koncentrací aditiva v suspenzi dochází k nanesení různého množství aditiva do nanovlákněné vrstvy. Dále byly na základě jeho provozu navrženy úpravy pro zlepšení funkce, především přidáním aktivního odtahu. Také byl oproti funkčnímu modelu u modifikované verze přidán zásobník na aditivum.

Pro zjištění přesného vztahu mezi koncentrací aditiva v suspenzi a množstvím naneseného aditiva bude nutné navrhnout a vytvořit nová měření. Další možností je i zkoumání vlivů ostatních parametrů na schopnosti nanášení aditiva. Především rychlost otáčení rotoru, velikost částic aditiva a také suchost příze.

Dále se objevuje i možnost zkoumání chování ejektoru, případně vytvoření CFD modelu tak, aby se mohla vytvořit optimální geometrie. To samé platí i pro samotnou komoru nanášecího zařízení.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. BAŤKA, Ondřej. *Zařízení na výrobu jádrové příze*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní.
2. XING, Xiaobo, Yuqing WANG a Baojun LI. Nanofibers drawing and nanodevices assembly in poly(trimethylene terephthalate). *Optics Express* [online]. 2008, **16**(14) [cit. 2021-5-11]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.16.010815
3. STRNADOVÁ, Kateřina, Lukáš STANISLAV, Ilona KRABICOVÁ, Filip SABOL, Jan LUKÁŠEK, Michal ŘEZANKA, David LUKÁŠ a Věra JENČOVÁ. Drawn aligned polymer microfibrils for tissue engineering. *Journal of Industrial Textiles* [online]. 2020, **50**(3), 263-277 [cit. 2021-5-12]. ISSN 1528-0837. Dostupné z: doi:10.1177/1528083718825318
4. YADAVALLI, Nataraja S., Darya ASHEGHALI, Alexander TOKAREV, Weizhong ZHANG, Jin XIE a Sergiy MINKO. Gravity Drawing of Micro- and Nanofibers for Additive Manufacturing of Well-Organized 3D-Nanostructured Scaffolds. *Small* [online]. 2020, **16**(11) [cit. 2021-5-12]. ISSN 1613-6810. Dostupné z: doi:10.1002/sml.201907422
5. SARKAR, Kamal, Carlos GOMEZ, Steve ZAMBRANO, Michael RAMIREZ, Eugenio DE HOYOS, Horacio VASQUEZ a Karen LOZANO. Electrospinning to Forcespinning™. *Materials Today* [online]. 2010, **13**(11), 12-14 [cit. 2021-5-12]. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/S1369-7021(10)70199-1
6. PADRON, Simon, Arturo FUENTES, Dumitru CARUNTU a Karen LOZANO. Experimental study of nanofiber production through forcespinning. *Journal of Applied Physics* [online]. 2013, **113**(2) [cit. 2021-5-12]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.4769886
7. BHAT, Gajanan. Melt blown Polymeric Nanofibers for Medical Applications- An Overview. *Nanoscience & Technology: Open Access* [online]. 2015, **2**(1) [cit. 2021-5-12]. ISSN 23748141. Dostupné z: doi:10.15226/2374-8141/2/1/00125
8. PERSANO, Luana, Andrea CAMPOSEO, Cagri TEKMEK a Dario PISIGNANO. Industrial Upscaling of Electrospinning and Applications of Polymer Nanofibers: A Review. *Macromolecular Materials and Engineering* [online]. 2013, **298**(5), 504-520 [cit. 2021-5-12]. ISSN 14387492. Dostupné z: doi:10.1002/mame.201200290
9. YENER, F. a O. JIRSAK. Comparison between the Needle and Roller Electrospinning of Polyvinylbutyral. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2012, **2012**, 1-6 [cit. 2021-5-12]. ISSN 1687-4110. Dostupné z: doi:10.1155/2012/839317
10. POKORNY, P., E. KOSTAKOVA, F. SANETRNÍK, et al. Effective AC needleless and collectorless electrospinning for yarn production. *Phys. Chem. Chem. Phys* [online]. 2014, **16**(48), 26816-26822 [cit. 2021-5-12]. ISSN 1463-9076. Dostupné z: doi:10.1039/C4CP04346D
11. VALTERA, Jan, Tomas KALOUS, Pavel POKORNY, et al. Fabrication of dual-functional composite yarns with a nanofibrous envelope using high throughput AC needleless and collectorless electrospinning. *Scientific Reports* [online]. 2019, **9**(1) [cit. 2021-5-13]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-019-38557-z
12. KLINZING, G. E., R. D. MARCUS, F. RIZK a L. S. LEUNG. *Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach*. 2nd ed. Glasgow: Chapman & Hall, 1997. ISBN 978-94-015-8983-3.
13. Práškové aktivní uhlí. *Aktivní uhlí & Nauhličovadla* [online]. Ostrava: RESORBENT [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.resorbent.cz/praskova>

14. RENLIANG, Xu. *Particle Characterization: Light Scattering Methods*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 0-792-36300-0.
15. STEHLÍK, Jaroslav. *Dopravníky*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. ISBN 80-7083-888-4.
16. MILLS, David. *Pneumatic Conveying Design Guide*. 2nd ed. London: Elsevier, 2004. ISBN 0-7506-5471-6.
17. SANTO, NIR and HAIM KALMAN, 2017. Blinded T-bends flow patterns in pneumatic conveying systems. *Powder Technology* [online]. vol. 321, pp. 347-354. Retrieved z: doi:10.1016/j.powtec.2017.08.004
18. TILLY, G.P. and WENDY SAGE, 1970. The interaction of particle and material behaviour in erosion processes. *Wear* [online]. vol. 16, no. 6, pp. 447-465. Retrieved z: doi:10.1016/0043-1648(70)90171-7
19. Explosion Vent EDP. *Explosion Safety and Pressure Relief* [online]. Brilon: REMBE, c2021 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.rembe.com/products/explosion-safety/explosion-vents/edp/>
20. Pneumatic Conveying Explosion Risk. *Industrial Explosion Protection Solutions - IEP* [online]. Ratingen [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.ieptechnologies.com/wheres-the-hazard/process-equipment-at-risk/pneumatic-conveying>
21. DECHSIRI, CHUTIMA, 2004. *Particle Transport in Fluidized Beds: Experiments and Stochastic Models*. B.m.: s.n
22. ALVAREZ, MARIO M., PAULO E. ARRATIA and FERNANDO J. MUZZIO, 2008. Laminar Mixing in Eccentric Stirred Tank Systems. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* [online]. vol. 80, no. 4, pp. 546-557. Retrieved z: doi:10.1002/cjce.5450800418
23. OpenCFD. *User Guide*. ©2021. Dostupné také z: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>
24. Elastomerové zubové spojky. *Norelem* [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.norelem.com/xs\\_db/DOKUMENT\\_DB/www/NORELEM/DataSheet/cz/23/23023\\_Datasheet\\_4921\\_Elastomerov\\_zubov\\_spojky\\_z\\_sev\\_en\\_pomoc\\_z\\_vitov\\_ho\\_kol\\_ku--cs.pdf](https://www.norelem.com/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/cz/23/23023_Datasheet_4921_Elastomerov_zubov_spojky_z_sev_en_pomoc_z_vitov_ho_kol_ku--cs.pdf)
25. FAULHABER CR 2657. *FAULHABER Drive Systems* [online]. Croglio [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.faulhaber.com/en/products/series/2657cr/>
26. KOŘÍNEK, Tomáš. *Konstrukce zařízení určeného k nanášení aditiv na netkanou textilii*. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.

## **Seznam příloh**

**A. Výkresová dokumentace**

**B. CD-ROM obsahující kompletní bakalářskou práci**