



## **Bakalářská práce**

# **Robotická zvlákňovací jednotka**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Jan Kos**

*Vedoucí práce:*

Ing. Josef Skřivánek, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Robotická zvlákňovací jednotka

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Jan Kos</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S19000052
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra textilních a jednoúčelových strojů
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši výroby nanovláken.
2. Navrhněte varianty samostatné zvlákňovací jednotky pracující na principu odstředivých sil, která bude součástí ramene robota.
3. Konstruktivně zpracujte vybranou variantu zařízení a vypracujte výrobní dokumentaci.
4. Případně ověřte vybrané technologické uzly výpočtem nebo experimentem.



*Rozsah grafických prací:* výkresová dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* 35  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] PEŠÍK, Lubomír. Části strojů: stručný přehled. Díl 2 / Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita, 2005. ISBN 80-7083-608-3;  
[2] JULIŠ, K., BREPTA, R.: Mechanika I. díl. Statika a kinematika. Technický průvodce 65. SNTL Praha 1986; [3] BRÁT, V., ROSENBERG, J., JÁČ, V.: Kinematika. SNTL/ALFA Praha 1987;  
[3] LUKÁŠ, D. et al.: Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century) Textile Progress 41(2):59-140, June 2009, DOI: 10.1080/00405160902904641  
[4] Pokorný, P. a kol.: Zařízení pro výrobu nanovláken a/nebo mikrovláken odstředivým zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru, užitný vzor č. 30004, datum zápisu 15.11.2016  
[5] Puchalová, I.: Odstředivé zvlákňování biodegradabilních materiálů, bakalářská práce, Liberec 2014

*Vedoucí práce:* Ing. Josef Skřivánek, Ph.D.  
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

*Datum zadání práce:* 1. prosince 2022

*Předpokládaný termín odevzdání:* 31. května 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

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.

16. května 2023

Jan Kos

## **Poděkování**

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Josefu Skřivánkovi, Ph.D., za odborné a věcné konzultace během jejího vypracování.

Poděkování také patří Ing. Ondřeji Bařkovi, Ph.D., za poskytnutí rad ohledně technologie 3D tisku, panu Ing. Petru Žabkovi, Ph.D., za pomoc při orientaci v programu Creo 9.0. a panu Ing. Pavlu Holcovi za ochotu při analyzování vzorků nanovláken.

Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a psychickou oporu při studiu.

## **Anotace**

Bakalářská práce se věnuje konstrukci robotické zvlákňovací jednotky pro beztryskové odstředivé zvlákňování. V rámci bakalářské práce byla provedena rešerše výroby nanovláken. Na základě získaných poznatků z rešerše a z předchozí zvlákňovací jednotky navržené na Technické univerzitě na oddělení katedry textilních strojů, byla navrhována nová zvlákňovací jednotka. Nová zvlákňovací jednotka prošla úpravou pro využívání stlačeného vzduchu a úpravou pro umístění na rameno robota. Zařízení bylo vyrobeno dle vypracované technické dokumentace. Funkčnost zvlákňovací jednotky byla v laboratoři ověřena experimentem. Vzorky vyrobených vláken byla analyzována elektronovým mikroskopem a následně vyhodnoceny.

## **Klíčová slova**

Odstředivé zvlákňování, zvlákňovací spinnereta, proudění vzduchu, polymerní film, výroba nanovláken, ulpívání polymeru, vliv proudění

## **Annotation**

The bachelor's thesis is devoted to the construction of a robotic spinning unit for nozzleless centrifugal spinning. Research into the production of nanofibers was carried out as part of the bachelor's thesis. Based on the knowledge obtained from the research and from the previous variant of the spinning unit designed at the Technical University in the Department of Textile Machinery, a new spinning unit was designed. The new spinning unit has been modified to use compressed air and modified to be placed on the robot arm. The device was manufactured and assembled according to the developed technical documentation. The functionality of the spinning unit was verified by experiment in the laboratory. Samples of the manufactured fibers were analyzed with an electron microscope and subsequently evaluated.

## **Keywords**

Centrifugal spinning, spinning spinneret, air flow, polymer film, production of nanofibers, polymer adhesion, effect of flow

# Obsah

---

1.	Úvod .....	10
2.	Technologie výroby nanovláken .....	11
2.1.	Elektrostatické zvlákňování .....	12
2.1.1.	Procesní parametry elektrostatického zvlákňování .....	13
2.1.2.	Technologie Nanospider .....	14
2.1.3.	Elektrostatické zvlákňování z bublin .....	15
2.2.	Rozfukávání taveniny .....	17
2.3.	Tažení vláken .....	18
2.4.	Elektromagnetické zvlákňování .....	19
2.5.	Technologie Bikomponentních nanovláken .....	20
2.6.	Smykové zvlákňování .....	21
2.7.	Odstředivé zvlákňování .....	22
2.7.1.	Tryskové odstředivé zvlákňování .....	22
2.7.2.	Beztryskové odstředivé zvlákňování .....	23
2.7.3.	Procesní parametry odstředivého zvlákňování .....	24
3.	Vybrané technologie odstředivého zvlákňování .....	25
3.1.	Multispinningová výroba .....	25
3.2.	Zvlákňování z povrchu válce .....	26
3.3.	Elektro-odstředivé zvlákňování .....	27
4.	Současná konstrukce zařízení pro odstředivé zvlákňování .....	28
4.1.	Popis současné konstrukce .....	28
4.2.	Popis zvlákňovací hlavy .....	29
4.3.	Popis rozvaděče vzduchu .....	30
5.	Nová konstrukce .....	31
5.1.	Návrh nové konstrukce .....	31
5.2.	Popis zvlákňovací jednotky .....	31
5.3.	Zvlákňovací hlava .....	32
5.4.	Vzduchový systém zvlákňovací jednotky .....	33
5.4.1.	Vývoj vzduchového systému .....	33
5.4.2.	Výsledný vzduchový systém .....	35
5.5.	Pevnostní analýza .....	37
5.5.1.	Příruba čerpadla .....	37
5.5.2.	Připojovací příruba zvlákňovací jednotky .....	39
5.6.	Čerpadlo .....	40
5.7.	Připojení na rameno robota IRB 2600 TYPE C .....	41

6.	Ověření návrhu zvlákňovací jednotky.....	42
6.1.	Měření proudění vzduchu.....	42
6.2.	Ověření procesu zvlákňování.....	45
6.3.	Vyhodnocení vzorků nanovláken.....	46
7.	Vyhodnocení návrhu zařízení.....	48
7.1.	Posouzení konstrukce zařízení.....	48
7.2.	Posouzení vzduchového systému.....	49
7.3.	Vyhodnocení funkčnosti zvlákňovací jednotky.....	49
8.	Závěr.....	50

# 1. Úvod

---

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu malé samostatné zvlákňovací jednotky na principu odstředivých sil a jejího umístění na rameno robota. Jedná se o malé sněžné dělo, které místo sněhu vyrábí nanovlákná. Technologie odstředivého zvlákňování není tak náročná na specifické vlastnosti polymerního roztoku, jako například technologie elektrického zvlákňování. Též lze nanovlákná nanášet na jakýkoliv podklad.

Využití této zvlákňovací jednotky by mohlo být například při výrobě ochranných povlaků na ovoci a zelenině před škůdci, či na různé filtrační technologie.

První část práce se zabývá rešerší o technologii výroby nanovláknenných materiálů.

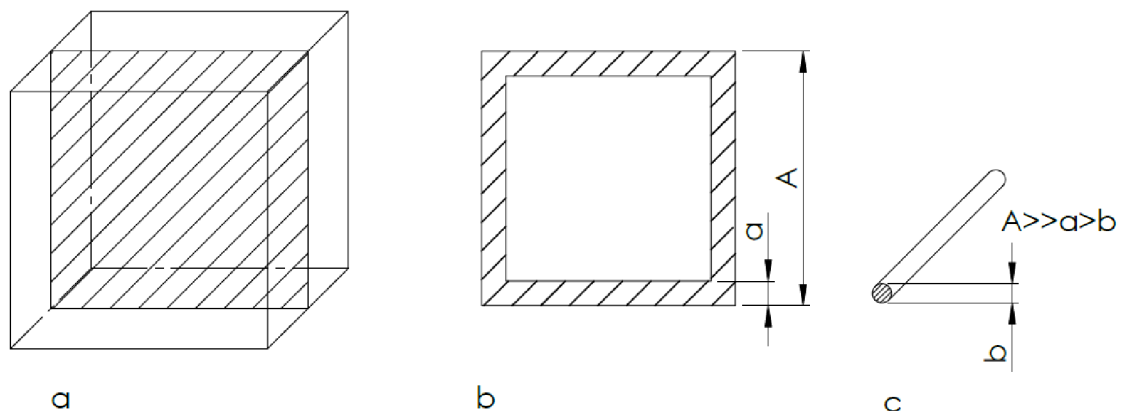
Druhá část práce je zaměřena na vývoj nové verze zařízení na odstředivé zvlákňování využívající stlačený vzduch a na kompletní rozbor a popis zvlákňovací jednotky.

Třetí část práce se zabývá testováním nové verze zvlákňovací jednotky na principu odstředivých sil, zkoumání vlivu proudění na samotné zvlákňování a vyhodnocení vyrobených nanovláken.

## 2. Technologie výroby nanovláken

---

Za nanovlákná jsou považovány nano-objekty, které mají dva vnější rozměry v rozmezí 1 až 100nm, nebo průměr menší než 1  $\mu\text{m}$ . Pokud máme veškerý objem materiálu v tomto rozmezí, tak jeho fyzikální vlastnosti se velice podobají fyzikálním vlastnostem povrchu u většího tělesa. [1]



Obrázek 1: Znárodnění nanovlákná jako nano-objektu [1]

- (a) Těleso s vyznačeným řezem
- (b) Řez tělesem a označení tloušťky povrchové vrstvy „a“
- (c) Nanovlákná o průměru „b“, který je menší než rozměr „a“

Základní surovinou pro výrobu nanovláken jsou polymerní roztoky či polymerní taveniny. Roztoky obsahují směsi polymerních materiálů, rozpouštědla a další látky pro dosažení určitých vlastností, jako je například viskoelasticitá. [1]

Nanovlákná vyrobená z polymerních roztoků mají široké využití v medicíně, ekologii, filtraci, kompozitech, ochranných oděvech, kosmetice a jiné. Nanovlákná z polymerní taveniny mají lepší čistotu. Tudiž se více hodí pro použití v elektronice a optoelektronice. Za nevýhodu se dá považovat provozní teplota zařízení a teplota tavení polymeru okolo 300°C. [4]

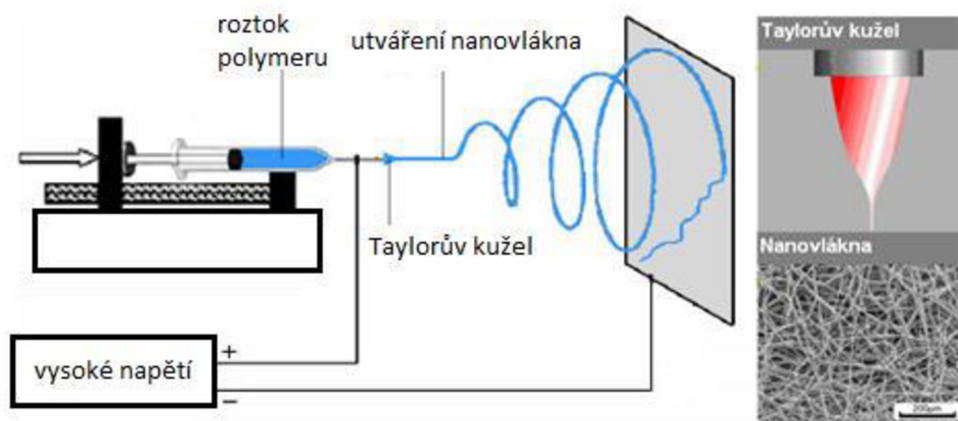
K výrobě nanovláken jsou zapotřebí vnější síly. Nejčastěji to jsou síly elektrické, mechanické či hydrodynamické. Základní technologie výroby je elektrické zvlákňování (Electrospinning), odstředivé zvlákňování (Forcespinning), rozfukování taveniny (Meltblown) a tažení vláken (Drawing). [1]



## 2.1. Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování je základní technologií výroby nanovláken. Historie této technologie sahá až do 17. století, kdy William Gilbert poprvé zaznamenal jev zvaný Taylorův kužel. Až v roce 1902 J. F. Cooley podal první patent na elektrostatické zvlákňování. V roce 2005 vyšla první kniha s názvem *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*. [3]

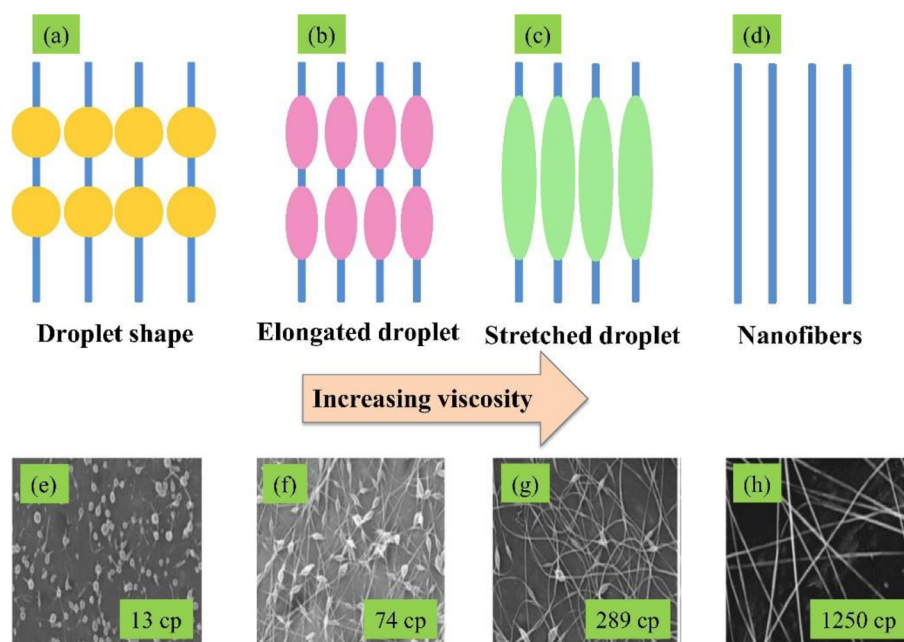
Elektrostatické zvlákňování je založeno na rozdílu elektrických potenciálů mezi zvlákňovací elektrodou a zachytávající elektrodou neboli kolektorem. Polymerní roztok je přiveden do zvlákňovacího prostoru kde za působení elektrického napětí dochází k překonání povrchového napětí a vytváření Taylorova kuželu. Z jehož vrcholu pak vznikají jednotlivá nanovlákna. Vlákna jsou unášena elektrickým proudem, který je zároveň prodlužuje. Nanovlákna se pak mohou například navíjet na kolektor.[2]



Obrázek 2: Schéma elektrostatického zvlákňování [15]

### 2.1.1. Procesní parametry elektrostatického zvlákňování

Na vznik nanovláken a na vznik defektů u nanovláken má vliv mnoho procesních parametrů. Základní rozdělení je na parametry roztoku, parametry elektrostatického zvlákňování a parametry prostředí. Aby nanovlákná mohla začít vůbec vznikat, je potřeba dostatečné elektrické pole potřebné ke vzniku Taylorova kužele a elektrická vodivost. Elektrickou vodivost můžeme navýšit přidáním soli. Na průměr nanovláken má vliv vzdálenost trysky a kolektoru, rozpouštědla a teplota. Vzdálenost trysky a kolektoru musí být taková, aby se veškeré rozpouštědlo stihlo vypařit a tím i ztuhnout polymer. Vypařování napomáhá i okolní teplota. Defekty vláken vznikají z mnoha příčin. Například při velikém průtoku tryskou vznikají kapičky, které se pak během tuhnutí formují v kuličky či stuhovité defekty. Nízká koncentrace polymeru v roztoku je nežádoucí. Jeho nízké zastoupení má za následek rozpad na fragmenty. Následně vzniknou kuličky či perličková vlákna. Navýšení koncentrace polymeru zvýší viskozitu roztoku, díky které vznikají nanovlákná bez defektů. Všechny parametry však mají kritickou hodnotu. Pokud tuto kritickou hodnotu překročíme, většinou nastane opačný efekt. [9]



Obrázek 3: Závislost viskozity a defektů nanovláken [16]

(a) Kapky, (b) Protáhla kapka, (c) natažená kapka, (d) nanovlákná

### 2.1.2. Technologie Nanospider

Technologie Nanospider byla vyvinuta na Technické univerzitě v Liberci společně s firmou Elmarco. Principem je rotující váleč částečně ponořený do roztoku. Z jeho povrchu pak následně díky elektrickému poli vznikají jednotlivá nanovlákna. [11]

Moderní Nanospider funguje na základě nanášení tenké vrstvy roztoku polymeru na strunu pomocí pohyblivé hlavy. Ze struny pak vznikají jednotlivá nanovlákna působením elektrického pole. Jednotlivá vlákna jsou zachytávána na kolektoru, kde vzniká netkaná textilie. [12]

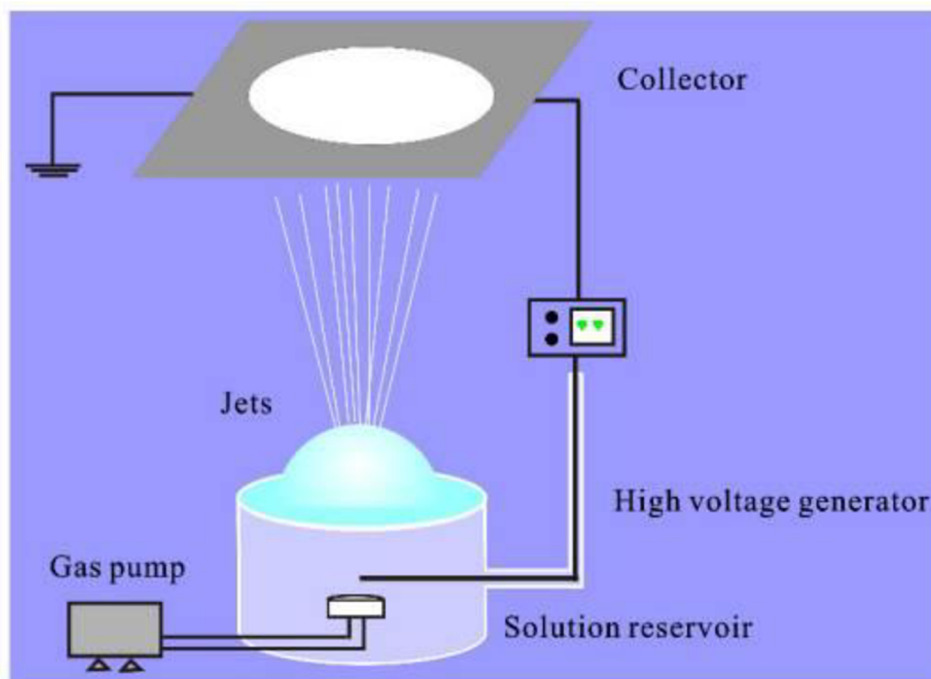


Obrázek 4: Zvlákňování technologií Nanospider [12]

### 2.1.3. Elektrostatické zvlákňování z bublin

Elektrostatické zvlákňování z bublin spadá do kategorie beztryskového elektrostatického zvlákňování s mnohem vyšší produkcí vláken. K vytvoření bubliny je zapotřebí zásobník roztoku, který funguje jako generátor bublin, plynové čerpadlo a zdroj elektrického napětí. Jak lze vidět na obrázku níže, na povrchu bubliny vzniknou takzvané trysky a z nich proudí jednotlivá nanovláknna. Na povrchu bubliny se postupně vytvoří mnoho těchto trysek. [14]

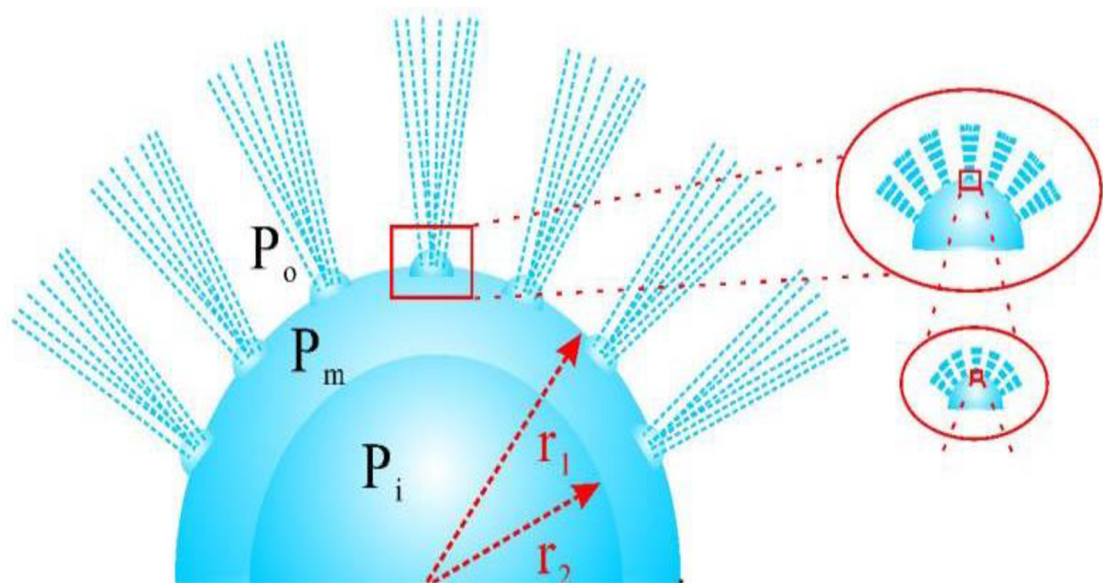
Při vytváření nanovláken je odebírán roztok polymeru z jejího povrchu. To snižuje povrchové napětí bubliny a tím hrozí prasknutí bubliny. Rotující bublina je stabilní, a proto je využívána. [14]



Obrázek 5: Schéma elektrostatického zvlákňování z bublin [14]

Povrch bubliny je velice nestabilní a vytvářením nanovláken dojde ke snížení povrchového napětí. Toto snížení povrchového napětí má za následek vznik takzvané „dceřiné bubliny“. Tato bublina může být v řádech mikro či nano rozměrech. Na povrchu těchto bublin se opět vytvoří trysky a celý proces se opakuje. [14]

Nanovlákná získaná elektrostatickým zvlákňováním z bublin mají srovnatelnou kvalitu s nanovláknem získaným běžným elektrostatickým zvlákňováním z trysky. Též je tato metoda více produktivní a je zapotřebí menší elektrické napětí. [14]

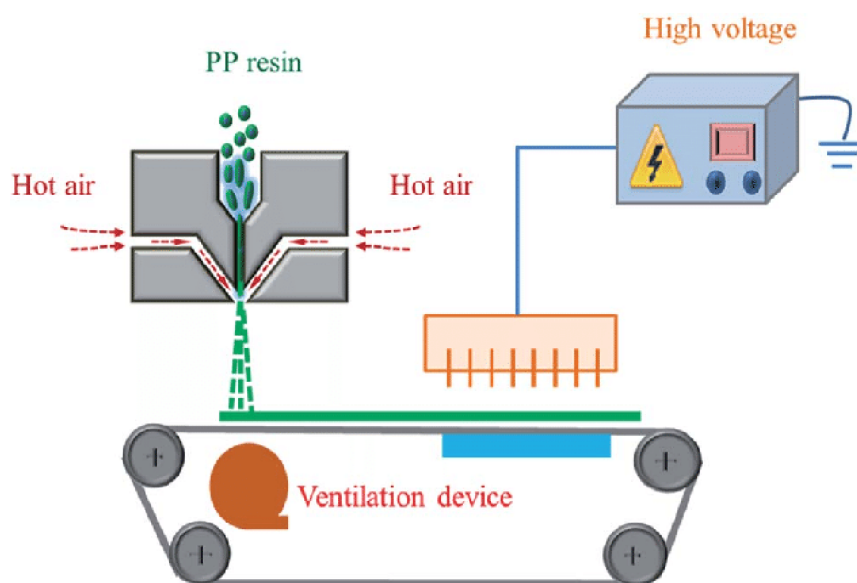


Obrázek 6. Schéma principu tvoření dceřiných bublin [14]

## 2.2. Rozfukávání taveniny

Rozfukávání taveniny je vysoce produktivní technologie. Principem výroby je přivádění horkého plynu do zvlákňovací trysky, kam je vytlačována i tavenina polymeru. Při výstupu z trysky dochází k utržívání taveniny polymeru a dále je formován do podoby nanovlákná. Hotová nanovlákná jsou pak navíjena na kolektor. Touto technologií vznikají netkané textilie. [4]

Vliv na hotovou netkanou textilií má typ polymeru, teplota extrudéru, počet a velikost otvorů, rychlost a teplota vzduchu, vzdálenost kolektoru od zvlákňovací trysky. Z netkaných textilií vytváříme produkty jako umělý trávník, kávové filtry, respirátory, kapalinové filtry, vzduchové filtry, izolační výrobky, dezinfekční ubrousky a mnoho dalších. [8]

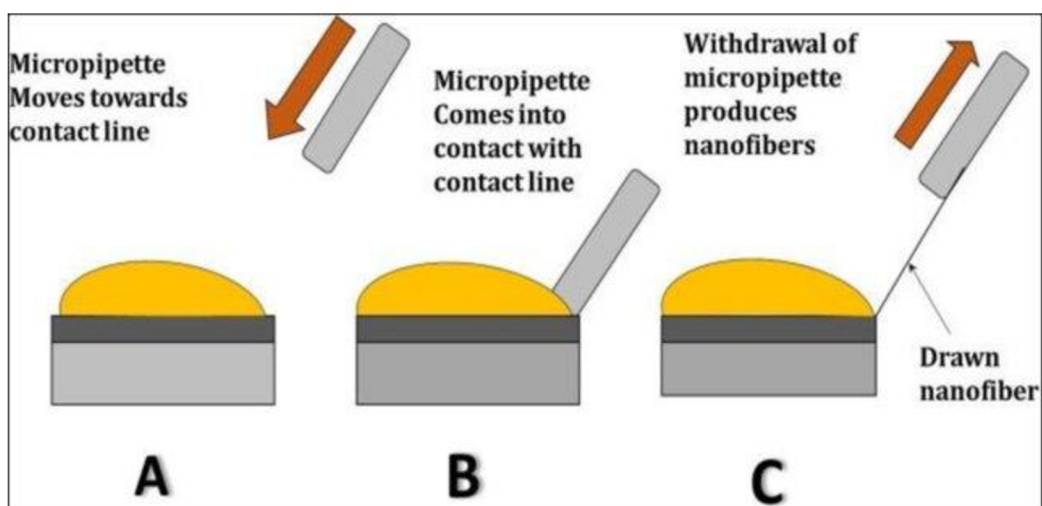


Obrázek 7: Schéma rozfukování taveniny [17]

## 2.3. Tažení vláken

Technologie tažení vláken je určena jako experimentální výroba pro laboratorní potřeby. Zjišťují se vlastnosti nanovláken z různých druhů materiálu. [4]

Komerční využití najdeme pro výrobu skleněných vláken. Získáváme totiž vlákna o požadovaném rozměru i délce. Technologie je založena na čistě mechanické síle. Zvlákňovací element je ponořen do kapaliny polymeru a vytahuje jednotlivá nanovlákna. Můžeme však i použít princip 3Dtisku kdy jsou jednotlivá vlákna pokládána přímo na místo. [1]



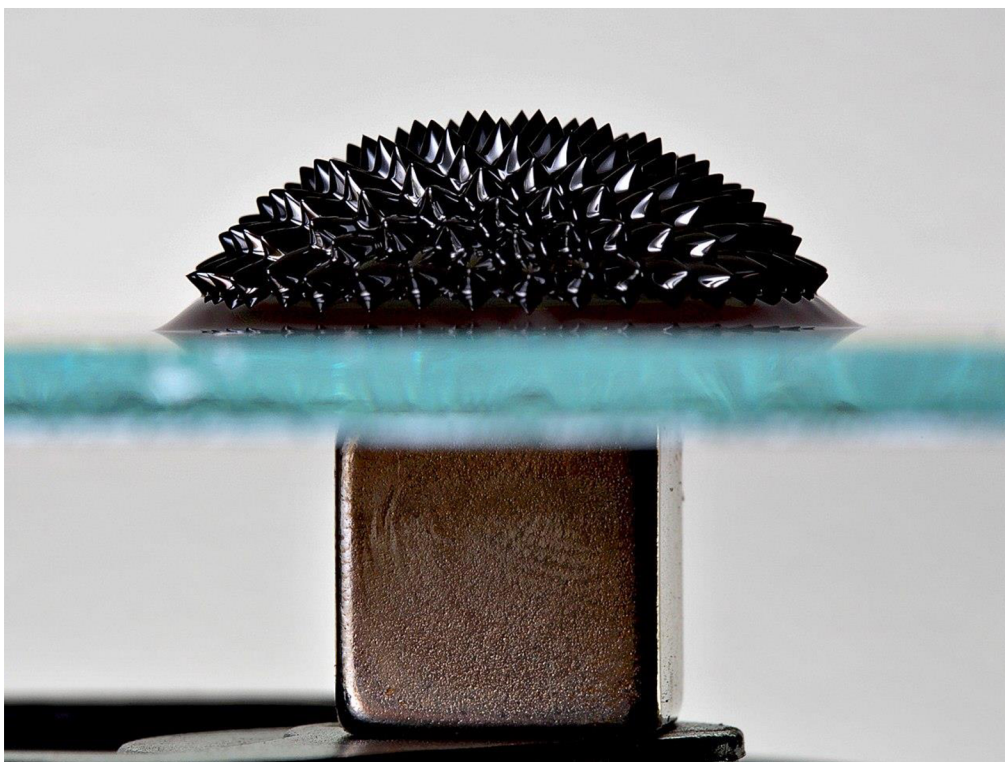
Obrázek 8: Schéma tažení vláken [18]

- (A) Přisuv mikropipety směrem k roztoku polymeru
- (B) Mikropipeta přichází do kontaktu s roztokem polymeru
- (C) Vznik nanovláken odtažením mikropipety



## 2.4. Elektromagnetické zvlákňování

Principem běžného elektrostatického zvlákňování je za pomoci elektrického pole vytvořit Taylorův kužel z něhož pak začínají vznikat jednotlivá nanovlákná. Při elektromagnetickém zvlákňování nám Taylorovy kužele formuje magnetické pole. Na rovné podložce je vrstva roztoku polymeru s přidávanými feročásticemi. Tyto feročástice při přiložení magnetu začnou tvořit pseudokužele, ze kterých pak působením vysokého napětí dojde k vytváření nanovláken. Tímto způsobem se velice navýší produktivita běžného elektrostatického zvlákňování. [4]



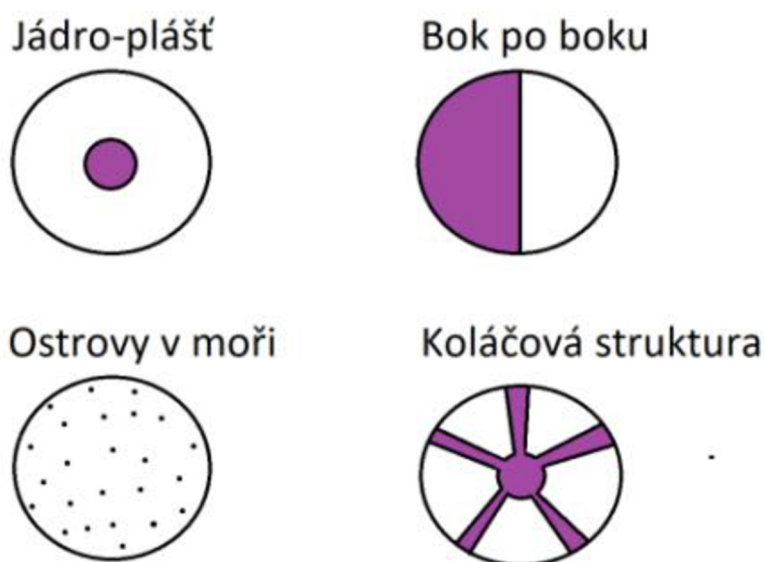
Obrázek 9: Vznik pseudokuželů působením magnetického pole [19]



## 2.5. Technologie Bikomponentních nanovláken

Bikomponentní nanovlákná jsou dvousložková vlákna. Složky se dělí na jádro a obal. Jádro je výše tající polymerem a má většinový podíl na mechanických vlastnostech. Jedná se zejména o pevnost, elasticitu, pružnost a tažnost. Plášť vlákna je tvořen níže tajícím polymere a má za úkol udržet jádro či jádra od okolní atmosféry. Tím zajišťuje chemickou stálost a adhezní vlastnost. [13]

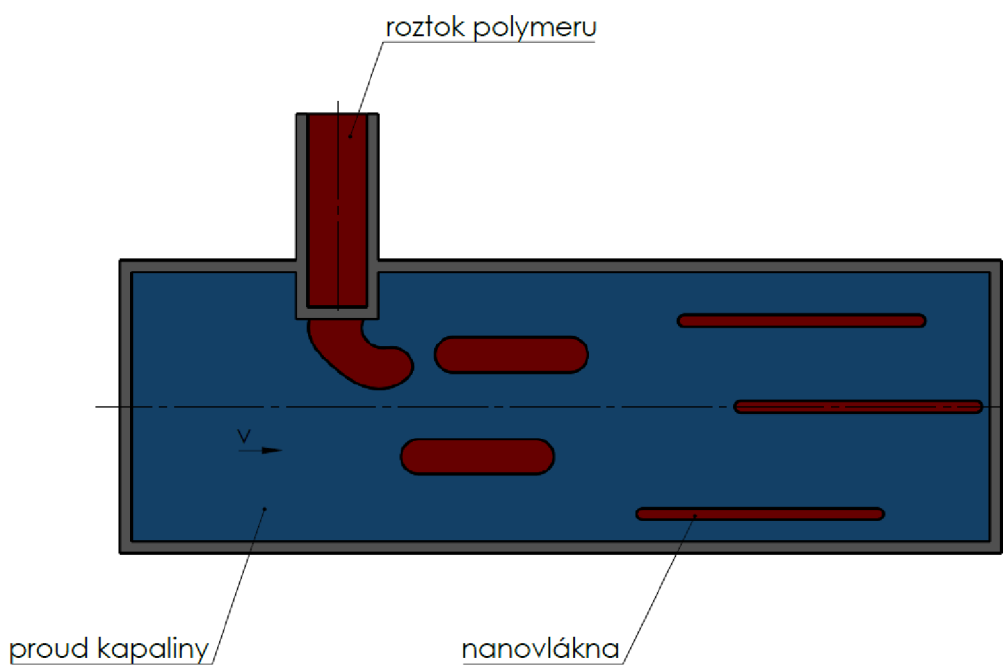
Bikomponentní nanovlákná mohou mít několik variant. Základní variantou je „jádro-plášť“ a „bok po boku“. Další variantou je takzvaně „ostrovy v moři“. Zde je několik jader v jedné matrici, která může být rozpustná ve vodě. Poslední variantou je „segmentový koláč“. Ten se vyznačuje oddělenými částmi jednotlivých polymerů. [1]



Obrázek 10: Schéma druhů bikomponentních nanovláken [20]

## 2.6. Smykové zvlákňování

Produktem této technologie jsou konečná nanovlákná. Konečná neboli krátká nanovlákná se formují v proudu kapaliny, která je tvořena viskózním médiem a srážedlem. Jednotlivé kapky roztoku polymeru jsou vstříkovány do proudu kapaliny, kde dochází k jejich formování v nanovlákná prostřednictvím smykového napětí. Smykové napětí způsobuje proudící kapalina a jeho zvyšováním dosáhneme menších a delších vláken. Důležitou vlastností roztoku polymeru je molekulová hmotnost. Polymery s nízkou molekulovou hmotností vytvoří spíše malé válečky či tyčinky. Naopak polymery s vysokou molekulovou hmotností tvoří mnohem delší vlákna. [1]



Obrázek 11: Princip smykového zvlákňování

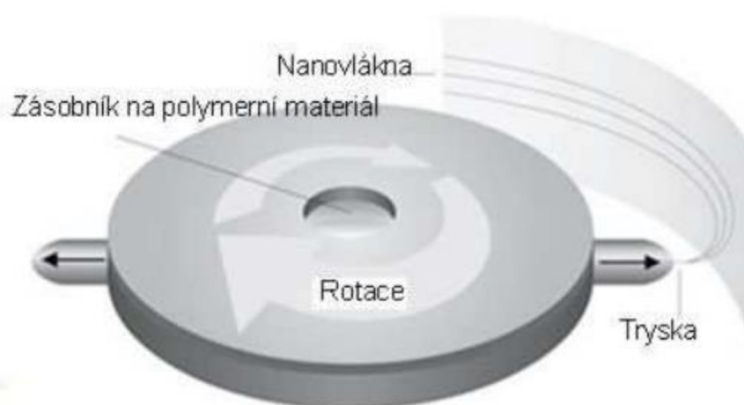
## 2.7. Odstředivé zvlákňování

Při odstředivém zvlákňování nám odstředivá síla nahrazuje elektrické pole, které je běžně využívané u elektrostatického zvlákňování. Potřebnou sílu získáváme rotací zvlákňovací hlavy, do které je přiváděn roztok či tavenina polymeru. Rotace musí být dostatečně vysoká, aby vzniklá odstředivá síla dokázala překonat povrchové napětí polymeru. Ze zvlákňovací hlavy pak začínají vznikat nanovlákná, která jsou unášena proudem vzduchu a následně uložena na kolektor. [3]

### 2.7.1. Tryskové odstředivé zvlákňování

Odstředivé zvlákňování dělíme na tryskové a beztryskové zvlákňování. Při tryskovém zvlákňování je polymerní roztok či polymerní tavenina přiváděna do spinnerety a následně do trysek či jehel z nichž jsou nanovlákná tažena za pomoci odstředivých sil. [1]

Spinnereta musí dosahovat vysokých otáček kolem své osy. U spinnereta o velikosti 20 cm mluvíme přibližně o 7 000 – 12 000 ot/min. Spinnereta pro tryskové zvlákňování má zásobník na polymerní roztok, který může být i vyhříván při zvlákňování z taveniny polymeru. Pomocí rotace se ze zásobníku posouvá roztok či tavenina do trysky. Z trysky je pak vytlačován roztok do okolního prostředí. Setrvačné síly pak unášejí paprsek, který je dlužen se současným odpařováním rozpouštědel. V případě taveniny polymeru dochází k chladnutí taveniny. [9]

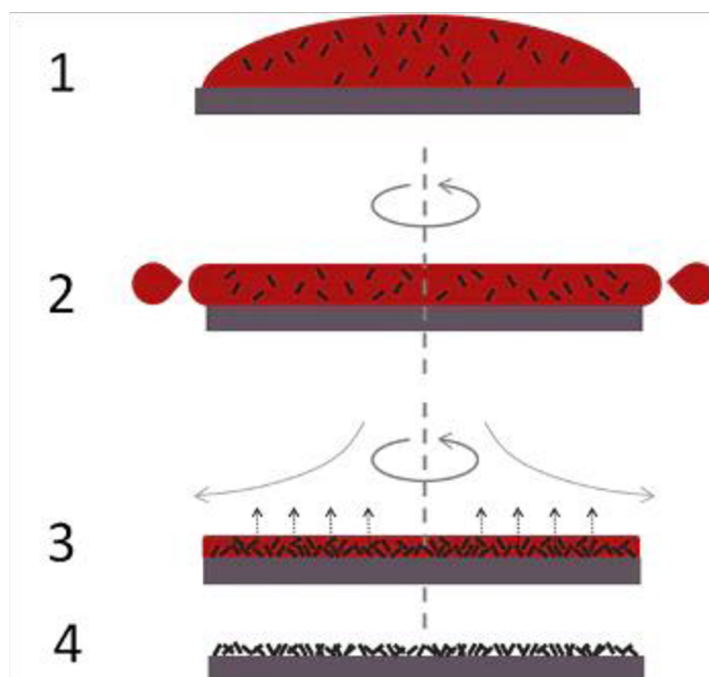


Obrázek 12: Princip fungování spinnerety [21]

### 2.7.2. Beztryskové odstředivé zvlákňování

Beztryskové zvlákňování funguje tedy na přivedení polymerního roztoku či polymerní taveniny na rotující kotouč nebo kužel. Roztok je přiváděn do středu kotouče, odkud je pomocí odstředivých sil rozšiřován ke hraně kotouče. Rozšiřování kapaliny je nepravidelné. Na povrchu kotouče vzniknou takzvané prsty, což jsou proudy kapaliny. Z těchto prstů pak na hraně kotouče začnou vznikat nanovlákná. [9]

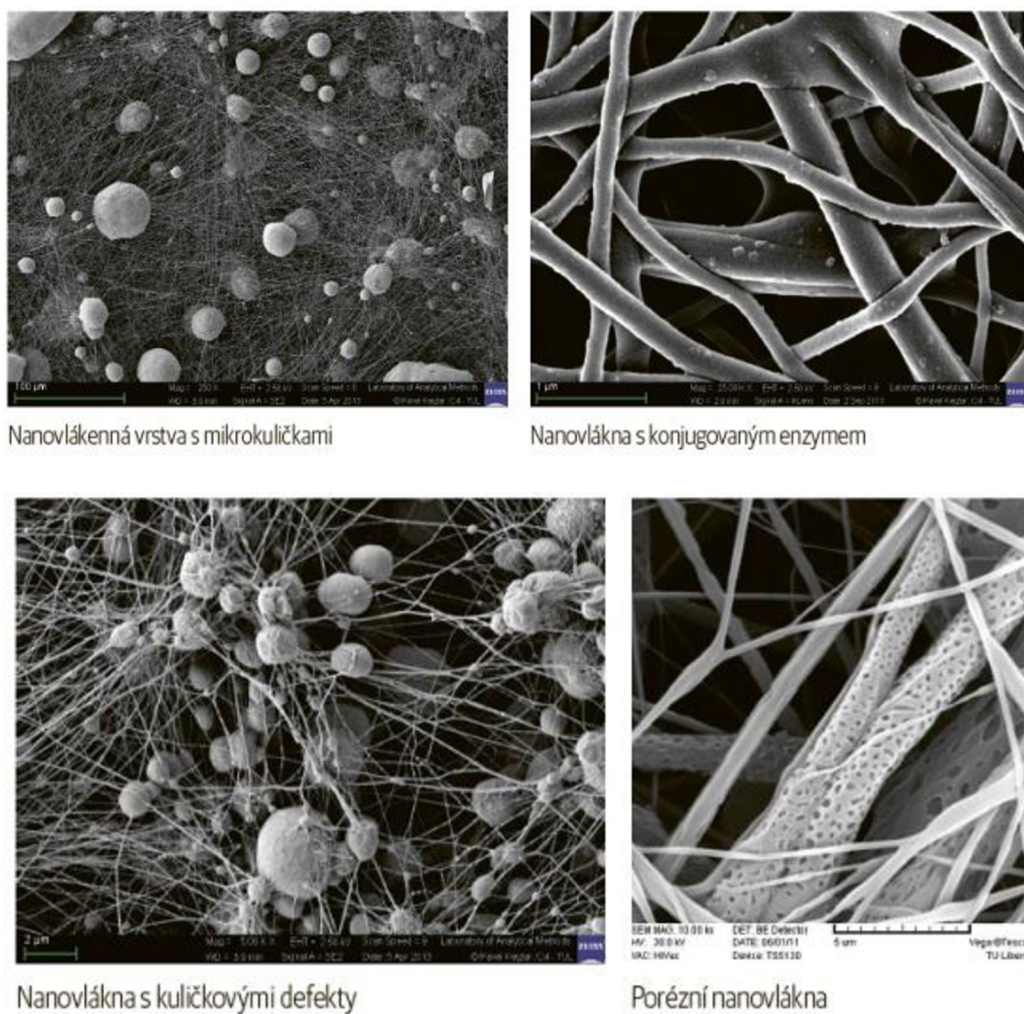
Tato metoda vznikla na základě technologie spin-coating, která vytváří tenké polymerní filmy na discích. Do středu disku je po kapkách nanášen roztok. Ten se rozprostře rovnoměrně po celém disku. Po zastavení rotace, dojde k odpaření rozpouštědla a vznikne tenká ochranná vrstva. [9]



Obrázek 13: Schéma spin-coatingu [22]

### 2.7.3. Procesní parametry odstředivého zvlákňování

Vady vláken při odstředivém zvlákňování vznikají na základě špatných procesních parametrů. U tryskového odstředivého zvlákňování může nastat problém u průměru trysky. Velká tryska s velkými průtoky má za následek vznik kapek, ze kterých se tvoří kuličky na vláknech, nebo může odletět na již hotová vlákna vytvořit v nanovlákně díru. Další provázané procesní parametry jsou viskozita, teplota, koncentrace polymeru v roztoku a otáčky spinnerety. Pokud vytvoříme roztok s vyšší koncentrací polymeru, sníží se viskozita roztoku, tudíž je potřeba zvýšit otáčky. Vzdálenost kolektoru a spinnerety, teplota a rozpouštědlo musí být opět takové, aby rozpouštědlo stihlo vyprchat dříve, než dopadne na kolektor. [10]



Nanovlákněná vrstva s mikrokuličkami

Nanovlákněná vrstva s konjugovaným enzymem

Nanovlákněná vrstva s kuličkovými defekty

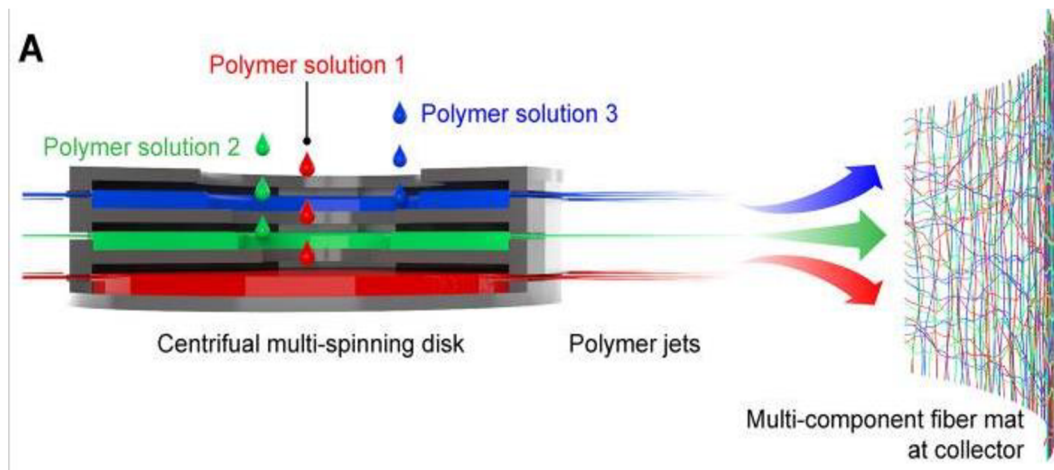
Porézní nanovlákněná vrstva

Obrázek 14: Defekty nanovláken [23]

## 3. Vybrané technologie odstředivého zvlákňování

### 3.1. Multispinningová výroba

Technologie Multispinning vznikla za účelem navýšení produkce nanovláken odstředivým zvlákňováním. Navýšení produkce bylo dosaženo rozdělením jednoho hlavního disku na tři dílčí vertikálně odsazené disky s rozdílnými průměry. Tím došlo k znásobení počtu trysek, ze kterých jsou tvořeny nanovlákná. Nanovlákná z různých disků nemají žádné morfologické změny ani rozdílné průměry. Také je možné vyrábět sítě s různými druhy nanovláken. Stačí přivádět rozdílné směsi roztoku polymeru na jednotlivé disky. Konečným produktem je vysoce kompaktní nanovláknenná síť využívaná k výrobě roušek. [5]

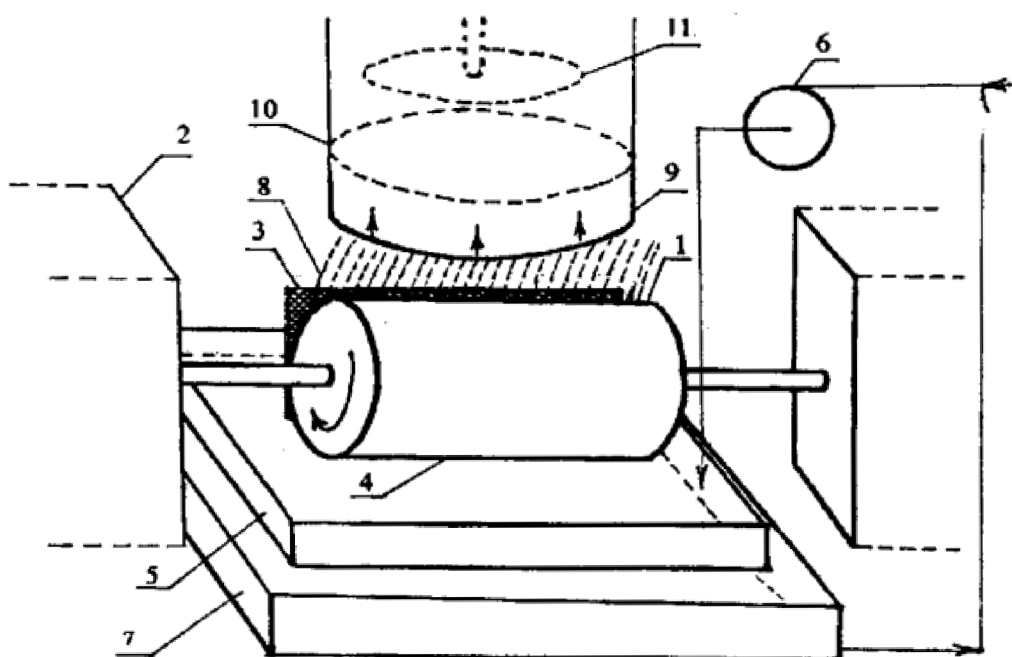


Obrázek 15: Princip metody Multispinningové výroby [5]



### 3.2. Zvlákňování z povrchu válce

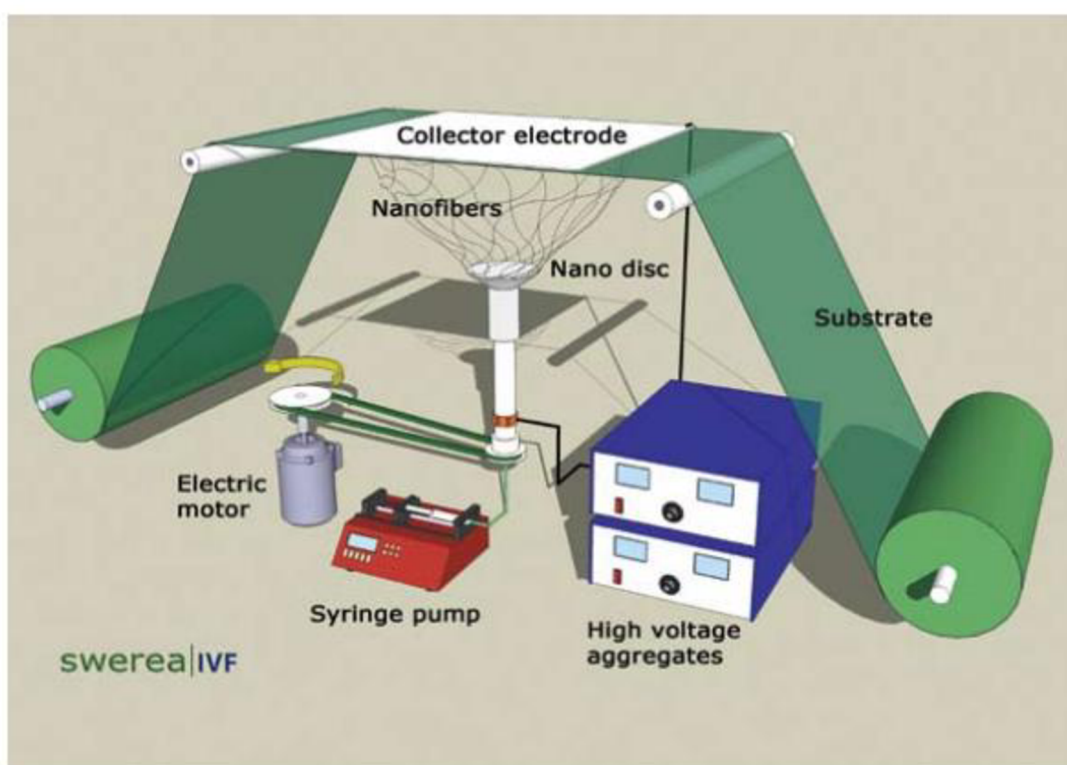
Technologie zvlákňování z povrchu válce je založena na nanášení taveniny či polymeru mezi kovovou mřížku a povrch jedno či více válců, které rotují alespoň rychlostí 1000 otáček za minutu. Tím vznikne na válci film, ze kterého díky Raleigh-Taylorově nestabilitě dochází k oddělování mikrovláken a nanovláken. Vlákna mají průměry 25 až 600nm a jsou z nich vytvářené netkané textilie nebo vaty. Navyšování produkce dochází zvyšováním počtu rotujících válců. [6]



Obrázek 16: Princip zvlákňování z povrchu válce, patent CZ303297B6 [6]

### 3.3. Elektro-odstředivé zvlákňování

Švédská výzkumná skupina Swerea IVF4 zkombovala elektrostatické a odstředivé zvlákňování. Vytvořila tím zařízení s vysokou produkcí nanovláken. Polymerní roztok je čerpán na dno rotujícího disku, který má tvar paraboly. Odstředivou silou je dopravován na okraj rotujícího disku, kde je překonáno povrchové napětí roztoku a vznikne mnoho kapalných paprsků. Tím se roztok ocitl ve formě kapalných paprsků v elektrické poli, které pomáhá k roztahování a formování nanovláken a vede je ke kolektoru. Na tuto metodu výroby nemá vliv okolní teplota ani vlhkost vzduchu, které běžně mají vysoký vliv na průměry a kvalitu samotných vláken. Výrobkem je netkaná textilie. [7]



Obrázek 17: Princip elektro-odstředivého zvlákňování [7]

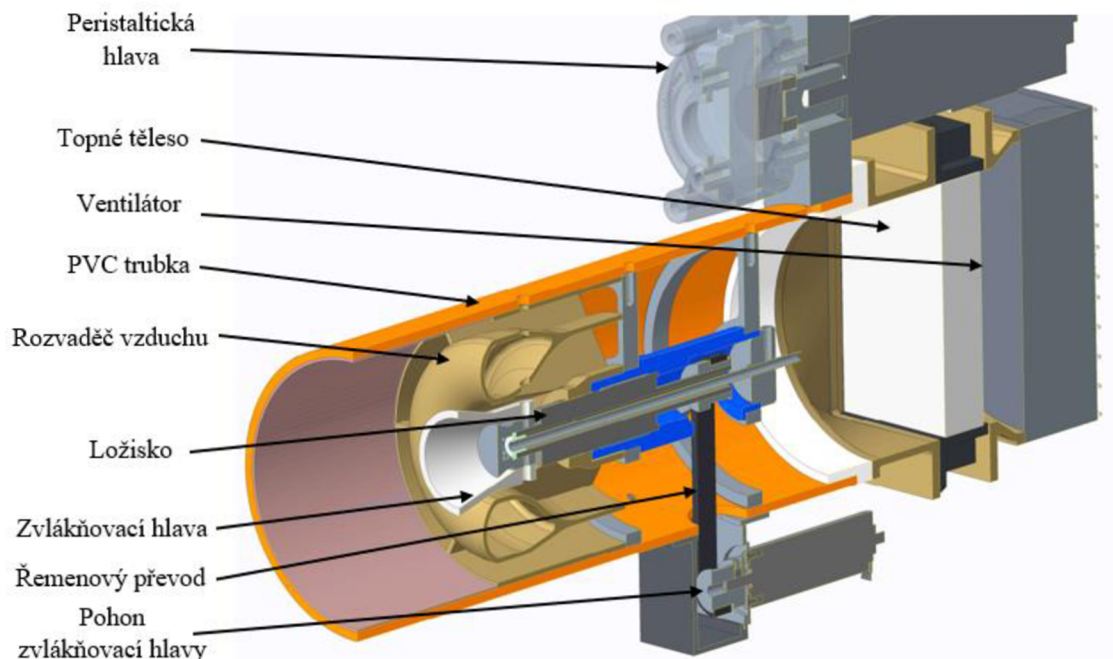


## 4. Současná konstrukce zařízení pro odstředivé zvlákňování

### 4.1. Popis současné konstrukce

Výchozí konstrukcí pro bakalářskou práci je zvlákňovací jednotka navržena na Technické univerzitě na oddělení katedry textilních strojů.

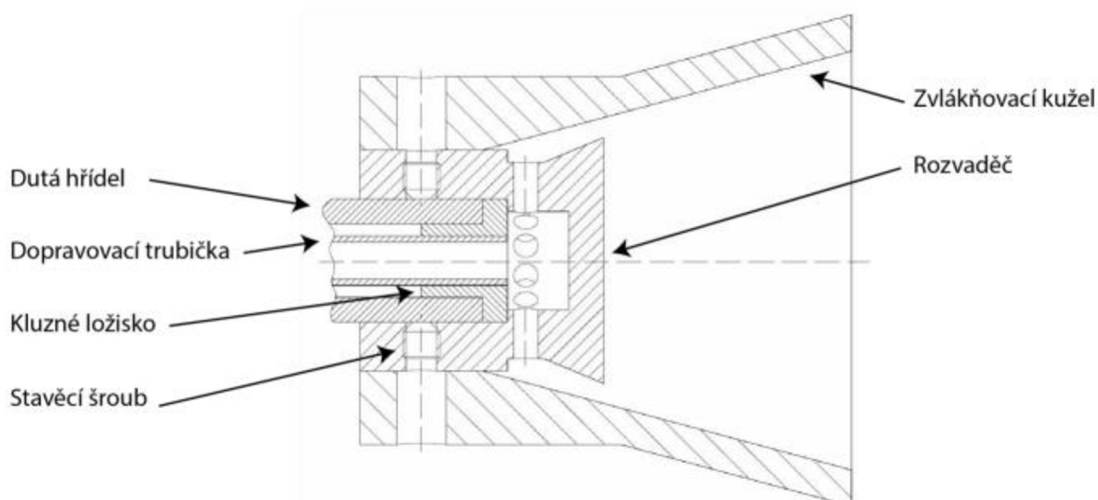
Zvlákňovací jednotka se skládá z PVC trubky o průměru 110 [mm], ve které jsou uloženy stěžejní komponenty zvlákňovacího zařízení. Trubkou proudí vzduchu, který je zajištěn ventilátorem na konci PVC trubky, skrz topné těleso pro úpravu vstupního vzduchu do rozvaděče vzduchu. Zde je rozdělen na horní a dolní proud. Dolní proud je usměrněn ke zvlákňovací hraně, kde vznikající nanovlákná jsou deformována ohybem a směřována ven ze zvlákňovací jednotky. Horní proud vzduchu je pouze dopravní a unáší nanovlákná ven z trubky. Polymer do zvlákňovací hlavy je čerpán z nádržky polymeru peristaltickou hlavou poháněnou DC motorem PG420-24-49B s planetovým převodem 3000:1. Z čerpadla vede hadička do dopravní trubičky, která je uložena v duté hřídeli vysokootáčkového ložiska a vede až do zvlákňovací hlavy. Otáčení hřídele se zvlákňovací hlavou je zajištěné DC motorem FAULHABER 2264-BP4-DFE a přenos výkonu je realizován řemenovým převodem.



Obrázek 18: Popis původní konstrukce

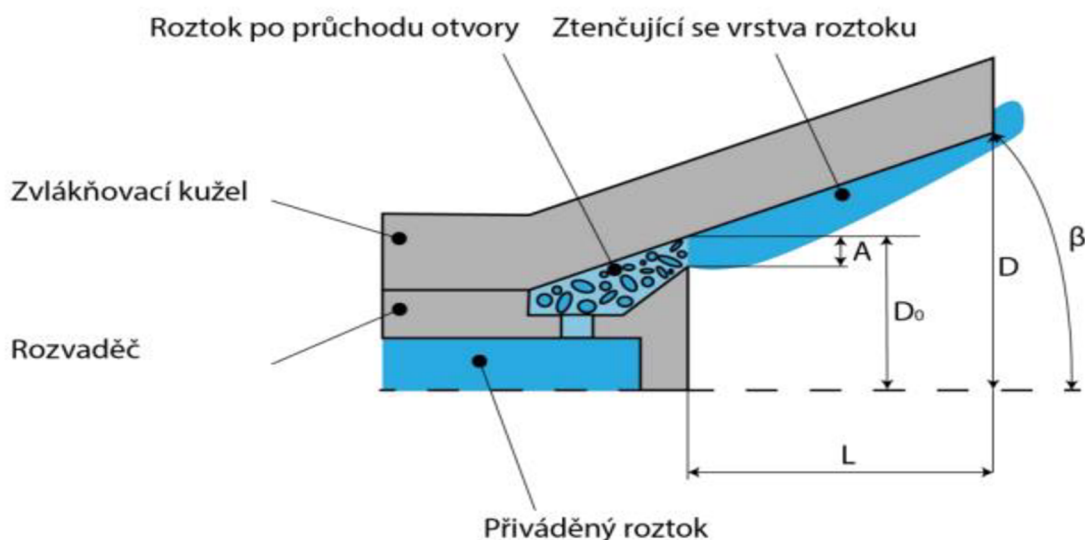
## 4.2. Popis zvlákňovací hlavy

Zvlákňovací hlava má několik stěžejních částí. Polymer přitéká do zvlákňovací hlavy trubičkou, která prochází vysokootáčkovým ložiskem s dutou hřídelí. Tato mosazná trubička je uložena v teflonovém kluzném ložisku, které je z části v duté hřídeli a z části v rozvaděči polymeru.



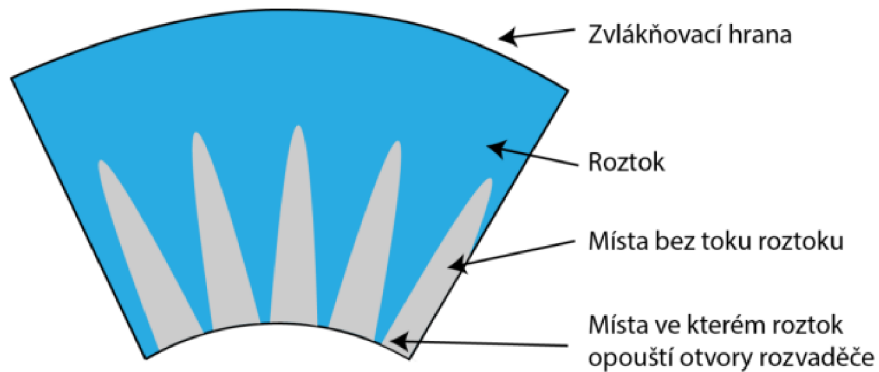
Obrázek 19: Popis původní zvlákňovací hlavy [24]

Na obrázku 20 je znázorněn přívod polymeru do původního rozvaděče polymeru. Polymer je přiveden do rozvaděče, který funguje jako první zásobník. Odtud polymer proudí dopravními otvory, které jsou kolmé na osu rotace, do prostoru mezi rozvaděčem a zvlákňovacím kuželem. Tento prostor slouží jako druhý zásobník polymeru. Polymer dále proudí štěrbinou o hodnotě  $A$  udávající tloušťku vrstvy polymeru a je nastavitelná díky posunutí zvlákňovacího kužele.



Obrázek 20: Schéma toku polymeru původním rozvaděčem [24]

Obrázek 21 znázorňuje cestu polymeru ke zvlákňovací hraně. Polymer by se měl od dopravních otvorů kontinuálně rozlévat do stran a vytvářet tak tenkou vrstvu polymeru zvanou „film“.

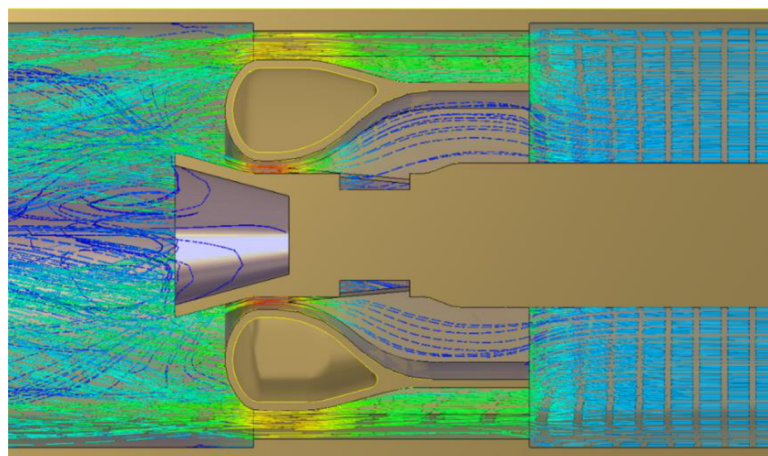


Obrázek 21: Schéma rozptýlení polymeru po ploše zvlákňovacího kužele [24]

Ve skutečnosti nedocházelo ke spojení proudů polymeru. Docházelo jen k částečnému rozptýlení a na zvlákňovací hraně vznikla suchá místa bez roztoku.

### 4.3. Popis rozvaděče vzduchu

Při návrhu nové konstrukce bylo prvním krokem zhodnocení původního rozvaděče vzduchu. Původní zvlákňovací jednotkou proudil vzduch přibližně o rychlosti 15 [m/s]. Proud vzduchu byl rozvaděčem rozdělen na dva hlavní proudy. Dolní proud byl nasměrován ke zvlákňovací hraně. Zde jeho úloha byla deformace nanovláken ohnutím a nasměrování nanovláken do horního proudu vzduchu. Horní proud vzduchu měl za úkol unášet nanovlákná ven ze zvlákňovací jednotky až na požadované místo. Pomocí CFD (Computational Fluid Dynamics) byla stanovena trajektorie proudu vzduchu.



Obrázek 22: Simulace proudění vzduchu původním rozvaděčem

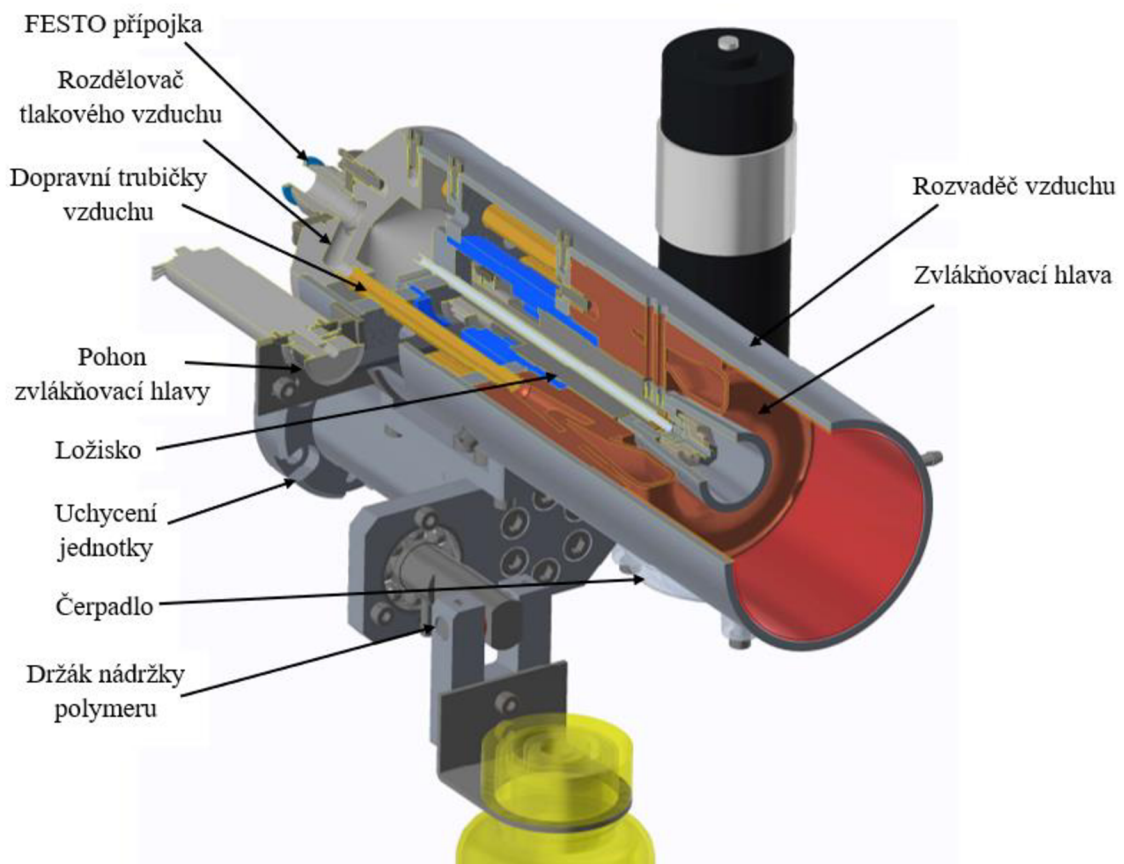
## 5. Nová konstrukce

### 5.1. Návrh nové konstrukce

1. Zajištění rovnoměrného rozprostření polymeru po celé vnitřní ploše zvlákňovacího kužele. Tím se zajistí maximální výrobní kapacita výroby nanovláken touto metodou odstředivého zvlákňování.
2. Proud vzduchu zajistit přívodem stlačeného vzduchu. Z toho důvodu je nutno zmenšit vnější rozměry a navrhnout nový rozvaděč vzduchu.
3. Zajistit lepší přívod polymeru použitím jiného čerpadla.
4. Umístění zvlákňovací jednotky na robota IRB 2600 TYPE C

### 5.2. Popis zvlákňovací jednotky

Nová konstrukce zachovává některé části původního zařízení. Jedná se o rychloběžné ložisko s dutou hřídelí, která umožňuje dopravení polymeru do zvlákňovací hlavy. Dále přenos výkonu na hřídel ložiska je uskutečněn řemenovým převodem. Čerpání polymeru zajišťuje peristaltické čerpadlo. Nově navrhnuté části jsou detailně popsány v následujících kapitolách.



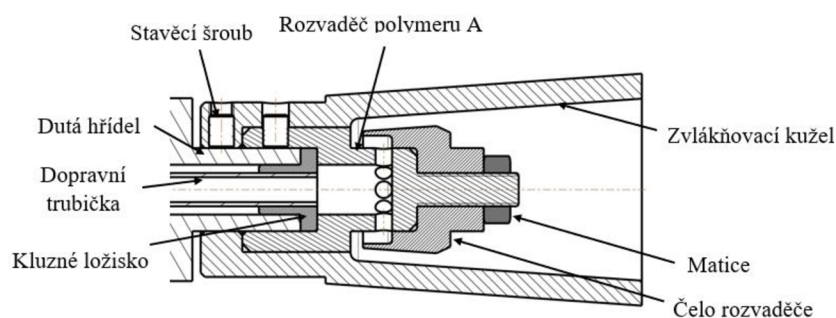
Obrázek 23: Popis nové zvlákňovací jednotky



### 5.3. Zvlákňovací hlava

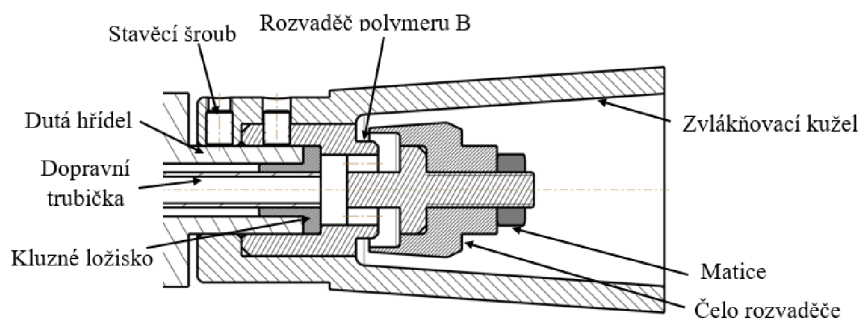
Zvlákňovací hlava je stěžejní část celé výroby nanovláken v případě odstředivého beztryskového zvlákňování. Jak již bylo uvedeno výše, původní zvlákňovací hlava nedokázala kompletně rozprostřít polymer po celé ploše zvlákňovacího kužele. Toto nedokonalé rozprostření má za následek vznik nanovláken pouze v místech proudu polymeru namísto z celé zvlákňovací hrany. Cílem práce bylo zajistit rovnoměrné rozprostření polymeru po celé ploše zvlákňovacího kužele.

Varianta řešení A spočívá v zachování dopravních otvorů vrtaných kolmo na osu rotace a přidáním čela rozvaděče. Čelo rozvaděče má lem, který plní funkci zdymadla. Pro polymer tvoří překážku, díky které začne polymeru vyplňovat prostor mezi dopravními otvory a vznikne zde zásoba polymeru. Dále polymer překoná lem a teče na zvlákňovací kužel. Zde je již vytvořená rovnoměrná vrstva polymeru, která teče ke zvlákňovací hraně.



Obrázek 23: Popis zvlákňovací hlavy A

Navržená varianta B má dopravní otvory rovnoběžné s osou rotace. Polymer jimi proudí do prostoru, který je mnohem větší než varianty A. Čelo rozvaděče zde plní stejnou funkci jako v předchozí variantě. Větší prostor za dopravními otvory by měl zajistit dostatečné množství polymeru k zaplnění nedostatečně přeplavených oblastí. Při testování je možno zkoumat, zda má vliv orientace dopravních otvorů na rozprostření polymeru.

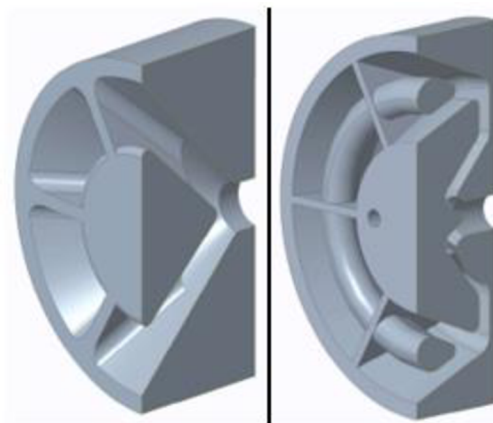


Obrázek 24: Popis zvlákňovací hlavy B

## 5.4. Vzduchový systém zvlákňovací jednotky

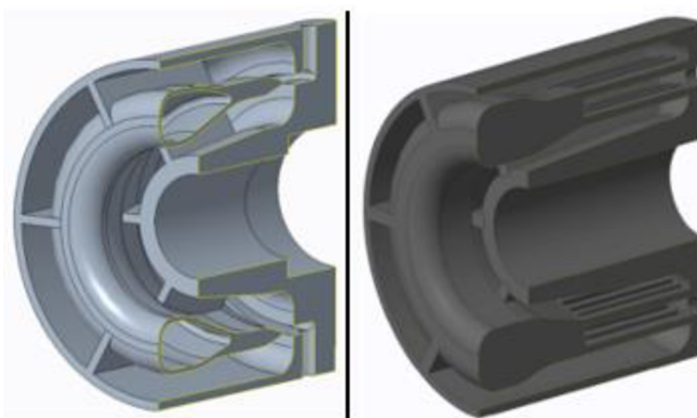
### 5.4.1. Vývoj vzduchového systému

Prvotní myšlenkou bylo v původním umístění ventilátoru rozdělit stlačený vzduch do šesti sekcí a do celého prostoru trubky. Vzduch měl pak proudit dále do rozvaděče vzduchu. Tato myšlenka se ukázala jako velice neefektivní. Náhlým rozšířením došlo k velkým ztrátám a vzniku turbulencí. Na obrázku níže jsou dvě varianty rozdělovače vzduchu pro toto řešení, které nebyly použity.



Obrázek 25: Varianty rozdělovače tlakového vzduchu

Ze simulací proudění bylo zjištěno, že je efektivnější dopravit stlačený vzduch přímo do rozvaděče a jeho rozptýlení do celého prostoru řešit až v něm. Možným řešením byl přívod ze strany a zadní stranou rozvaděče. Přívod ze strany však nebyl možný z důvodu možného poškození vnějšího vedení, z důvodu vysokých ztrát a z důvodu zástavbových rozměrů. Mnohem vhodnější je přívod přímo zadní stranou z důvodu minimálních ztrát dopravou vzduchu, tak ze zástavbových rozměrů, kdy je možné umístit dopravní vedení do hliníkové trubky. Pomocí CFD bylo provedeno mnoho simulací řady variant provedení rozvaděče vzduchu.

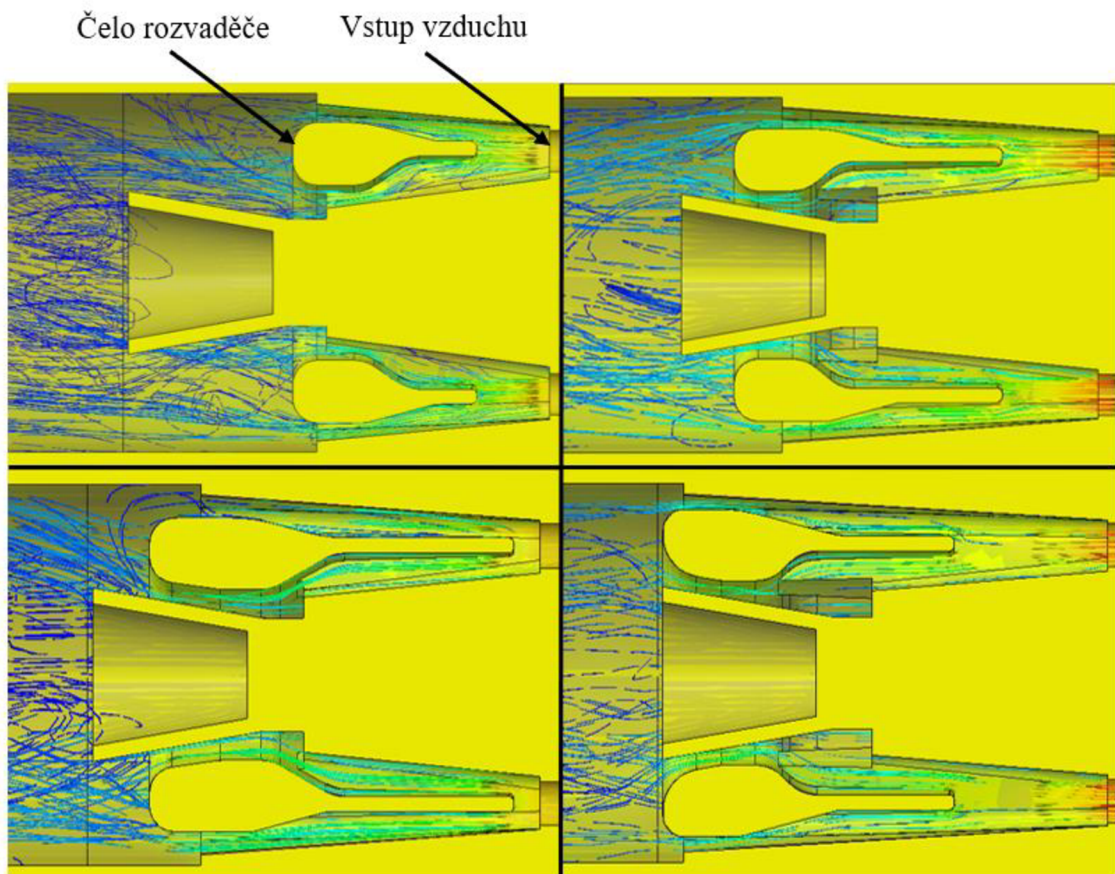


Obrázek 26: Varianty rozvaděčů vzduchu

Na následujícím obrázku je zobrazen sled vývoje rozvaděče vzduchu. Ve všech variantách se prostor kónicky rozšiřuje od vstupu po čelo rozvaděče.

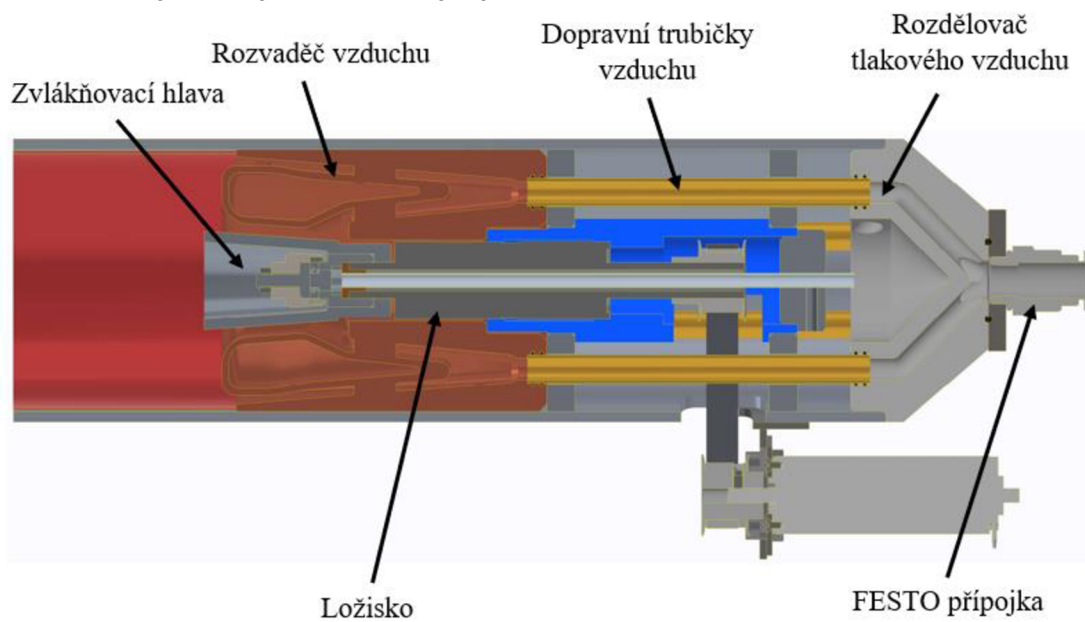
Prvotním krokem byla redukce průměru původního rozvaděče vzduchu na průměr 80 [mm]. Bylo zjištěno, že tento tvar není úplně vhodný pro stlačený vzduch, nýbrž byl navržen pro proud vzduchu vytvořený ventilátorem.

Z výsledků simulace vznikalo mnoho nových poznatků, ale zároveň i otázek. U rozvaděče vzduchu pro ventilátor docházelo k rozdělení proudu, následnému usměrnění a případné urychlení vzduchu. Při práci se stlačeným vzduchem byla snaha o zamezení vzniku turbulencí, rozptýlení do celého potřebného prostoru, udání směru proudu, dosažení stability a zamezení ztrát například náhlým rozšířením. Přes postupné úpravy a simulace se navrhl finální tvar rozvaděče, který je popsán v následující kapitole.



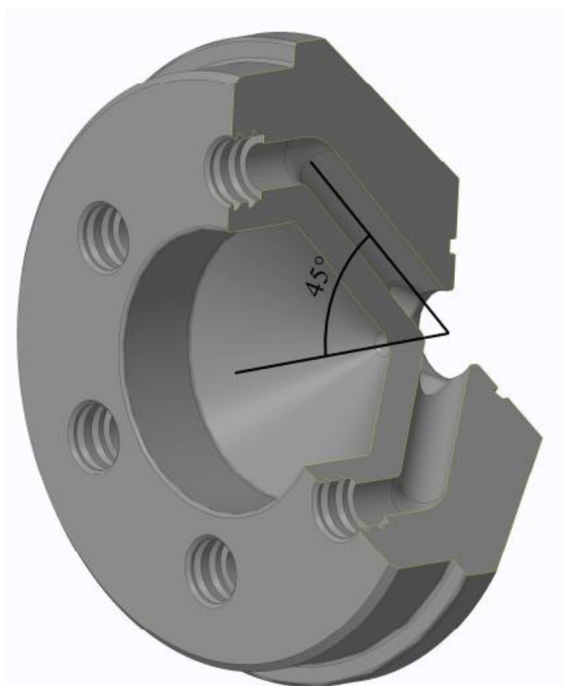
Obrázek 27: Simulace proudění různými rozvaděči

### 5.4.2. Výsledný vzduchový systém



Obrázek 28: Popis zvlákňovací jednotky

U nové konstrukce byl odstraněn ventilátor a byl nahrazen přívodem stlačeného vzduchu. Na konci zvlákňovací jednotky je šroubení s nástrčnou koncovkou FESTO QS-G1/4-10 pro připojení hadice o vnějším průměru 10 [mm], kterou proudí vzduch do zařízení. Šroubení ústí do rozdělovače tlakového vzduchu, který rozděluje proud vzduchu do šesti dopravních uzlů. Rozdělovač má vnitřní dutiny sklopené o úhel  $45^\circ$ , aby nedocházelo k tak velkým ztrátám.

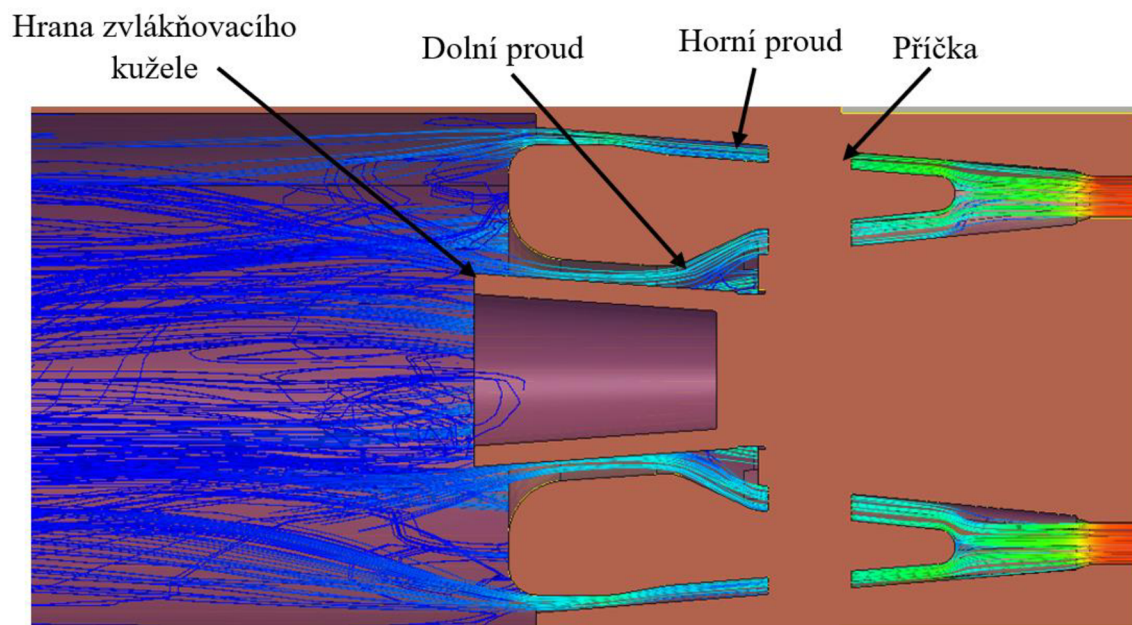


Obrázek 29: Rozdělovač tlakového vzduchu



Dopravní uzly jsou ocelové trubky o průměru 8 [mm], které ústí do rozvaděče vzduchu. Dané řešení je z důvodu minimalizace ztrát. Pokud by totiž došlo k náhlému rozšíření již na začátku zvlákňovací jednotky, způsobilo by vznik turbulencí a vzduch by ztratil téměř veškerou svou rychlost.

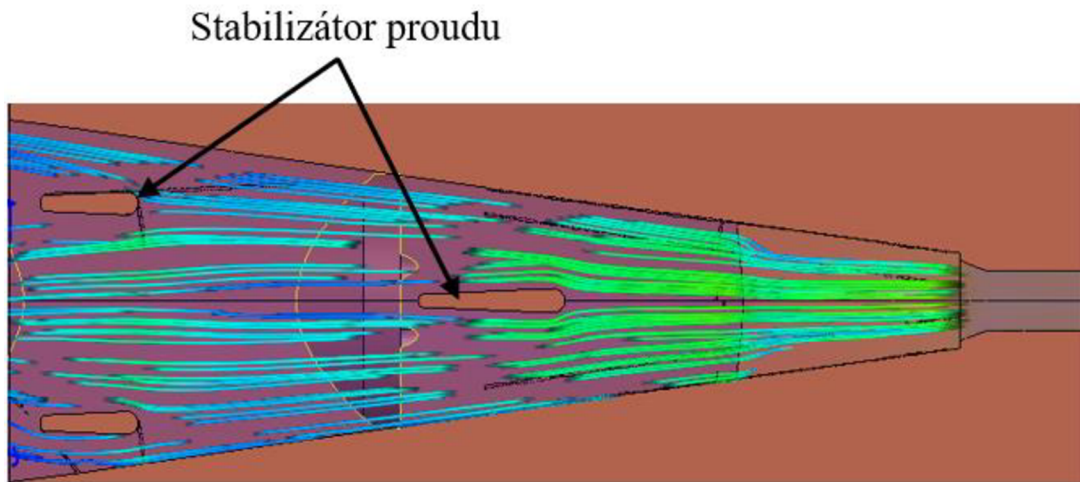
Rozvaděč vzduchu je hlavní část celého vzduchového systému. Od konce dopravní trubičky se prostor, do kterého vstupuje stlačený vzduch, kónicky zvětšuje a dochází k rozdělení vzduchu na horní a dolní proud. Oba proudy jsou vedeny úzkými prostory z důvodu zachování kinetické energie vzduchu. Dolní proud je přiveden ke hraně zvlákňovacího kužele, kde jeho úkolem je deformace ohnutím vznikajících nanovláken a jejich nasměrování do horního proudu vzduchu. Horní proud dopravuje vzniklá nanovláken ven ze zvlákňovací jednotky až na podkladový materiál.



Obrázek 30: Simulace proudění rozvaděčem vzduchu

Rozvaděč byl prodloužen. Čelo rozvaděče je 5 [mm] před hranou zvlákňovacího kužele. Popisovaná úprava zajišťuje přívod vzduchu s minimálními ztrátami přímo k místu vzniku nanovláken. Následně pak změna vstupního tlaku má větší vliv na rychlost v klíčových místech a vliv na vznikající nanovlákná.

Byly navrženy dvě varianty rozvaděče vzduchu. Varianta A usměrňuje 60 % přivedeného vzduchu do dolního proudu a 40 % do horního. Varianta B má poměr přesně opačný. Tedy 40 % vzduchu do dolního proudu a 60 % do horního proudu. Navržené konstrukční varianty ověří, jaký proud vzduchu má větší vliv na vznikající nanovlákná.



Obrázek 31: Simulace proudění vzduchu okolo přiček

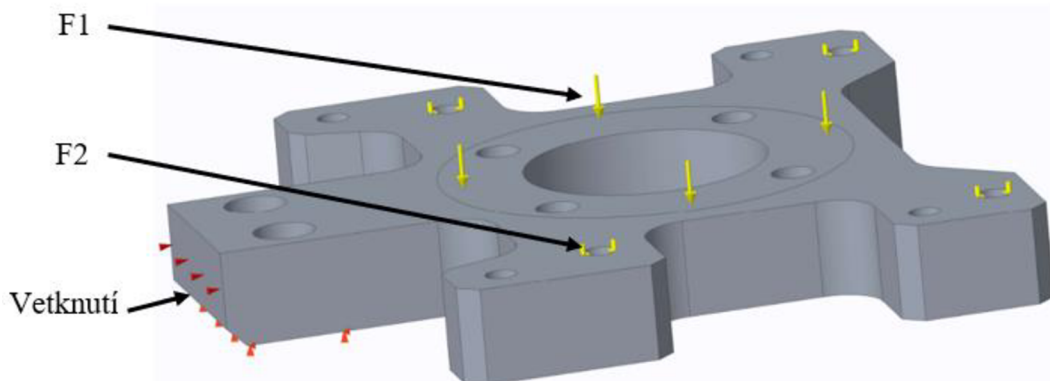
V rozvaděči jsou stabilizátory proudu, které by měli usměrňovat a stabilizovat proud vzduchu. V horním proudu se nacházejí tři stabilizátory a v dolním jeden.

## 5.5. Pevnostní analýza

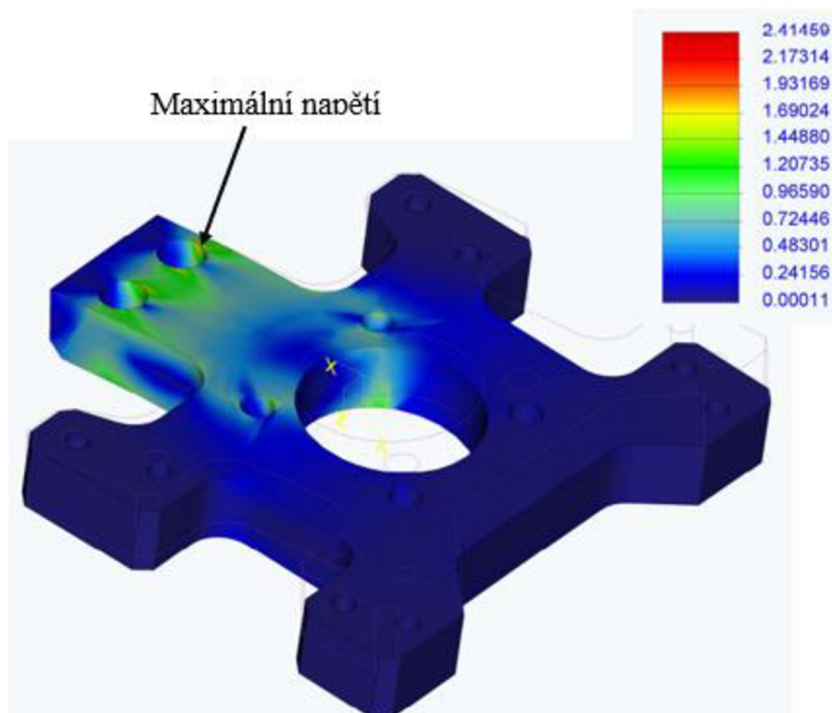
Na zvlákňovací jednotce byly určeny dvě součásti pro pevnostní kontrolu metodou konečných prvků (MKP). Oba díly jsou vyrobeny z materiálu EN AW-6082 T651, jehož mez pevnosti  $R_m=300$  [MPa] a mez kluzu je  $R_p = 240$  [MPa]. Napětí v dílech by tedy nemělo přesáhnout 240 [MPa].

### 5.5.1. Příruba čerpadla

Příruba čerpadla má vnější rozměry 80x80x10. Přebytečný materiál byl odebrán. Díl je uchycený pomocí dvou šroubů, což v simulaci je bráno jako vetknutí. Zatížení je vyvozeno silou  $F_1=8$  [N] od motoru čerpadla, silou  $F_2=2$  [N] od peristaltického čerpadla. Do zatížení je započtena gravitace. Pro pevnostní analýzu byl použit program Creo 9 Simulate.

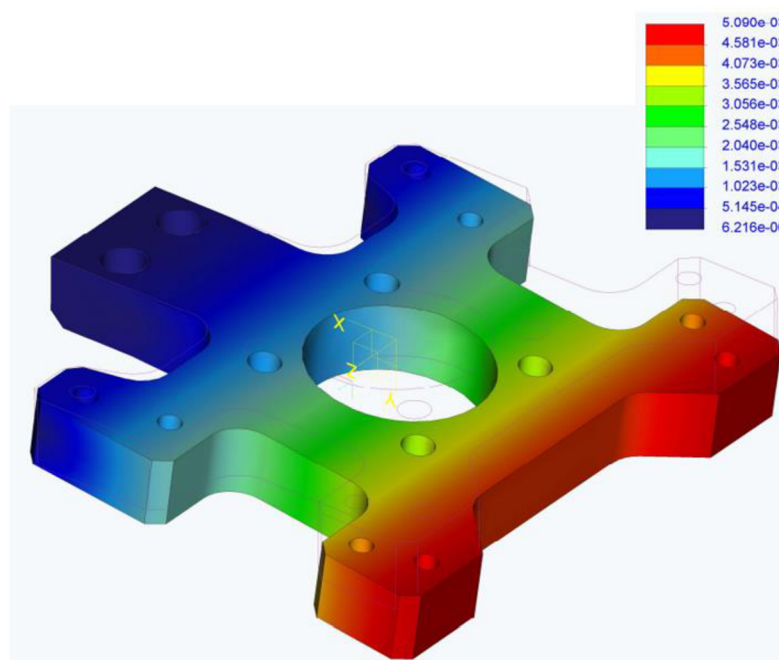


Obrázek 32: Výpočtový model příruby čerpadla



Obrázek 33: Rozložení napětí v přírubě čerpadla

Maximální napětí v přírubě čerpadla je 2,4 [MPa] a kritickým místem je hrana otvoru pro uchycení příruby. Maximální hodnoty napětí nedosahují meze kluzu.

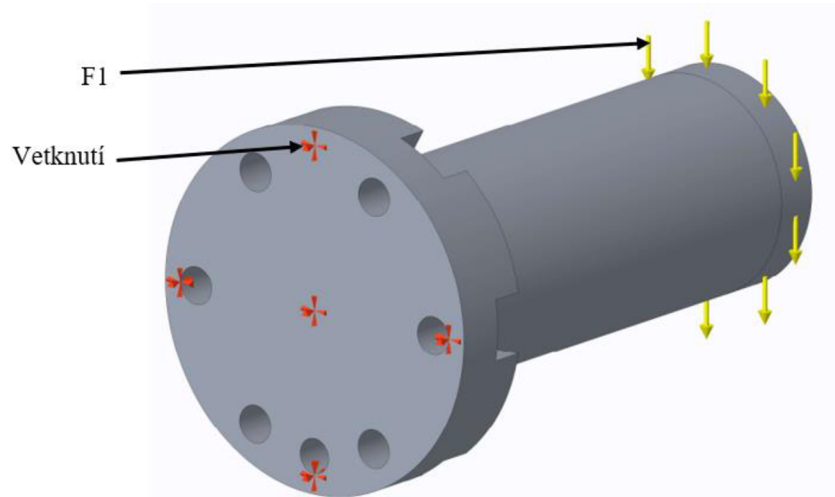


Obrázek 34: Deformace příruby čerpadla

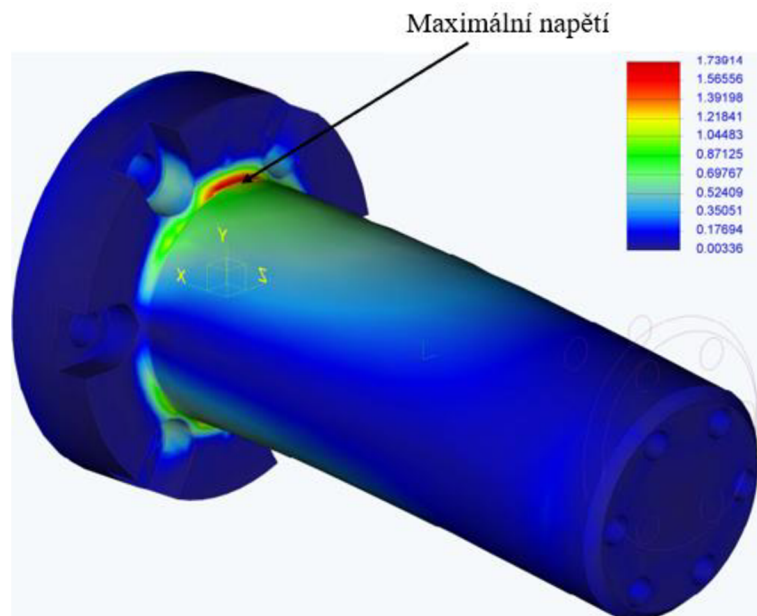
Maximální magnituda je 0,005 [mm], jedná se o zanedbatelnou hodnotu a nemá žádný vliv.

### 5.5.2. Připojovací příruba zvlákňovací jednotky

Příruba je zatížena celou hmotností zvlákňovací jednotky na ploše široké 10 [mm] o průměru 38 [mm]. Rameno je zatíženo vlastní vahou od gravitace a silou  $F_1=50$  [N] od zvlákňovací jednotky. Rameno je připevněno k robotovi částí o průměru 63 [mm] a šířce 15 [mm] pomocí 6 šroubů M6. Pro pevnostní analýzu byl použit program Creo 9 Simulate.

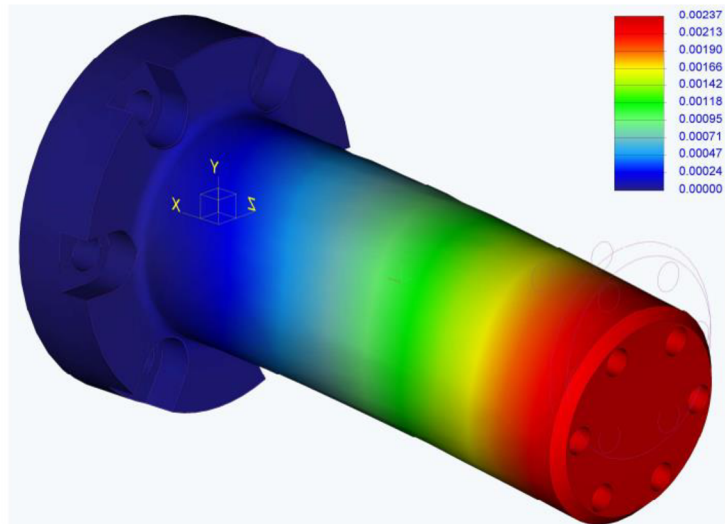


Obrázek 35: Výpočtový model připojovací přírubby



Obrázek 36: Rozložení napětí v připojovací přírubě

Vzhledem k tvaru přírubby a jeho zatížení bylo předpokládáno kritické je v oblasti přechodu průměru z 38 [mm] na 63 [mm]. Průběh napětí nám tento předpoklad potvrdil a největší napětí je 1,74 [MPa] v oblasti přechodu průměrů. Maximální napětí nedosahuje meze kluzu.



Obrázek 37: Deformace připojovací příruby

Maximální magnituda je na samotném konci ramene na průměru 38 [mm]. Posunutí je o 0,002 [mm] což je zanedbatelná hodnota.

## 5.6. Čerpadlo

Pro žádaný chod zvlákňovací jednotky, je důležitý stabilní přívod polymeru do zvlákňovací hlavy. Peristaltické čerpadlo poskytuje spíše pulzní přívod polymeru, který je nežádoucí. Z toho důvodu jsou na zvlákňovací jednotce připraveny otvory pro uchycení magnetického zubového čerpadla GJ-N25, které se vyznačuje plynulým, bezpulzním dodáváním čerpané kapaliny.

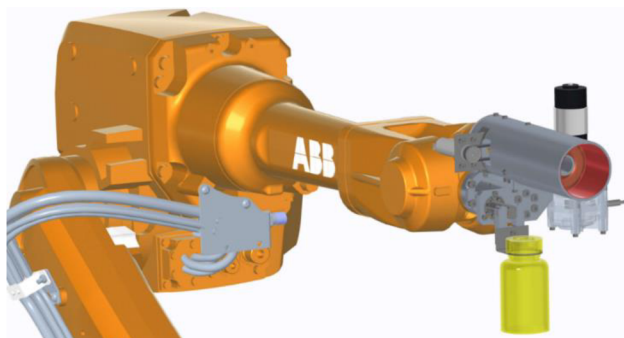


Obrázek 38: Magnetického zubového čerpadla [25]



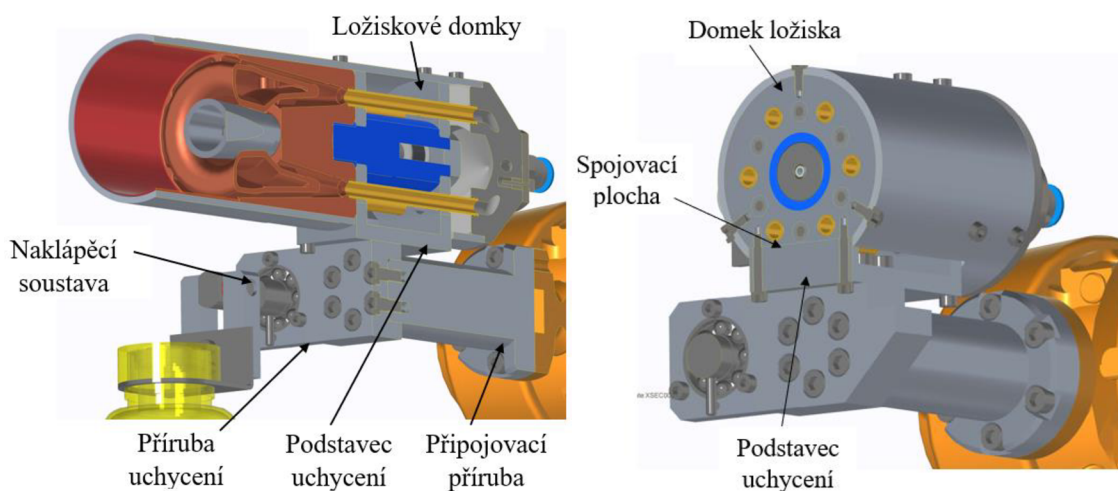
## 5.7. Připojení na rameno robota IRB 2600 TYPE C

Zvlákňovací jednotka je umístěna na robota IRB 2600 TYPE C. Umístěním zařízení na robota je předpokládáno rovnoměrné nanášení nanovláken na požadovaný objekt. Zařízení je možné naklápět vůči vodorovné ose nahoru o  $50^\circ$  a dolů o  $70^\circ$ . Dále je možné otáčet zařízení kolem osy rotace spinnerety proti směru hodinových ručiček o  $160^\circ$  a po směru o  $90^\circ$ . Díky tomu může být podkladové těleso i jiného než rovinného tvaru. Například polokoule.



Obrázek 39: Robot IRB 2600 TYPE C se zvlákňovací jednotkou

Zvlákňovací jednotku nelze uchytit přímo za konec vzduchového kanálu z důvodu přívodu stlačeného vzduchu, a proto byly využity ložiskové domky diskového tvaru pro uložení vysokootáčkového ložiska uvnitř trubky. Na discích byla vytvořena připojovací plocha, přes kterou jsou propojeny s podstavcem uchycení. Podstavec uchycení je uchycen k přírubě uchycení, na které je naklápěcí soustava pro nádržku polymeru a peristaltické čerpadlo s pohonem. Příruba uchycení má osazení pro připojovací přírubu o šířce 10 [mm] a je zajištěno v přírubě šesti šrouby M6. Kompletní zvlákňovací jednotka je připevněna k robotovi pomocí šesti šroubů M6.

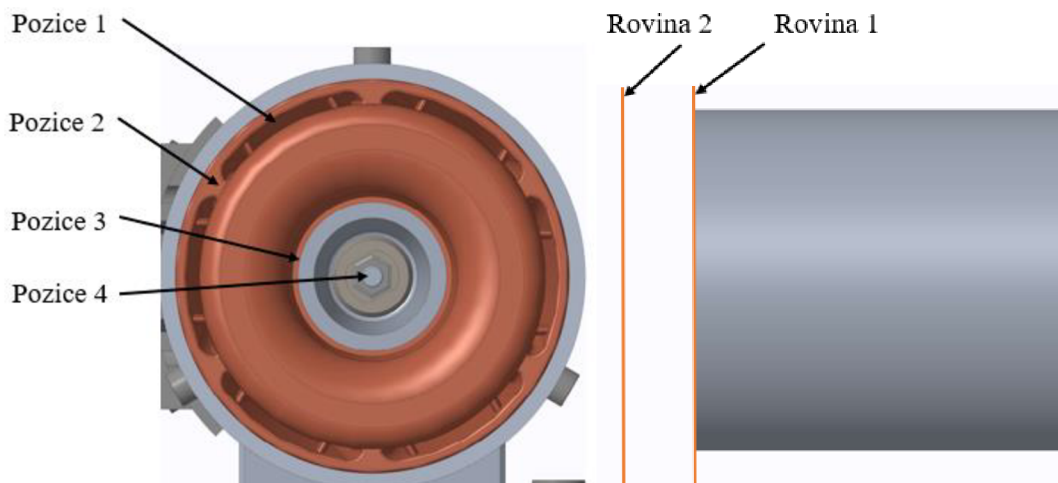


Obrázek 40: Upevnění zvlákňovací jednotky na robota

## 6. Ověření návrhu zvláknovací jednotky

### 6.1. Měření proudění vzduchu

Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.4. pro vzduchový systém byly navrženy dva rozvaděče vzduchu, každý s jiným poměrem rozdělení vzduchu na horní a dolní proud. Rozvaděč A přivádí 40 % vzduchu do horního proudu a 60 % do dolního. Rozvaděč B přivádí 60 % vzduchu do horního proudu a 40 % do dolního proudu.



Obrázek 41: Pozice měření rychlosti vzduchu

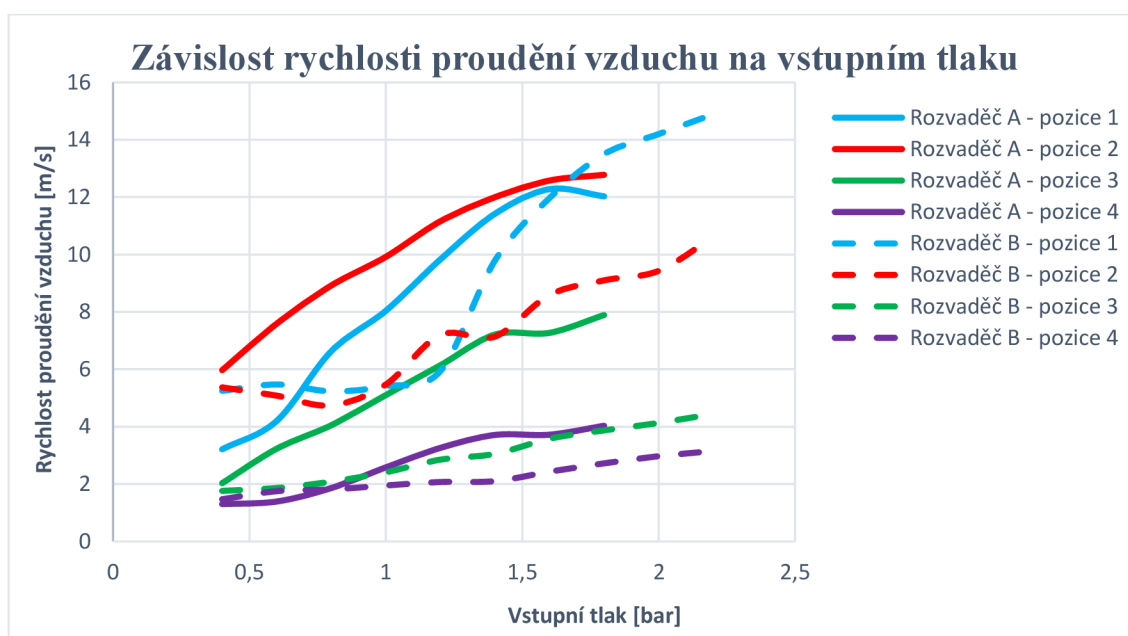
Na vstupu se reguloval tlak pomocí pneumatického regulátoru s manometrem od společnosti FESTO. Rychlost vzduchu na výstupu se měřila pomocí univerzálního měřicího přístroje ALMEMO 2890-9. Před měření byly zvoleny dvě roviny měření. Rovina 1 se nachází na konci vzduchového kanálu a rovina 2 je 15 [mm] vzdálená od roviny 1. V rovině 1 bylo měření provedeno ve 4 pozicích a v rovině 2 pouze v místech pozic 1 a 3.

Rozvaděč A						
Tlak [bar]	Rychlost vzduchu [m/s]					
	Rovina 1				Rovina 2	
	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 3	Pozice 4	Pozice 1-2	Pozice 3-2
0,4	3,21	5,97	2,03	1,3	2,58	3,7
0,6	4,2	7,59	3,23	1,39	3,15	4,74
0,8	6,63	8,92	4,05	1,86	6,17	6,32
1	8,04	9,92	5,1	2,58	7,64	7,51
1,2	9,83	11,16	6,14	3,26	9,73	9,06
1,4	11,42	12	7,21	3,71	10,88	9,54
1,6	12,28	12,58	7,27	3,72	11,65	9,84
1,8	12,03	12,78	7,89	4,03	11,45	10,45

Tabulka 1: Závislost vstupního tlaku a rychlosti vzduchu v rozvaděči A

Rozvaděč B						
Tlak [bar]	Rychlost vzduchu [m/s]					
	Rovina 1				Rovina 2	
	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 3	Pozice 4	Pozice 1-2	Pozice 3-2
0,4	5,25	5,37	1,76	1,47	5,24	2,53
0,6	5,47	5,08	1,86	1,75	5,63	2,69
0,8	5,23	4,74	2,08	1,81	6,03	2,81
1	5,41	5,47	2,41	1,95	5,18	3,45
1,2	5,94	7,2	2,85	2,07	4,95	4,23
1,4	9,79	7,14	3,05	2,1	7,28	4,08
1,6	11,97	8,59	3,58	2,43	7,31	4,97
1,8	13,5	9,1	3,87	2,72	10,16	5,46
2	14,2	9,43	4,13	2,97	11,92	5,65
2,2	14,89	10,61	4,44	3,15	13,06	6

Tabulka 2: Závislost vstupního tlaku a rychlosti vzduchu v rozvaděči B

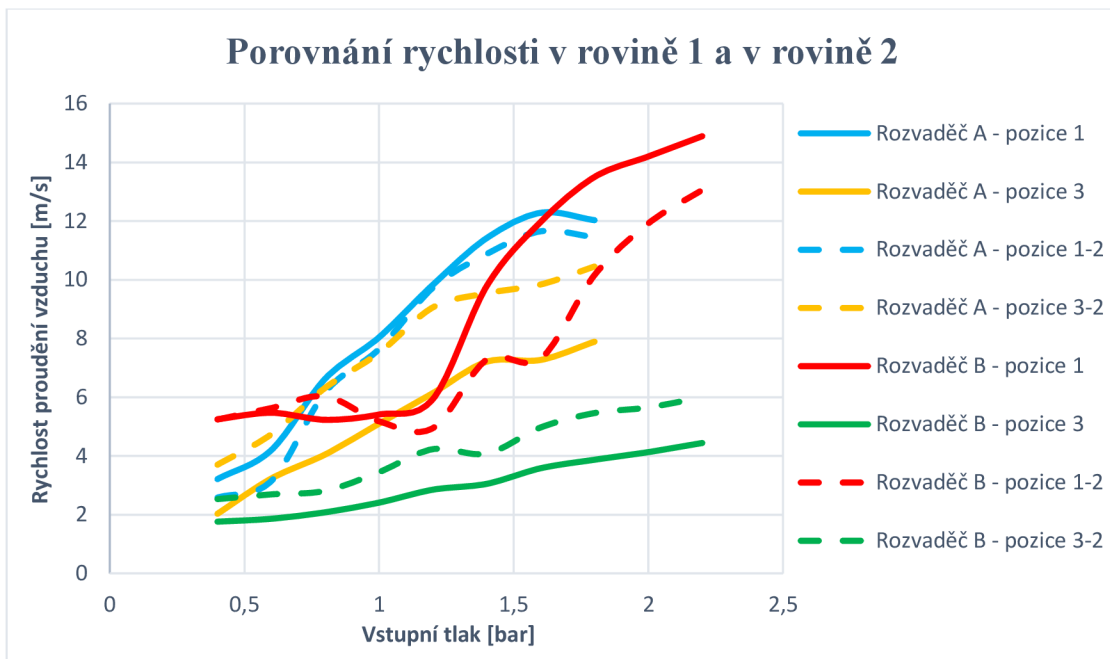


Graf 1: Závislost vstupního tlaku a rychlosti proudění v rovině 1, viz Obrázku 41

Z grafu 1 jsou patrné rozdílné průběhy rychlostí a rozložení proudů vzduchu v rozvaděčích. V rozvaděči A rychlost proudění nemá výrazné skokové změny. Horní proud je dle naměřených hodnot rovnoměrný po celém obvodu vzduchového kanálu. Horní proud dosahuje rychlosti až 11,45 [m/s] a dolní proud dosahuje rychlosti 7,89 [m/s].

V rozvaděči B při dosažení tlaku 1,2 [bar] nastává k razantnímu zvýšení rychlosti v horním proudu na pozici 1 a vůči pozici 2 začal dosahovat rozdíl v rychlosti na 4 [m/s]. Bylo zhodnoceno, že rozvaděč B má horší rozprostření horního proudu vzduchu. Zároveň proudění na pozici 3 je shodné s prouděním na pozici 4.





Graf 2: Porovnání rychlosti vzduchu viz obrázek 41

Z grafu 2 jsou patrné rozdíly v rychlostech vzduchu v rovině 1 a 2, roviny viz obrázek 41. U rozvaděče A došlo k zvýšení rychlosti dolního proudu o 2,5 [m/s] a u rozvaděče B o 1,5 [m/s]. Lze předpokládat, že horní proud vzduchu, po výstupu ze vzduchového kanálu, se přibližuje ke středu vlivem okolního vzduchu a tím urychluje dolní proud.

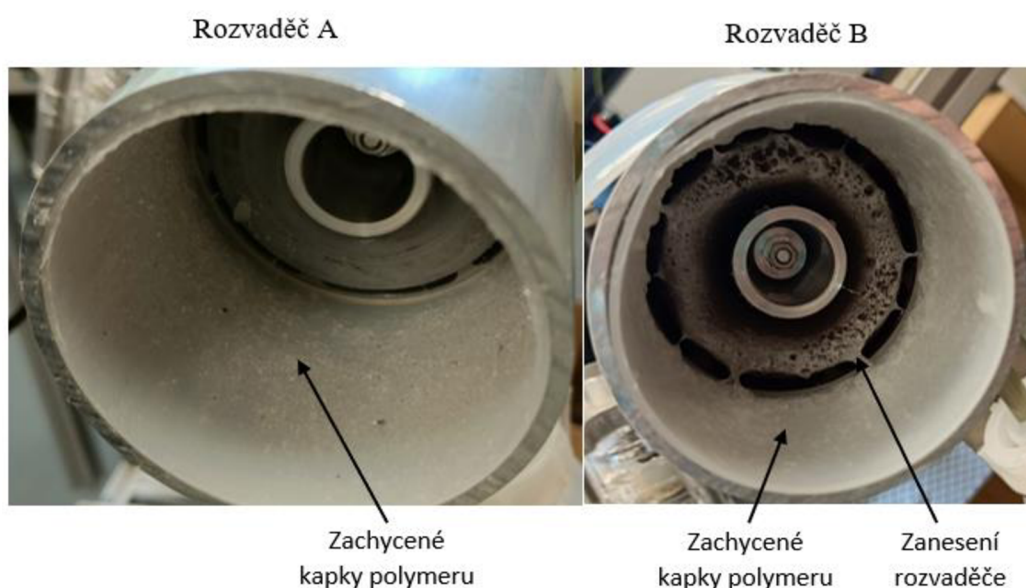


Obrázek 42: Měření rychlosti vzduchu

## 6.2. Ověření procesu zvlákňování

Navržená zvlákňovací jednotka měla ověřit vliv množství přiváděného vzduchu do horního a dolního proudu na výrobu nanovláken, možnost použití stlačeného vzduchu a ověřit funkčnost čela rozvaděče, viz kapitola 5.3.

Stlačený vzduch byl nastaven na maximální tlak, což v případě rozvaděče A bylo 1,8 [bar] a u rozvaděče B byl tlak 2,2 [bar]. Pro testování byly zvoleny otáčky 1500 [ot/min] a 3500 [ot/min]. Dávkování polymeru bylo nastaveno na 0,5 [ml/min] pomocí peristaltického čerpadla. Vzniklá vlákna byla nanášena na perlinku ze skelných vláken ve vzdálenosti 1 [m].



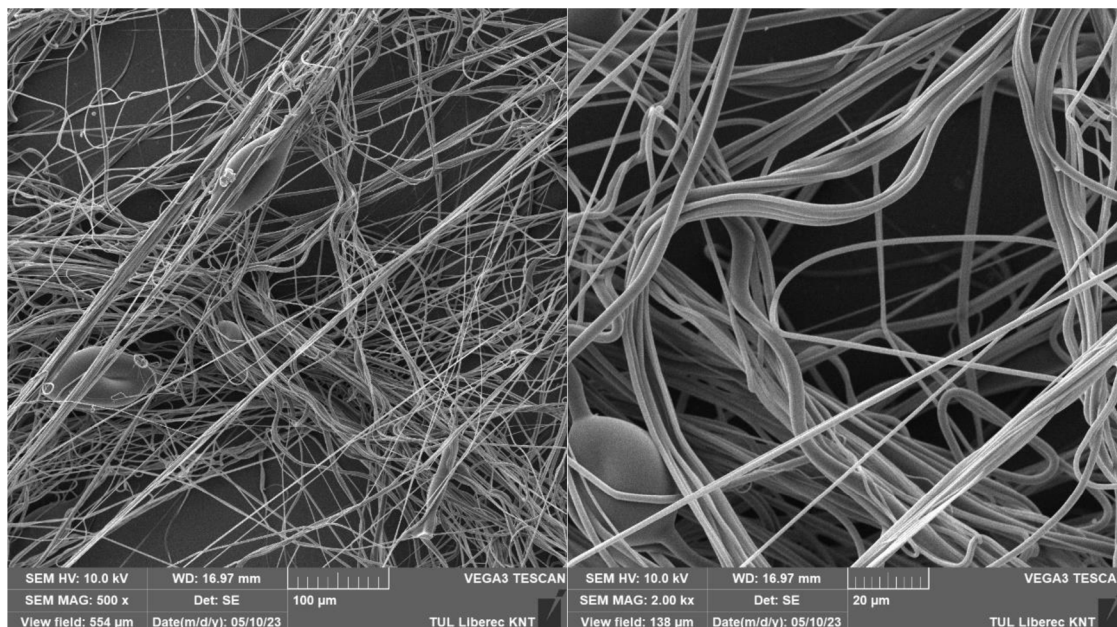
Obrázek 43: Ulpívání polymeru u různých rozvaděčů

Z fotografií je patrné, že pomocí nové zvlákňovací hlavy bylo odstraněno tvoření kanálu polymeru ve zvlákňovacím kuželu od nerovnoměrného rozptřeni polymeru. Tudiž jsme dosáhli rovnoměrného rozptřeni polymeru po celé ploše zvlákňovacího kuželu. Dále vidíme, že různé rozvaděče, a tudíž i různé proudění vzduchu má vliv na zanášení vnitřního prostoru zařízení.

Vnitřní prostor vzduchového kanálu s teflonovou vložkou plní funkci separátoru kapek polymeru. V rozvaděči A je zachyceno mnoho kapek polymeru na teflonové vložce a téměř nezanesený rozvaděč. Varianta B má velice zanesený rozvaděč vzduchu, a i poměrně tlustou vrstvu polymeru na teflonové vložce. Zachycení polymeru v rozvaděči B může být způsobeno vznikem větších turbulencí. Zároveň je zde však méně vzduchu přiváděno ke zvlákňovací hraně a více ke vnitřní ploše vzduchového kanálu. Uvedený faktor bude mít velký vliv na ulpívání polymeru.

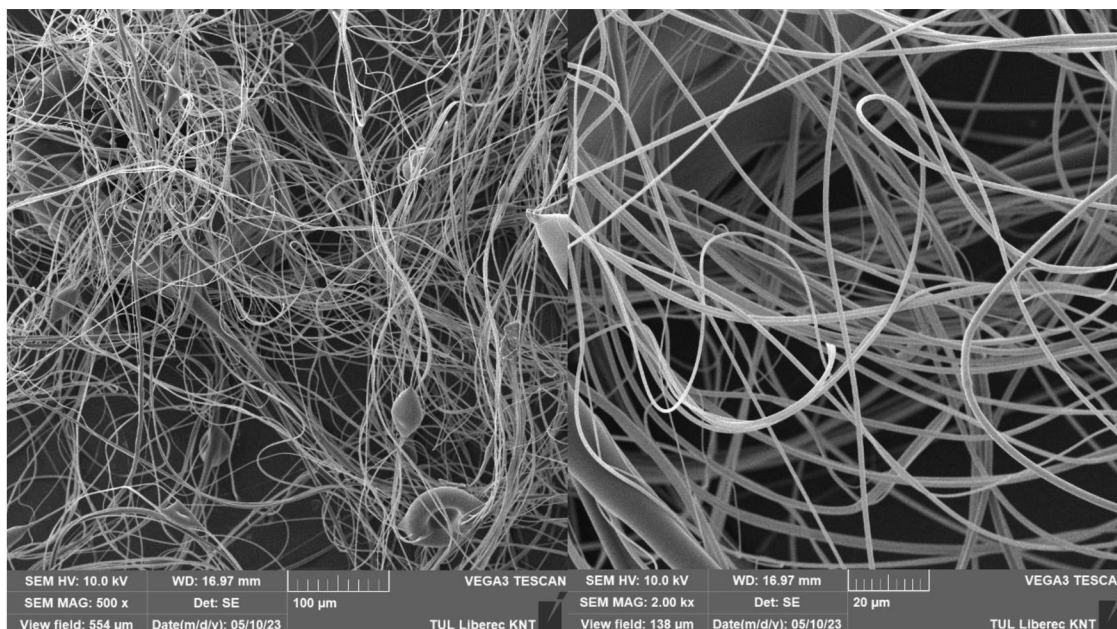
### 6.3. Vyhodnocení vzorků nanovláken

Získané vzorky byly analyzovány pomocí VEGA3 TESCAN. Jednotlivá vlákna byla následně změřena softwarem ImageJ.



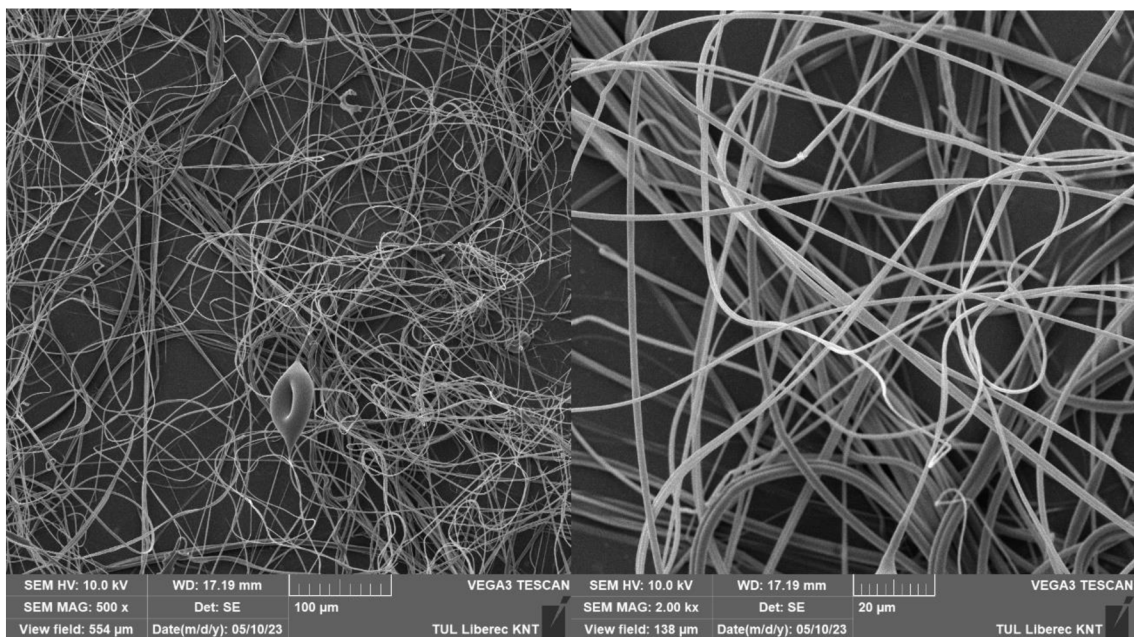
Obrázek 44: Vzorek A1

Vzorek A1 má vlákna o průměru 1 [μm] a jsou zde patrné kapkové defekty. Provozní otáčky byly 1500 [ot/min] a vstupní tlak 1,8 [bar].



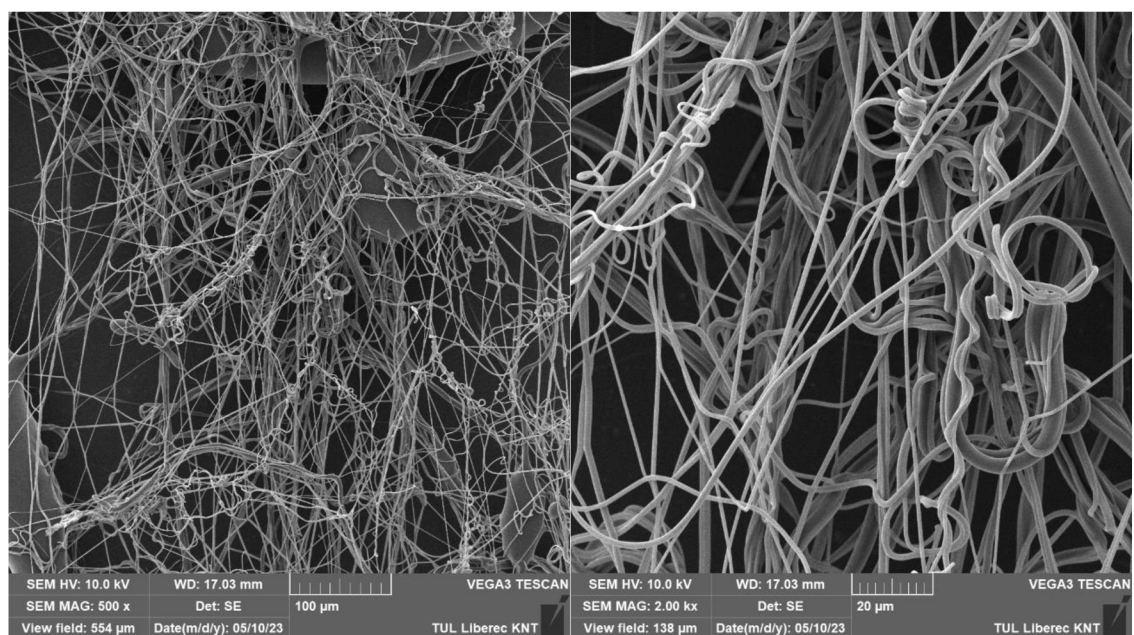
Obrázek 45: Vzorek A2

Vzorek A2 obsahuje vlákna o velikosti 1-2 [μm]. Zde je však více kapkových defektů než u vzorku A1 a zároveň i větší velikosti. Provozní otáčky byly 3500 [ot/min] a vstupní tlak opět 1,8 [bar].



Obrázek 46: Vzorek B1

Vzorek B1 obsahuje vlákna o velikosti 1-2 [μm]. Kapkové defekty zde nejsou tak výrazné jako u vzorku A2. Provozní otáčky byly 1500 [ot/min] a vstupní tlak 2,2 [bar].



Obrázek 47: Vzorek B2

Vzorek B2 obsahuje nejmenší vlákna o průměru 1 [μm] a mnoho vláken je i pod touto hranicí. Zároveň je zde nejmenší zastoupení kapkových defektů ze všech čtyř vzorků. Provozní otáčky byly 3500 [ot/min] a vstupní tlak 2,2 [bar].



## 7. Vyhodnocení návrhu zařízení

---

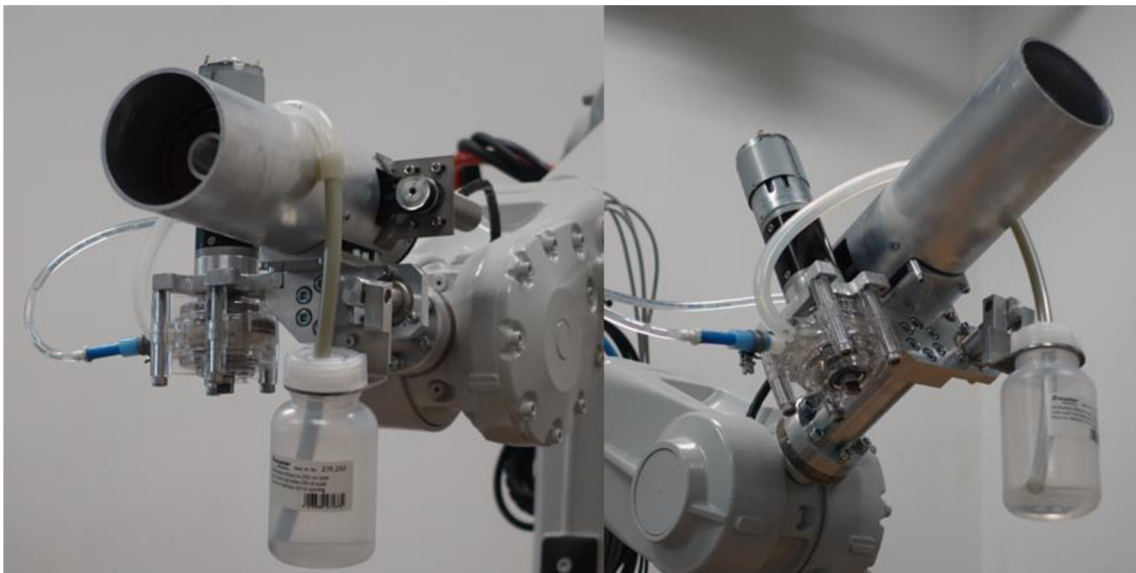
### 7.1. Posouzení konstrukce zařízení

Zvlákňovací jednotka byla na základě výkresové dokumentace vyrobena, smontována a následně testována. Během montáže zařízení bylo zjištěno, že pro snadnou montáž a demontáž všech dílů uvnitř trubky je přesnost výroby nezbytná. Zmenšení trubky na průměr 80 mm částečně znemožnilo manipulaci s komponenty pomocí ruky uvnitř trubky a bylo nutné použít kleště či pinzety. S montáží vnějších komponentů nebyl žádný problém.

Konstrukce však umožňuje výměnu zvlákňovací hlavy bez nutnosti rozebrání celého zařízení. Tudiž čištění zvlákňovací hlavy je vcelku bezproblémové. Pro výměnu rozvaděče vzduchu je nutné vyjmutí zvlákňovací hlavy a rozdělovače tlakového vzduchu. Díly jsou dobře přístupné a demontáž je bezproblémová.

Pro čerpání polymeru bylo použito peristaltické čerpadlo z důvodu používání magnetického zubového čerpadla na jiném projektu.

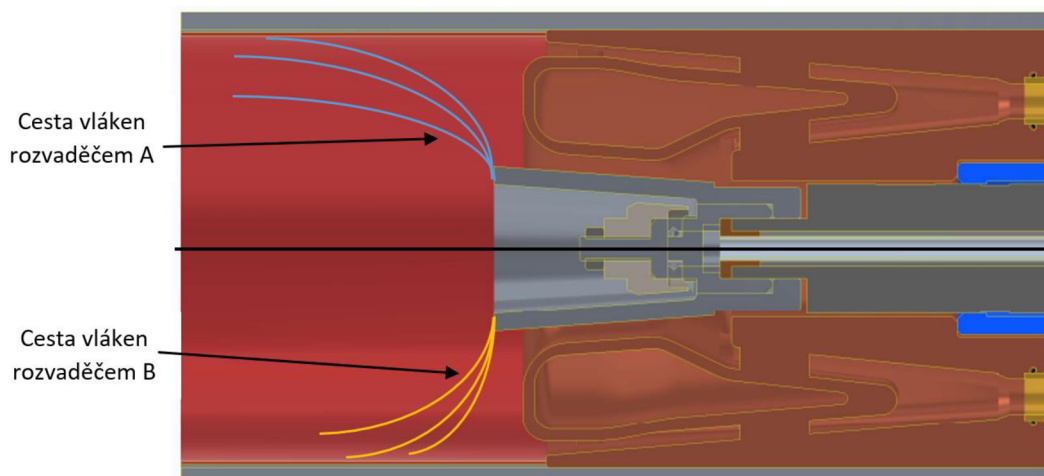
Zařízení bylo umístěno na robota IRB 2600 TYPE C. Při pohybu robota se nevyskytly žádné problémy. K zařízení je veden jeden přívod stlačeného vzduchu a dva kabely pro napájení motorů.



Obrázek 48: Fotografie zvlákňovací jednotky umístěné na robota

## 7.2. Posouzení vzduchového systému

Testováním zvlákňovací jednotky se stlačený vzduch prokázal jako možná alternativa ventilátoru. Nevýhodou tohoto systému je vysoká hladina intenzity zvuku až 115 dB. Bylo dosaženo rovnoměrného rozdělení stlačeného vzduchu do šesti sekcí a dopravit do zvlákňovacího prostoru. Provedením měření rychlosti vzduchu rozvaděčů A, B se prokázalo, že i samotné proudění vzduchu má vliv na vznik a zachytávání vláken, nebo kapek polymeru na rozvaděči či na stěně vzduchového kanálu. Z dostupných dat bylo vyhodnoceno, že dolní proud vzduchu přiváděný ke zvlákňovací hraně má větší vliv na výrobu nanovláken než horní proud proudící po obvodu trubky. Horní proud spíše funguje jako dopravní prostředek, zatímco dolní proud překonává odstředivé síly vláken a deformaci ohybem vláken směrem ven ze zařízení. Nesmíme však pominout, že významný vliv mohou mít i turbulence.



Obrázek 49: Předpoklad vlivu proudění vzduchu na tvorbu vláken

## 7.3. Vyhodnocení funkčnosti zvlákňovací jednotky

Při provozu zařízení se neobjevily závažné nedostatky v konstrukci. Přiváděný polymer nikde neunikal a proudil přímo do zvlákňovací hlavy. Přívod vzduchu též nevykazoval netěsnosti a vše zůstalo ve správné pozici. Ozubený řemen se nedotýkal žádnou část zařízení, ani o dopravní trubičku vedenou prostorem řemenu.

Samotné zvlákňování fungovalo bezproblémově. Experimentem bylo ověřena funkčnost zvlákňovací jednotky. Pro konkrétnější závěry by bylo vhodné provést podrobnější testování všech parametrů. Vstupními parametry jsou otáčky zvlákňovací hlavy, množství přiváděného polymeru, rychlost vzduchu, složení přiváděného polymerního roztoku, rozdílné zvlákňovací hlavy a různé varianty rozvaděčů vzduchu.

## 8. Závěr

---

Úkolem bakalářské práce bylo v prvním kroku provést rešerši výroby nanovláken, navrhnout a konstrukčně zpracovat vybranou variantu zvlákňovací jednotky založenou na principu odstředivých sil umístěnou na rameni robota a ověřit vybrané technologické uzly výpočtem nebo experimentem.

Bylo navrženo zařízení na základě získaných poznatků z rešerše, z předchozí varianty zvlákňovací jednotky a ze získaných znalostí ze studia. Celá zvlákňovací jednotka prošla miniaturizací, jak kvůli umístění na robota, tak kvůli nahrazení ventilátoru přívodem stlačeného vzduchu.

Nová zvlákňovací hlava vyřešila problém s vytvářením kapalinových kanálů uvnitř zvlákňovacího kužele a dokázala vytvořit celistvý polymerní film po celé jeho ploše.

Využití stlačeného vzduchu se ukázalo jako možné řešení. Nevýhodou je však vysoká hladina intenzity zvuku až 115 dB.

Navržená zvlákňovací jednotka prokázala potenciál výroby nanovláken o průměru 1 [μm] z polymeru PVB 15% a poukázalo na možné další zkoumání vlivu proudění vzduchu na samotná nanovlákná. Proud vzduchu má dle získaných dat velký vliv na výrobu nanovláken, na zanášení vnitřních prostor zvlákňovací jednotky, na zachytávání kapek.

## Použitá literatura

- [1] Jenčová, V. *et al.* (2021) *Nanovlákná: teorie, technologie a použití*. Vydání: 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci.
- [2] Ko, F.K., Wang, Y. and Wan, Y. (2014) *Introduction to nanofiber materials*. Warrendale, Pa.: MRS, Materials Research Society.
- [3] Barhoum, A., Bechelany, M. and Makhlof, A.S.H. (eds) (2019) *Handbook of nanofibers*. Cham: Springer (Springer reference).
- [4] Sodomka, L. (2019) *Nanovlákná: technologie, technika teorie, aplikace*. Liberec: nakladatel není známý.
- [5] Kwak, B.E. *et al.* (2021) ‘Large-Scale Centrifugal Multispinning Production of Polymer Micro- and Nanofibers for Mask Filter Application with a Potential of Cospinning Mixed Multicomponent Fibers’, *ACS Macro Letters*, 10(3), pp. 382–388. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.0c00829>.
- [6] Pokorný, P. a kol.: Zařízení pro výrobu nanovláken a/nebo mikrovláken odstředivým zvlákněním roztoku nebo taveniny polymeru, užitečný vzor č. 30004, datum zápisu 15.11.2016
- [7] Engström, J. and Hagström, B. (no date) ‘Centrifugal spinning of nano- fiber webs - A parameter study of a novel spinning process’, p. 5.
- [8] *What is Melt-Blown Extrusion and How is it Used for Making Masks?* (no date). Available at: <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/what-is-melt-blown-extrusion/> (Accessed: 26 October 2022).
- [9] HLAVATÁ, Jana. *Zvláknitelnost směsí polymerních roztoků odstředivým zvlákněním: Centrifugal fiber forming from blends of polymer solutions*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Eva Košťáková.
- [10] BLAŽKOVÁ, Lenka. *Odstředivé zvláknění nanovláken: Centrifugal spinning of nanofibers*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Eva Košťáková.
- [11] ‘Nanospider – převratná technologie pocházející z Česka - oTechnice.cz’ (2020), 19 January. Available at: <https://otechnice.cz/nanospider-prevratna-technologie-pochazejici-z-ceska/> (Accessed: 21 November 2022).
- [12] <http://www.uvm.cz>, U. interactive (no date) *NS Technologie, Elmarco CZ*. Available at: <https://www.elmarco.cz/ns-technologie> (Accessed: 21 November 2022).
- [13] Hřebcová, P. (2007) *Analýza bikomponentních vláken*. Thesis. Technická Univerzita v Liberci. Available at: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/3643> (Accessed: 21 November 2022).
- [14] Li, Y., Dong, A. and He, J. (2020) ‘Innovation of Critical Bubble Electrospinning and Its Mechanism’, *Polymers*, 12(2), p. 304. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym12020304>.



- [15] *Nanovláknenné vzduchové filtry. Veronika Kuncová - PDF Free Download* (no date). Available at: <https://docplayer.cz/51113050-Nanovlakenne-vzduchove-filtry-veronika-kuncova.html> (Accessed: 21 November 2022).
- [16] Haider, A., Haider, S. and Kang, I.-K. (2018) ‘A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology’, *Arabian Journal of Chemistry*, 11(8), pp. 1165–1188. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015>.
- [17] Zhang, H. *et al.* (2018) ‘Design of electret polypropylene melt blown air filtration material containing nucleating agent for effective PM2.5 capture’, *RSC Advances*, 8, pp. 7932–7941. Available at: <https://doi.org/10.1039/C7RA10916D>.
- [18] Flayeh, A. (2021) *Effect of MWCNTs and Natural Dye/Polystyrene Composite Nano Fibers for High Sensitivity Applications By Electrospinning Techniques*. Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25350.09282>.
- [19] *Uživatel:Gmaxwell - Wikimedia Commons* (no date). Available at: <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Gmaxwell> (Accessed: 26 October 2022).
- [20] ‘Bakalarska\_prace\_Kristyna\_Manhartova.pdf’ (no date). Available at: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/159754/Bakalarska\\_prace\\_Kristyna\\_Manhartova.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/159754/Bakalarska_prace_Kristyna_Manhartova.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Accessed: 21 November 2022).
- [21] Blažková, L. (2018) ‘Odstředivé zvlákňování nanovláken’. Available at: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/112556> (Accessed: 26 October 2022).
- [22] *Spin Coating: Complete Guide to Theory and Techniques* (no date) *Ossila*. Available at: <https://www.ossila.com/pages/spin-coating> (Accessed: 14 November 2022).
- [23] info@sabre.cz, S., www.sabre.cz, e-mail: (no date) ‘Nanovláknenné kryty ran přirozeně stimulují hojení ran | Technický týdeník’. Available at: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/nanovlakenne-kryty-ran-prirozene-stimuluji-hojeni-ran\\_55235.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/nanovlakenne-kryty-ran-prirozene-stimuluji-hojeni-ran_55235.html) (Accessed: 21 November 2022).
- [24] Klogner, V. (2019) ‘Zařízení na výrobu nanovláken účinkem odstředivých sil’. Available at: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/152030> (Accessed: 2 May 2023).
- [25] *Product: GJ Series* (no date) *Micropump*. Available at: [https://micropump.com/products/pumps/gj-series?language\\_code=en](https://micropump.com/products/pumps/gj-series?language_code=en) (Accessed: 16 May 2023).