FAKULTA STROJNÍ TUL

Diplomová práce

Konstrukce laboratorního zařízení pro electroprinting

Studijní program: N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Petr Plašil**
Vedoucí práce: Ing. Ondřej Baťka, Ph.D.
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Liberec 2024

FAKULTA STROJNÍ TUL

Zadání diplomové práce

Konstrukce laboratorního zařízení pro electroprinting

Jméno a příjmení:	**Bc. Petr Plašil**
Osobní číslo:	S22000241
Studijní program:	N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
Zadávající katedra:	Katedra textilních a jednoúčelových strojů
Akademický rok:	2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši principů electrospinningu a electroprintingu.
2. Navrhněte konstrukci laboratorního zařízení pro technologii Electroprinting.
3. Proveďte simulaci rozložení elektrického pole v okolí trysky.
4. Vypracujte výrobní dokumentaci.

Rozsah grafických prací: 10
Rozsah pracovní zprávy: 45
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

[1] MIKEŠ, Petr. *Fyzikální principy tvorby nanovláken I /*. Vydání 1. B.m.: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-249-5.
[2] POKORNÝ, Pavel. *Analýza procesu elektrostatického zvlákňování a možnosti jeho řízení*. 2011.
[3] REIZABAL, Ander, Biranche TANDON, Senentxu LANCEROS-MÉNDEZ a Paul D. DALTON. Electrohydrodynamic 3D Printing of Aqueous Solutions. *Small* [online]. 2023, **19**(7), 2205255. ISSN 1613-6829. Dostupné z: doi:10.1002/smll.202205255
[4] PENG, Zilong, Mengjie WANG, Hao LV, Junyuan ZHANG, Yinan LI, Jinyin WU, Shuailong ZHANG, Fei WANG, Guangming ZHANG, Xiaoyang ZHU, Lin XU a Hongbo LAN. Electric field-driven microscale 3D printing of flexible thin-walled tubular mesh structures of molten polymers. *Materials & Design* [online]. 2023, **225**, 111433. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2022.111433
[5] VAEZI, Mohammad, Hermann SEITZ a Shoufeng YANG. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **67**(5), 1721–1754. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-012-4605-2

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Baťka, Ph.D.
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání práce: 21. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 31. května 2025

L.S.

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

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.
garant studijního programu

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou 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 diplomová 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 2024 Bc. Petr Plašil

NÁZEV PRÁCE

Konstrukce laboratorního zařízení pro electroprinting

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá zhotovením laboratorního zařízení pro provádění technologie electroprinting. V práci je provedena rešerše již známých technologií výroby nanovláken a technologií souvisejících s technologií electroprinting společně s rešerší oblasti velkorozměrných 3D tiskáren. Jsou prezentovány poznatky z experimentů, ze kterých byly získány technologické parametry procesu. Dále jsou uvedeny výsledky simulací elektrostatického pole zkoumající problémové oblasti narušující homogenitu zvlákňování. Pomocí programu Creo 9 byl zhotoven model celého zařízení společně s výkresovou dokumentací. Vyvinuté zařízení umožňuje výrobu nových kombinovaných nanovlákenných 3D struktur.

Klíčová slova: Nanovlákna, 3D tisk, Elektroda, EHD technologie

TITLE

Design of laboratory device for electroprinting

ANOTATION

This diploma thesis deals with the construction design of laboratory equipment to implement electro-printing technologies. In the thesis, a search of already known nanofiber production technologies and technologies related to electro-printing technologies is carried out together with a search of the area of large-scale 3D printers. There are findings from experiments from which the technological parameters of the process have been removed. Furthermore, the results of electrostatic field simulations examining problem areas disrupting the homogeneity of spinning are presented. Using the Creo 9 program, a model of the entire device was created together with drawing documentation. The developed device enables the production of new combined nanofibrous 3D structures.

Key words: Nanofibers, 3D printing, Electrode, EHD technology

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především svému vedoucímu práce Ing. Ondřejovi Baťkovi, Ph.D. za veškerou pomoc a odborné vedení, které mi od něj bylo při tvorbě této práce poskytnuto. Další poděkování patří všem, jež mi byli nápomocni a poskytovali mi odborné rady na řešené problémy. Dále bych chtěl poděkovat celé katedře textilních a jednoúčelových strojů za poskytnuté zázemí pro práci a studium. V neposlední řadě také děkuji mé rodině a přítelkyni za veškerou podporu.

Obsah

1 Úvod ... 10

2 Metody výroby nanovláken ... 11
2.1 Electrospinning ... 11
2.1.1 DC Electrospinning ... 12
2.1.2 AC Electrospinning ... 14
2.2 Drawing ... 16
2.3 Forcespinning ... 16

3 Electroprinting ... 18
3.1 Související technologie ... 18
3.1.1 Electrospraying ... 18
3.1.2 Drop-on-demand ... 19
3.1.3 Jet-deflection ... 20

4 Rešerše v oblasti velkých 3D tiskáren ... 21
4.1 Original Prusa XL ... 21
4.2 Creality K1 Max ... 22
4.3 Tronxy X5SA ... 23

5 Návrh technologických parametrů ... 25
5.1 Provedené experimenty ... 26
5.2 Výsledek experimentů ... 30

6 Simulace rozložení intenzity elektrostatického pole v okolí trysky ... 33
6.1 Cíl simulací ... 33
6.2 Simulace vlivu vzájemné polohy trysky a kolektoru ... 34
6.2.1 Použití kolektoru se zaoblením z PLA ... 34
6.2.2 Použití kolektoru se zaoblením z kovu ... 36
6.2.3 Zhodnocení obou variant ... 36
6.3 Simulace vlivu plochy pod tryskou ... 37
6.3.1 Využití kulové plochy ... 37
6.3.2 Využití rovinné plochy ... 39
6.3.3 Zhodnocení obou variant ... 40

7 Konstrukce zařízení pro electroprinting ... 42
7.1 Volba koncepce tiskárny ... 42
7.2 Konstrukce rámu ... 43
7.3 Návrh jednotlivých pohybových os ... 44
7.3.1 Osa Z ... 44
7.3.2 Osa X ... 45
7.3.3 Osa Y ... 46
7.4 Volba čerpadla ... 48
7.5 Konstrukce trysky ... 49
7.6 Kompletní návrh zařízení ... 51

8 Závěr ... 53

Použitá literatura ... 55

Seznam obrázků 58
Seznam tabulek 60
Seznam přiložených souborů 1
Seznam přířezů profilů pro rám 2

Seznam zkratek

E	Intenzita elektrostatického pole	[$V.m^{-1}$]
F_e	Elektrická síla	[N]
q	Velikost kladného bodového náboje	[C]
φ	Elektrický potenciál	[V]
E_p	Elektrická potenciální energie	[J]
a	Vzdálenost jehly a kolektoru	[mm]
b	Vzdálenost hrotu jehly a plochy pod ní	[mm]
L_i	Celková délka řemen	[mm]
d_1	Průměr řemenice č. 1	[mm]
d_2	Průměr řemenice č. 2	[mm]
d_3	Průměr řemenice č. 3	[mm]
d_4	Průměr řemenice č. 4	[mm]
β	Úhel opásání řemene	[°]
a_1	Rozteč řemenic 1 a 2	[mm]
a_2	Rozteč řemenic 3 a 4	[mm]

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je zhotovení konstrukčního návrhu laboratorního zařízení pro electroprinting. V následujících kapitolách je představeno množství již hojně používaných metod pro výrobu nanovláken. Z těchto metod vzešla již zmiňovaná metoda 3D electroprintingu, která je v této práci zkoumána podrobněji.

Nanovlákna jsou v dnešní době užívána v mnoha odvětvích. Ať už se jedná o různé typy filtračních zařízení, jež využívají nanovlákenné struktury pro filtraci odpadních vod, například svíčkovými filtry, či například k výrobě roušek a respirátorů pro zamezení vdechnutí bakterií a virů do dýchacích cest. Další oblastí, ve které se použití nanovlákenných produktů rozvíjí je výroba nanovlákenných náplastí s inkorporovanými léčivy pro zrychlení rekonvalescence po zranění, nebo také výroba bikomponentních nanovlákenných bariér, které zamezují vzniku střevních anastomoz. [1]

Electroprinting je metoda výroby nanovlákenných 3D struktur pomocí tiskové hlavy, která díky velkému elektrickému náboji tvoří z taveniny nebo roztoku polymeru tažením orientovanou síť. Tyto struktury nazýváme scaffoldy a jsou hojně využívané například ve zdravotnictví, přesněji tkáňovém inženýrství, jelikož mají velký potenciál k prorůstání buněk vlákenným nosičem.[2]

Zařízení vyvíjené v této práci by mělo být schopno zhotovit vícevrstvé 3D scaffoldy použitím kombinace obou technologií. Jak technologie electroprinting tak technologie electrospinning.

2 Metody výroby nanovláken

Metod pro výrobu nanovláken existuje v dnešní době mnoho, avšak ne všechny jsou vhodné pro průmyslové využití, nýbrž pouze pro laboratorní účely. Obecný princip všech metod spočívá ve vyvinutí síly, jež je dostačující pro přeskupení molekul zvlákňovaného polymeru. Ty pak tvoří tenká vlákna průměru menšího než 1 mikrometr, zpravidla mezi deseti až sto nanometry, tedy nanovlákna. Vyvozovaná síla může být docílena různými fyzikálními jevy, avšak mezi nejhojněji používané patří využití elektrického pole buď stejnosměrného (DC), nebo střídavého (AC) proudu, či využití odstředivé síly při technologii forcespinning – firma NanoSPACE. [3]

2.1 Electrospinning

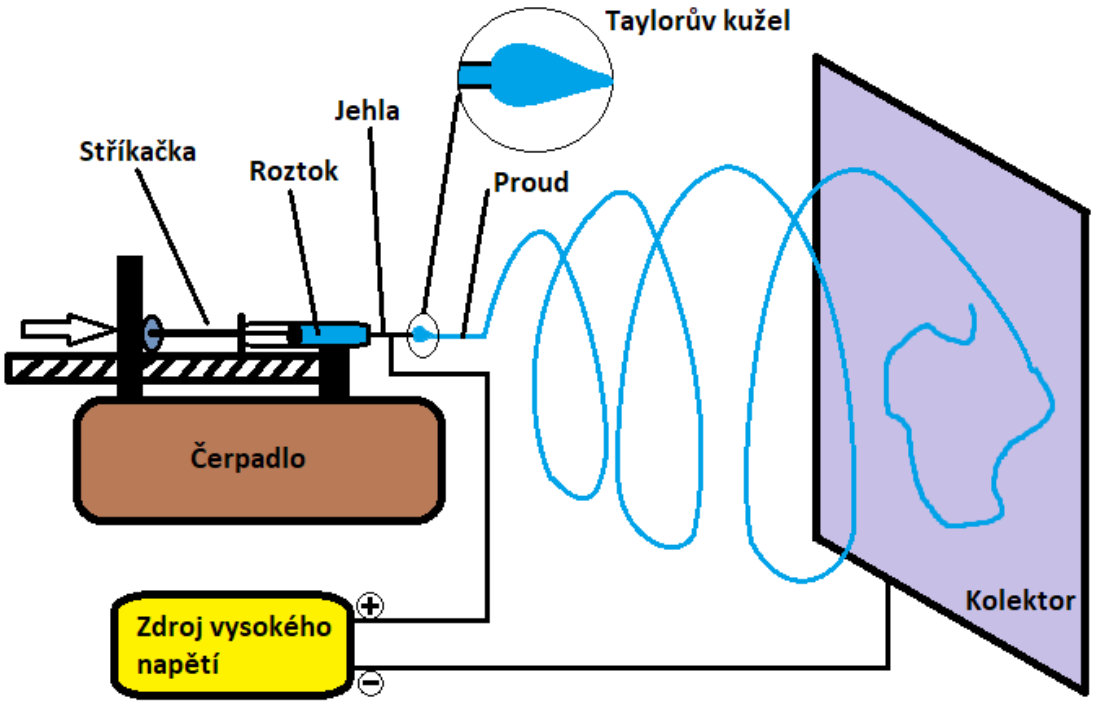
Electrospinning je nejpoužívanější technologií pro výrobu nanovlákenných materiálů. Hlavním důvodem je vysoký potenciál k průmyslovému využití díky rychlosti produkce materiálu. Jedná se o elektro-hydrodynamický proces, při němž dochází k dloužení vláken vlivem elektrického pole. Polymery užité pro tento proces je nutné zvlákňovat v kapalném stavu, tedy buď ve formě taveniny, nebo polymerního roztoku. Samotné zvlákňování je ovlivněno fyzikálními vlastnostmi materiálu, především povrchové napětí, vodivost, viskozita, rychlost vypařování rozpouštědla obsaženého v roztoku a vlhkost prostředí. [3, 4]

Úplně prvním průkopníkem v oblasti velmi tenkých vláken byl už v roce 1882 anglický vědec a fyzik Charles Vernon Boys, který vytvořil jako první vlákna tak tenká, že je nebylo možné pozorovat optickým mikroskopem. Boys rozehřál křemennou tyčinku na bod tání a připevnil ji na projektil, jež vystřelil z kuše. Tato vlákna pak použil ke konstrukci torzní váhy, díky které dovedl vylepšit Cavendishovo měření gravitační konstanty, nebo například k výrobě radiomikrometru pro astronomická pozorování. [5]

V roce 1964 britský vědec Geoffrey Ingram Talyor zkoumal roztoky tekutin a jejich chování, když jsou vystaveny vysokému napětí. Taylor nabral roztok do jehly a pozoroval, jak se bude chovat kapka na špičce jehly vystavená vysokému napětí. Kapka se stupňujícím napětím měnila tvar, až dosáhla tvaru kužele a v momentě, kdy napětí dosáhlo kritické hranice, tak ze špičky tohoto kužele vytrysklo vlákno. Tento jev byl pojmenován po svém objeviteli a je tedy znám jako Taylorův kužel. [6]

2.1.1 DC Electrospinning

DC Electrospinning (DCES), česky překládaný jako elektrostatické zvlákňování, využívá, jak už z názvu vyplývá, stejnosměrně nabitého elektrostatického pole. Toto pole zapříčiňuje, že se povrch kapaliny stane nestabilním a začne se na něm tvořit Taylorův kužel, z něhož se postupně dlouží tenká vlákna. Vlákna opouštějící kladně nabitou jehlu připojenou ke zdroji vysokého napětí (obvykle 10-20 kV), se vlivem přechodového děje a elektrického větru, jejichž problematiku rozebral podrobně doc. Pokorný ve své disertační práci (2011), posouvají prostorem směrem k záporně nabitému kolektoru. [7] Tento pohyb je zprvu orientovaný přímo směrem ke kolektoru, avšak ve větší vzdálenosti vznikají šroubovice, zapříčiněné tzv. bičující nestabilitou a dochází k velkému dloužení vláken a taktéž k rychlému odpařování rozpouštědla. [8]



Obrázek 1 Schéma zařízení pro DC electrospinning

Na obrázku 1 [8] je znázorněno schéma zařízení pro metodu elektrostatického zvlákňování s popisky pro jednotlivé části stroje.

Elektrody pro DC electrospinning lze vybírat ze škály různých konstrukčních řešení, které budou popsány dále.

2.1.1.1 Jehlová elektroda

Jehlová nebo také trysková elektroda je vůbec první elektrodou používanou pro DC electrospinning. Zvlákňování probíhá z kapky vytékající koncem trysky (detail na obrázku 1) vlivem vysoké intenzity elektrického pole. Nevýhodou tohoto konstrukčního provedení je fakt, že dutinou jehly lze přivádět jen omezené množství polymerního roztoku, tudíž je velmi omezena produktivita. [3]

2.1.1.2 Válečková elektroda

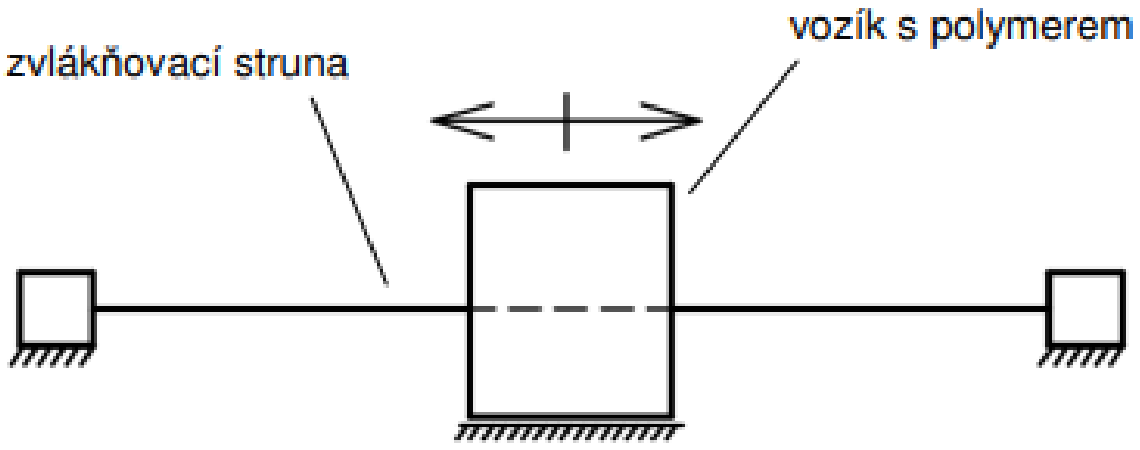
Válečková elektroda byla velmi hojně používaná v průmyslové výrobě nanovláken díky své velké produktivitě, postupně jí ale nahradily elektrody výkonnější. Ta je zapříčiněna objevem skutečnosti, že Taylorův kužel se může tvořit i na volné hladině polymerního roztoku. Hladina na válečku vzniká jeho částečným ponořením a následným otáčením. K zvlákňování dochází v moment, kdy se hladina dostatečně vzdálí od nádržky s roztokem. Na obrázku 2[9] je vyobrazena válečková elektroda zařízení Nanospider společnosti Elmarco, kde ve spolupráci s Technickou univerzitou v Liberci probíhal samotný vývoj této metody.[3, 8]

Obrázek 2 Válečková elektroda Elmarco

2.1.1.3 Strunová elektroda

Další elektroda vyvinutá společností Elmarco, která je taktéž využívána na stroji nanospider. Princip (obrázek 3 [9]) spočívá v nanášení vrstvy polymerního roztoku na drátek napnutý mezi dvěma místy stroje. Tenká vrstva je nanášená pojízdným vozíkem

se zásobníkem polymeru, který se pohybuje pravidelně po délce struny. Jelikož je u této metody využívána ke zvlákňování velmi malá plocha, dochází k vysokým hodnotám intenzity elektrického pole a tudíž k vysoké produktivitě. [10]

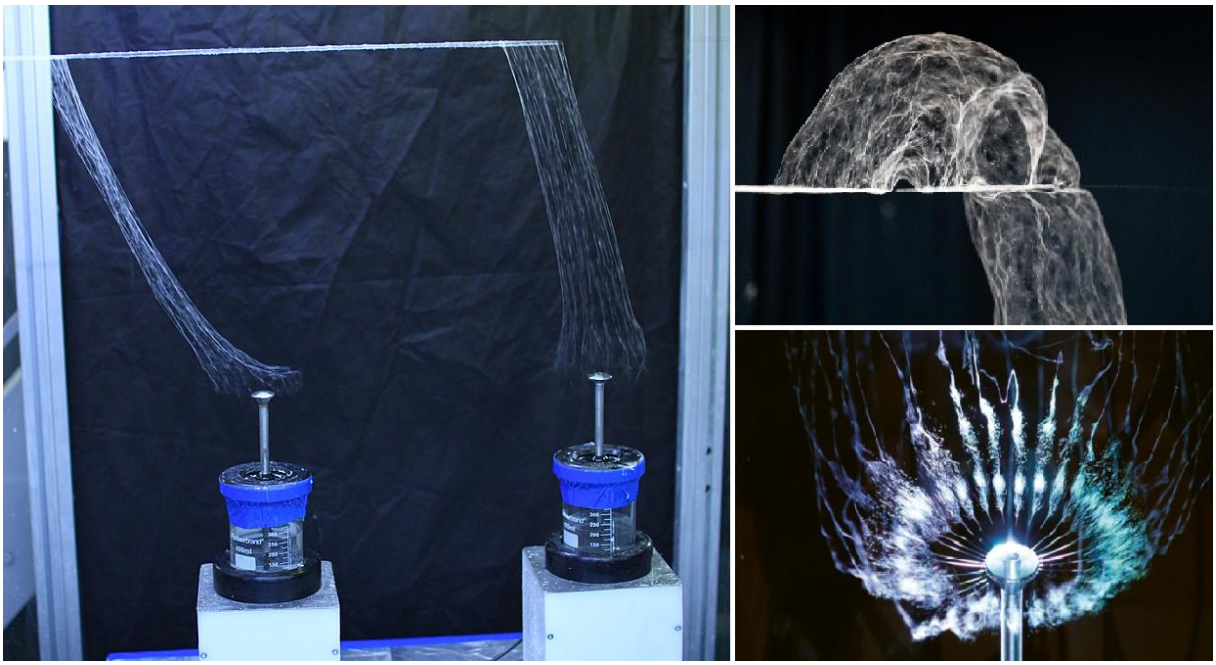


Obrázek 3 Princip využití strunové elektrody

2.1.2 AC Electrospinning

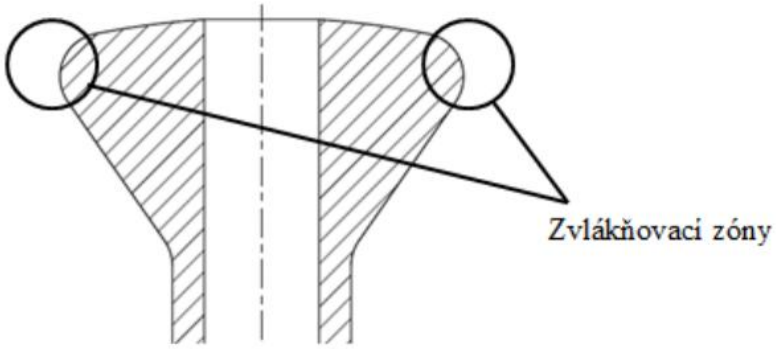
AC electrospinning (ACES) je novodobější technologií v oblasti výroby nanovláken. Narozdíl od předešlého DC electrospinningu využívá k překonání povrchového napětí polymerního roztoku napětí střídavé. Další odlišností oproti DC zvlákňování je skutečnost, že kolektor není fyzická součást zařízení, ale vlákna samotná zastupují funkci tzv. virtuálního kolektoru. Ve vzdálenosti přibližně 30mm od elektrody začne docházet k emitaci částic již vytvořených vláken, které mají opačnou polaritu a tvoří tak opačně nabitou elektrodu. Jejich polarita závisí na aktuální půlvlně střídavého napětí a je tedy buď kladná či záporná. Díky tomuto jevu vzniká proud nanovláken unášený ve směru gradientu pole, hovoří se tak o tzv. elektrickém větru. Tento proud nazýváme nanovlákenná vlečka.

Na obrázku 4 [11, 12]je ukázána výroba jádrové příze vyvinuté na Technické univerzitě v Liberci právě metodou AC electrospinning. Nosný lineární textilní materiál je obalován pláštěm z nanovlákenné vrstvy.[13]



Obrázek 4 Výroba jádrové příze metodou AC electrospinning na TUL

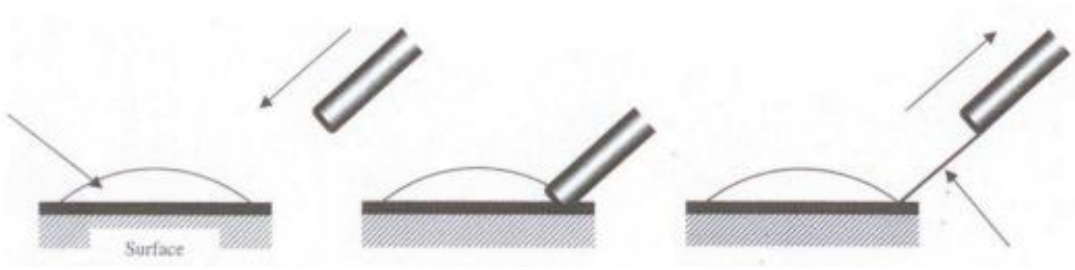
Touto metodou lze dosáhnout až 10x větší produktivity oproti DC electrospinningu, což je jistě pozitivní. Má to však svá úskalí. Vlákna, která se neuchytí ve vlečce, se vracejí zpět a zanáší elektrodu, což vede ztrátě stability procesu. Je tedy nutno konstruovat elektrody tak, aby bylo tomuto negativnímu jevu zamezeno. Elektrody pro AC electrospinning fungují na principu tzv. přepravovacího samočisticího efektu, což znamená, že je na povrch elektrody (obr. 5[3]) dodáváno větší množství polymerního roztoku, než je pro zvlákňování nutno a zbylý kapalný roztok stéká zpět do zásobníku a zabraňuje zanášení elektrody odpadávajícími vlákny. [14]



Obrázek 5 Přeplavovací elektroda

2.2 Drawing

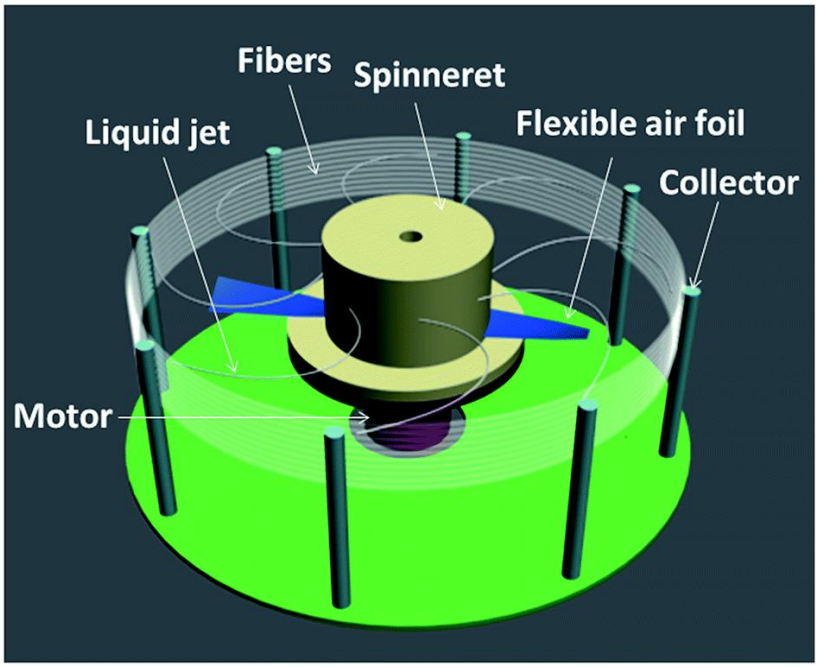
Drawing, neboli dloužení, je nejjednodušší technologií pro výrobu velmi tenkých vláken až nanovláken. Touto metodou vznikají vlákna o průměru od 100 nanometrů až do několika mikrometrů. Principem metody je nanesení milimetrové kapky polymerního roztoku na podkladový materiál, ze které jsou následným přiložením a oddálením pipety danou rychlostí vytahována vlákna, z nichž se tímto pohybem vypařuje rozpouštědlo (obr. 6[8]). Vlastnosti vláken závisí na rychlosti pohybu pipety, materiálových vlastnostech užitého polymerního roztoku a na rychlosti odpařování rozpouštědla. Metoda je to velmi neefektivní, proto slouží vesměs pouze k laboratorním účelům, k nimž je však ideální z hlediska malé náročnosti na používané zařízení. [8, 15]



Obrázek 6 Princip metody dloužení vláken

2.3 Forcespinning

Metoda využívající odstředivých sil, působících na polymerní roztok řízeně dodávaný do tzv. spinerety, pro vznik nanovláken. Ač se nejedná o metodu electrospinningu, forcespinning je taktéž důležitou a využívanou metodou pro výrobu nanovláken. Spinerety rozlišujeme buď tryskové, kde roztok vystřikuje z trysek nebo beztryskové, kde roztok nanášený na desku opouští její povrch vlivem rotace. Výhodou celého procesu je fakt, že nevyžaduje speciální kolektor, ale vlákna lze nanášet vesměs na cokoliv. Na rozdíl od elektrostatického zvlákňování není zapotřebí vysoké elektrické napětí a lze používat i materiály, které se nedařilo zvláknit elektrostaticky. Zvlákňovat lze radiálně, tedy vlákna odlétávají kolmo na osu rotace spinerety (obrázek 7), či axiálně, kdy vlákna odlétávají rovnoběžně s osou spinerety doprovázena proudem vzduchu pomocí ventilátoru. [16, 17]



Obrázek 7 Princip technologie forcespinning

3 Electroprinting

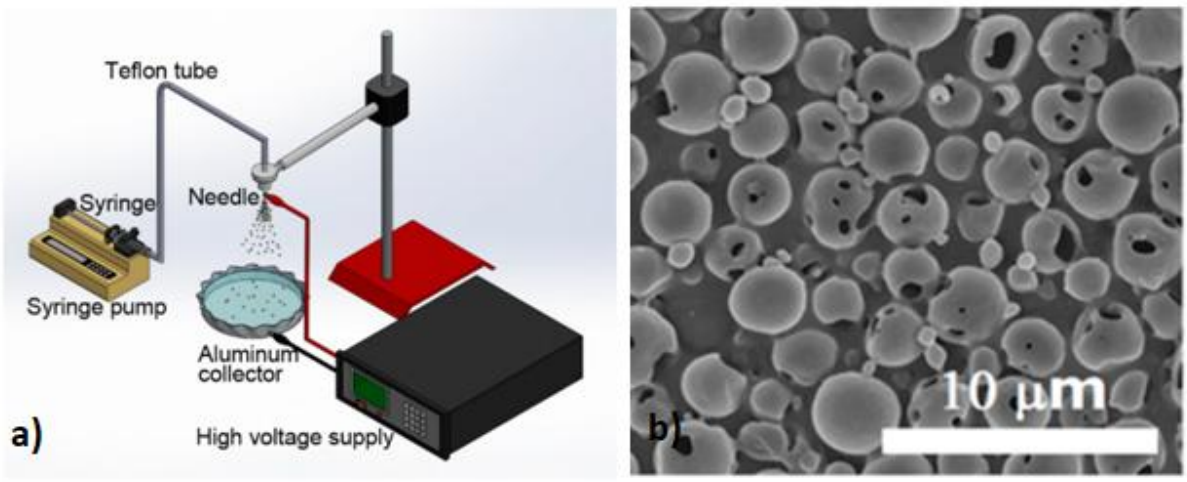
Technologie electroprinting, nebo také v publikacích nazývaná electrowriting a její realizace pomocí laboratorního zařízení je hlavním tématem této práce. Jedná se o elektrohydrodynamickou (EHD) technologii. EHD technologie využívají elektrické pole k řízení ukládání vláken nebo kapiček pro vytvoření 3D struktur. Tyto metody se často používají k výrobě konstrukcí s vysokým rozlišením a lze je provádět pomocí polymerních tavenin nebo materiálů na bázi roztoku. Zatím je electroprinting velmi málo probádanou technologii, která má velký potenciál ve vytváření 3D struktur z vláken menších než jeden mikron. Nakladený nanovlákenný materiál by však oproti technologiím již zmiňovaným měl mít orientovanou strukturu. Kontrola umístění materiálu je pro aditivní výrobu klíčová. To jak budou jednotlivé 2D vrstvy nakladeny a následně navrstveny na sebe je zásadním parametrem pro aplikace v biomedicíně, kde chceme napodobit biologické prostředí pro podporu buněčného růstu nebo napomoci regeneraci tkání. [18]

3.1 Související technologie

Jako každá novodobá technologie i electroprinting vzešel z procesů a postupů již známých. Tato technologie využívá principu electrospininngu a FDM technologie pro 3D tisk. Tyto technologie budou dále popsány.

3.1.1 Electrospraying

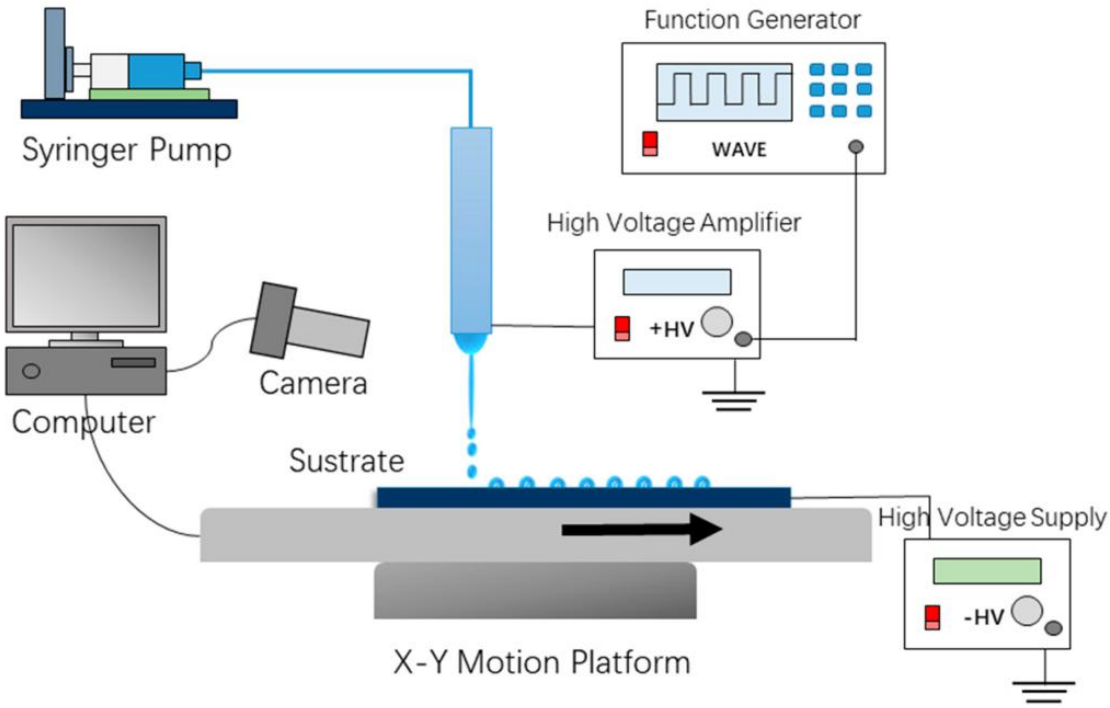
EHD technika, spočívající v generování malých kapiček z kapalného roztoku nebo taveniny za působení vysokého napětí. Stejně jako u eletrospinningu se na špičce trysky překonává povrchové napětí kapaliny a vytváří se taylorův kužel. Když intenzita elektrického pole překoná kritickou hodnotu, z taylorova kuželu vyšlehne jemný proud. Jemný proud roztoku nebo taveniny se rozpadá v elektrickém poli na kapičky vlivem Rayleighovy-Plateauovy nestability. Velikost kapiček lze řídit nastavením intenzity elektrického pole, průtoku kapaliny a dalších parametrů procesu. Výhodou metody je možnost produkce kapiček v úzkém rozptylu velikosti. Obrázek 8 a) [19] ukazuje schéma laboratorního zařízení vědeckých pracovníků z Tchaj-wanu. Na obrázku 8 b) pak můžeme pozorovat strukturu vyprodukovanou právě electrosprayingem. [18, 20]



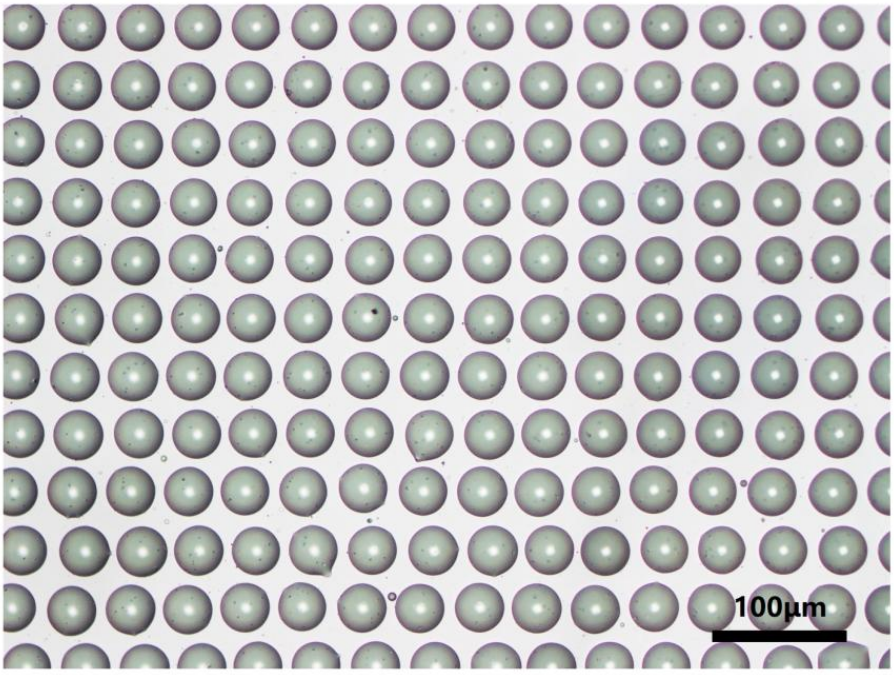
Obrázek 8 a) schéma laboratorního zařízení pro electrospraying, b) struktura nanesená electrosprayingem

3.1.2 Drop-on-demand

Další EHD technologie která využívá stejných principů jako electrospraying. Na rozdíl od electrosprayingu však dokáže produkovat menší objem materiálu s větší kontrolou nad zpracovávanými částicemi a díky tomu také dosahuje většího rozlišení „tisku“. Aby bylo docíleno požadovaných rozestupů kapek, je k zařízení z pravidla připojen generátor funkčního signálu se zesilovačem vytvářejícím čtvercovou vlnu s nastavitelnou frekvencí a pracovním cyklem. Pohyb stolu, na kterém je umístěný podkladový materiál, je řízen počítačem. Na obrázku 9 je ukázáno schéma zařízení pro technologii drop-on-demand a na obrázku 10 pak struktura nanesená touto technologií. [18, 21]



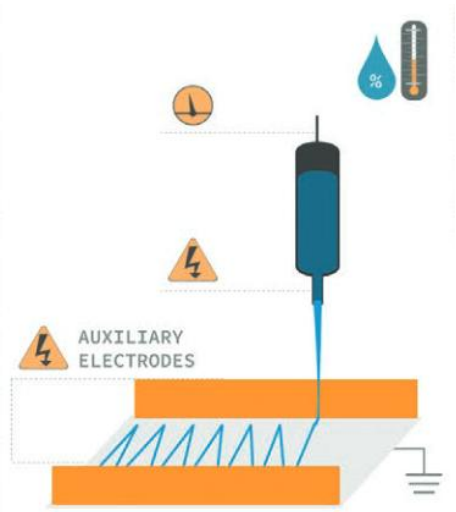
Obrázek 9 Schéma zařízení pro technologii drop-on-demand



Obrázek 10 Struktura vyprodukovaná pomocí drop-on-demand technologie

3.1.3 Jet-deflection

Metoda jet-deflection dokáže na rozdíl od předešlých zmíněných technologií produkovat souvislý proud vláken stejně jako electrospinning, avšak tento nanovlákenný proud je orientovaný. Princip metody zahrnuje použití nižších napětí v rozmezí 1-2 kV pro eliminaci „bičujících“ nestabilit a instalaci pomocných elektrod pro usměrnění proudu vláken. Tyto pomocné elektrody slouží jako „mantinely“, mezi kterými se proudění odráží. Na obrázku 11 je zobrazeno schéma technologie jet-deflection. Tato technologie představuje jakýsi mezistupeň mezi technologiemi electrospinning a electrowriting. [18]



Obrázek 11 Schéma technologie jet-deflection

4 Rešerše v oblasti velkých 3D tiskáren

Jelikož konstruované zařízení pro realizaci technologie electroprinting je nutné vybavit o 3-osý kartézský systém, bude se jednat o stroj velmi podobný 3D tiskárnám, které již figurují na trhu. Celý stroj bude vyžadovat poněkud větší rozměry z důvodu dodržení bezpečnostních vzdáleností pro zamezení přeskoku napětí na vodivý rám stroje či elektrické komponenty.

Z tohoto důvodu byla provedena rešerše na trhu dostupných 3D tiskáren, které disponují většími rozměry oproti běžným provedením. Vybrané tiskárny budou posuzovány tedy hlavně z hlediska využití pohybových elementů a rozvržení pracovního prostoru, protože komponenty jako extrudéry, vyhřívané stoly a další nebudou součástí naší konstrukce, tudíž pro nás nejsou důležité.

Zhotovení rešerše by mělo vést k lepší vizualizaci konstrukčního návrhu pro naši aplikaci a zároveň napomoct k vyvarování se možných chyb vzniklých při konstrukci.

4.1 Original Prusa XL

3D tiskárna Original Prusa XL užívá k pohybu svých tří os systém Core XY, který spočívá v pevném spojení motorů pohybových os X a Y s rámem, což zmenšuje krouticí moment při pohybu tiskové hlavy, tudíž dovoluje dosahovat vyšších zrychlení při provádění tisku. Oproti běžným 3D tiskárnám od firmy PRUSA se stůl pohybuje ve směru osy Z, nikoli ve směru osy Y a zbylé dvě osy obstarává svým pohybem tisková hlava. [22]

Tento systém taktéž disponuje lepším rozvržením zástavbového prostoru, čímž poskytuje využití většího objemu pracovního prostoru, který má u tohoto modelu velikost 360 x 360 x 360 mm. Vlastní pohyb je pak realizován řemenovými převody pro hlavní osy a pohybovými šrouby pro osu Z, kde všechny pohony jsou 1,8° krokové motory. Pohyblivé elementy využívají kolejnic k přesnému vedení. Díky svým velkým rozměrům (800 x 800 x 900 mm) dovoluje tiskárna využití až 5ti extrudérů najednou, přičemž do každého z nich může být naveden jiný materiál. Obrázek 12 ukazuje zmiňovanou tiskárnu firmy PRUSA. [22]

Obrázek 12 3D tiskárna Original PRUSA XL

4.2 Creality K1 Max

Další z řady 3D tiskáren využívajících strukturu Core XY, díky které dosahuje rychlostí až 600 mm/s a velkých možných zrychlení, což značně navyšuje její produktivitu. Celá tiskárna je zobrazena na obrázku 13. Pracovní prostor tiskárny má rozměr 300 x 300 x 300 mm, což je velmi příznivé v porovnání s rozměry celého stroje (508 x 508 x 608 mm). Tisková hlava vykonává svůj pohyb ve vodorovných osách opět díky řemenovým převodům, avšak oproti tiskárně PRUSA je zde užito vodících tyčí, nikoliv kolejnic. Osa Z, ve které se pohybuje pracovní stůl, využívá opět pohybového šroubu a vodících tyčí. Celý stroj je zakrytován, proto je vybaven ventilačním systémem pro přívod a odvod vzduchu z pracovního prostředí a taktéž obsahuje filtr pro redukci úniku škodlivých mikročásteček vzniklých při tisku do ovzduší. [23]

Obrázek 13 3D tiskárna Creality K1 Max

4.3 Tronxy X5SA

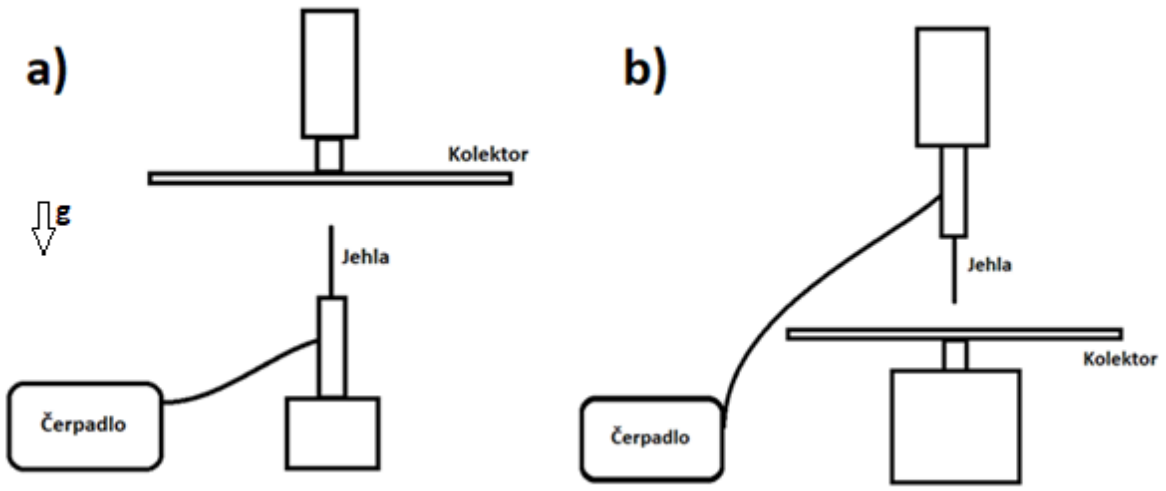
Série tiskáren Tronxy X5SA (obrázek 14) disponuje širokou škálou velikostí od rozměrů tiskového prostoru 330 x 330x 400 mm až do 600 x 600 x 600 mm. Velmi jednoduchý design, kde hlavní rám představují hliníkové profily, dovoluje uživateli snadné sestavení. Osy tiskárny jsou opět konfigurovány jako Core XY a jako u předchozích výrobců je taktéž užito řemenových převodů, vodících tyčí a pohybových šroubů pro realizaci pohybu. Firma Tronxy taktéž nabízí model VEHO, který se svými rozměry pohybuje ještě o něco výše s maximálním tiskovým prostorem až 1000 x 1000 x 1600mm. Navzdory konfiguraci Core XY dosahují tyto tiskárny nižších tiskových rychlostí než předchozí modely, což je zapříčiněno opravdu velkými zdvihovými délkami jednotlivých os a ne tak robustní konstrukcí rámu. Systém nedisponuje automatickou kalibrací při zahájení tisku, proto je nutné kalibrovat stroj ručně. [24, 25]

Obrázek 14 3D tiskárna Tronxy X5SA

5 Návrh technologických parametrů

Pro vyhotovení vhodného návrhu zařízení bylo potřeba nalézt technologické parametry procesu. Ty byly zjišťovány pomocí laboratorních experimentů, při kterých bylo simulováno pracovní prostředí stroje a pozorováno, jak reaguje polymerní roztok a proces zvlákňování při změně různých ovlivňujících parametrů. Mezi tyto parametry patřil především průměr trysky (jehly) pro vytlačování roztoku, vzdálenost kolektoru od trysky, napětí přiváděné na trysku, rychlost dávkování roztoku, rychlost posuvu při nanášení či vzájemná poloha kolektoru a trysky. Jelikož bylo použito 10% roztoku PVB v ethanolu, nebylo zprvu jasné, jaké parametry zvolit. Pro používaný 10% roztok PVB v etanolu nebyly tyto parametry z dostupné odborné literatury doposud známy, proto byla provedena série laboratorních testů. Inspirací pro počáteční nastavení byly použity již známé parametry z experimentu s roztoky s podobným rozpouštědlovým systémem. [18]

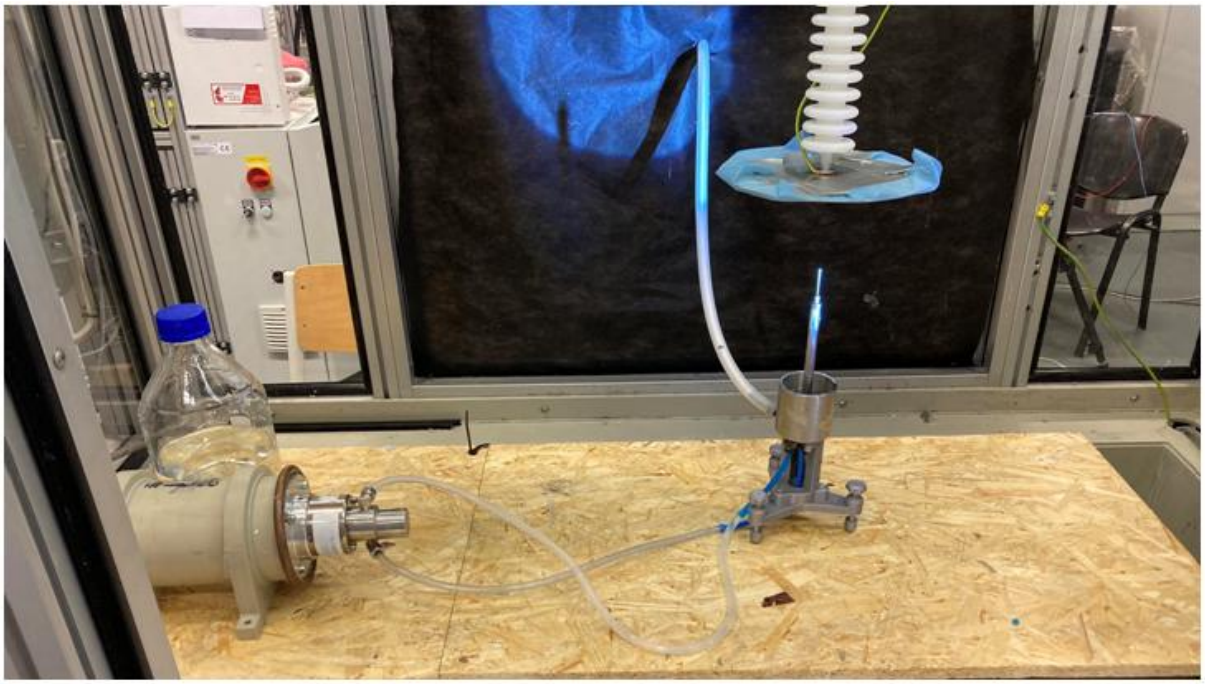
Dalším parametrem je vzájemná poloha kolektoru a elektrody. V principu jsou možné dvě varianty, znázorněné na obrázku 15. Vlákna mohou být ukládána na kolektor proti gravitačnímu poli (varianta a)), nebo souběžně s gravitačním polem (varianta b)). Jako vhodné uspořádání se v průběhu experimentů ukázala varianta a). V závěru byla otestována i varianta b). Uspořádání dle varianty b) neprokázalo žádný přínos, naopak se ukázalo, že gravitační působení vysoce ovlivňuje proces dávkování roztoku, v jehož důsledku bylo pozorováno vytahování příliš velkých kapek, které následně dopadaly na podkladový materiál. Vzhledem k tomuto zjištění bylo od této konfigurace upuštěno a dále bylo úsilí věnováno zdokonalování experimentu při rozložení dle varianty a).



Obrázek 15 Schéma variant rozložení experimentu a) a b)

5.1 Provedené experimenty

Jedním z parametrů, kterému byla věnována pozornost, je rychlost dávkování polymerního roztoku a tedy technologické nároky na použitý systém dávkování. V praxi se často používají pro dopravu roztoků pro technologii ACES i DCES zubová čerpadla. Proto byla možnost jejich použití testována. Výhodou tohoto čerpadla je možnost využití přeplavovacího režimu, užívaného běžně při technologii AC electrospinning. Z pumpy byl přiveden tekutý polymer přes hadici s vnitřním průměrem cca 5 mm do držáku s jehlou, na který bylo přivedeno napětí a to buď AC nebo DC (dle prováděné technologie). Jehla užitá k tomuto experimentu měla vnější průměr 1,2 mm a zabroušenou špičku do roviny. Kruhový nerezový uzemněný kolektor, opatřený izolátorem pro případné přivedení napětí na kolektor a umístěný nad jehlou, byl potažen vrstvou netkané textilie (obrázek 16).



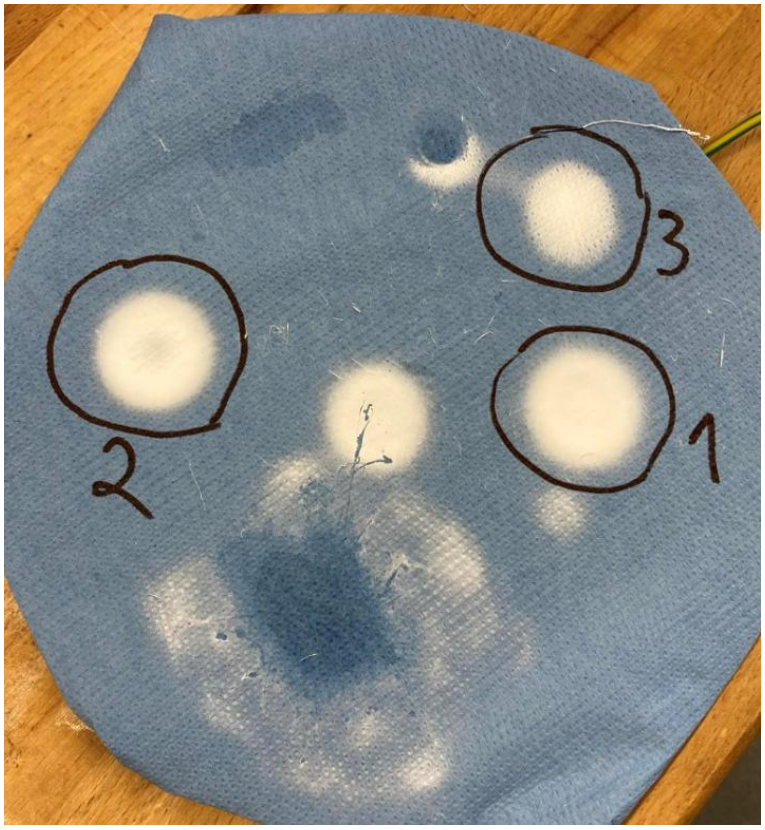
Obrázek 16 Sestava prvního experimentu

Nejprve byla pozornost zaměřena na testování technologie DC electrospinning a možnosti provádět technologie electroprinting za použití zubového čerpadla. Byla provedena série experimentů, kde byly postupně měněny parametry rychlost dávkování, velikost napětí a vzájemná vzdálenost kolektoru od jehly. Při těchto experimentech bylo ve všech případech pozorováno, že dochází k procesu zvlákňování metodou electrospinning a nebyly pozorovány žádné známky technologie electroprinting. Použití zubového čerpadla pro technologii electroprinting se tak zdá jako nevhodné, neboť nebylo možné docílit rychlosti dávkování nižších než v řádu jednotek ml/min.

Další experiment, který proběhl, měl za cíl zjistit, jestli bude možné docílit výroby vláken technologií AC electrospinning. Jelikož tento proces vyžadoval přeplavování polymerního roztoku, bylo by použití zubového čerpadla pro dávkování žádoucí. V rozmezí vzdáleností 50-30 mm kolektoru od jehly s použitím efektivní hodnoty napětí okolo 4,5 kV se podařilo vytvořit nanovlákennou vlečku, která se však nepřichytávala na kolektor. Při dalším přibližování kolektoru k jehle bylo zapotřebí menšího napětí pro začátek zvlákňování a docházelo k zcela odlišným výsledkům. Vytvořená vlákna se začala ukládat na povrch kolektoru a celý proces začal spíše připomínat zvlákňování s využitím stejnosměrného proudu (obrázek 17).

Obrázek 17 Průběh zvlákňování AC electrospinningem při zmenšování vzdálenosti kolektoru a trysky

Výsledné nanesené vrstvy jsou označeny na obrázku 18, kde jsou pod čísly 1 a 2 vrstvy vytvořené AC electrospinningem pro vzdálenost kolektoru 20 a 15 mm a pod číslem 3 pak vrstva dosažená technologií DC electrospinning pro vzdálenost kolektoru taktéž 15 mm.

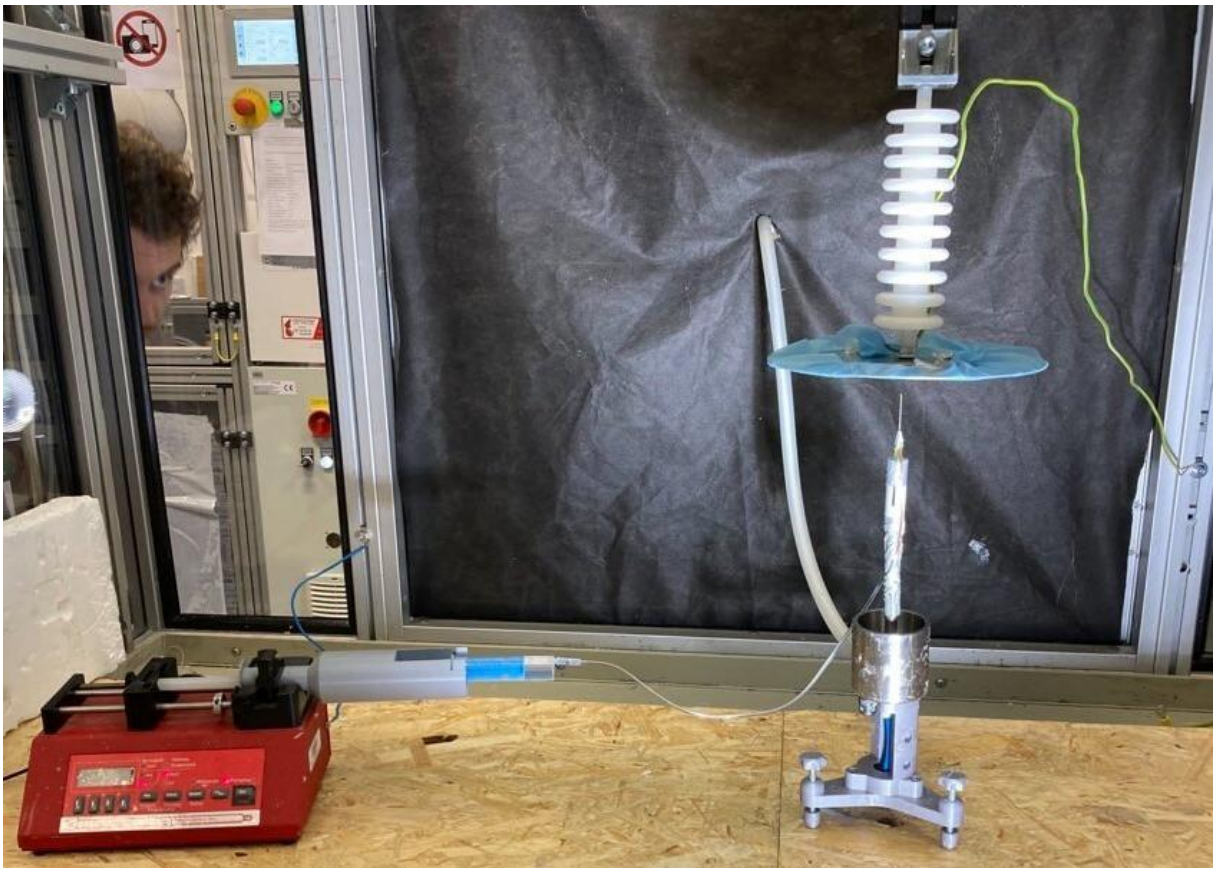


Obrázek 18 Nanesené struktury

Tyto experimenty přinesly hodnotné informace. Bylo zjištěno, že pro zdokonalení procesu a docílení electroprintingu bude nutné použít zařízení s mnohem přesnějším dávkováním, nežli zubové čerpadlo. Dále se ukázalo, že rovinnost kolektoru má velký vliv na prováděný proces, proto bude potřeba použití kolektoru s vysokou výrobní přesností. Experimenty ukázaly, že pro dosažení technologie electroprinting je nutné použít

jehly s menším vnějším průměrem. Byla však prokázána schopnost výroby nanovláken AC i DC electrospinningem.

Pro další experimenty bylo dodávání polymerního roztoku do trysky zajištěno infuzní stříkačkovou pumpou NE-300 JUST INFUSION. Ta dovolila nastavit dávkování mnohem přesněji s vyšší homogenitou a nižšími hodnotami průtoku než zubové čerpadlo (desítky µl/hod až jednotky ml/min). V tomto případě byl pro přivedení roztoku do jehly použit zdravotnický katetr s luer lock závitem, což umožňovalo jednoduché našroubování jehly. Jako elektroda byla použita jehla o průměru 0,9 mm. Celá upravená sestava je vyobrazena na obrázku 19.



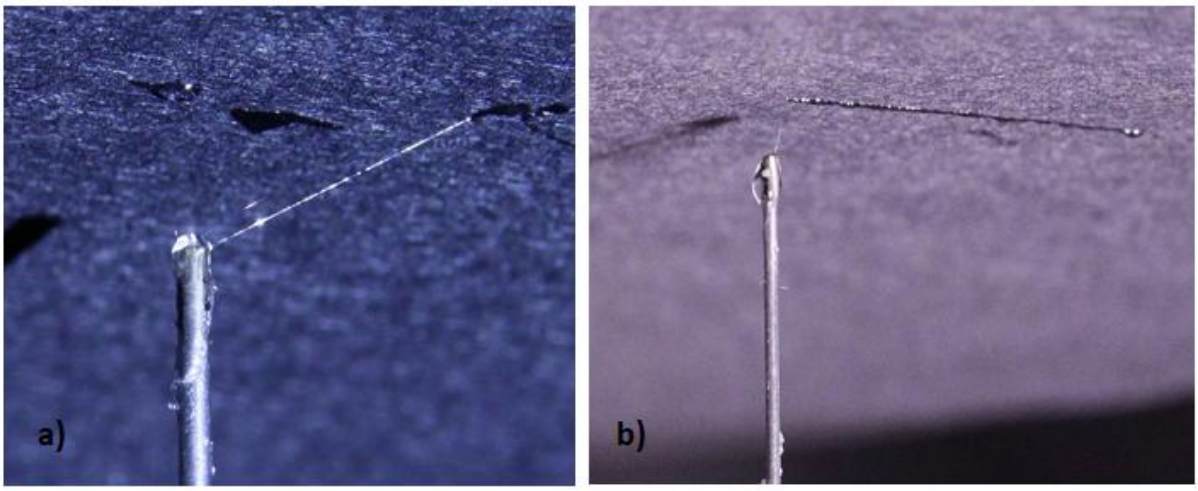
Obrázek 19 Nová sestava experimentu

Pro uchování nanesených struktur určených pro další vyhodnocování byla používána buď netkaná textilie, nebo černý papír. Později bylo nanášeno pouze na papír, který se díky většímu kontrastu vůči pozorovaným vláknům ukázal vhodnější volbou. Upravená sestava pro vykonávání experimentů byla podrobena testování ideálních hodnot provozního dávkování, napětí a vzdáleností. V tabulce 1 jsou uvedeny zjištěné parametry, při kterých se podařilo docílit nejlepších výsledků.

Tabulka 1 Parametry pro electroprinting

Dávkování	20 µl/hod
Vzdálenost kolektoru	3 mm
Napětí	3 kV
Vnější ø jehly	0,9mm
Posuv	4 mm/s

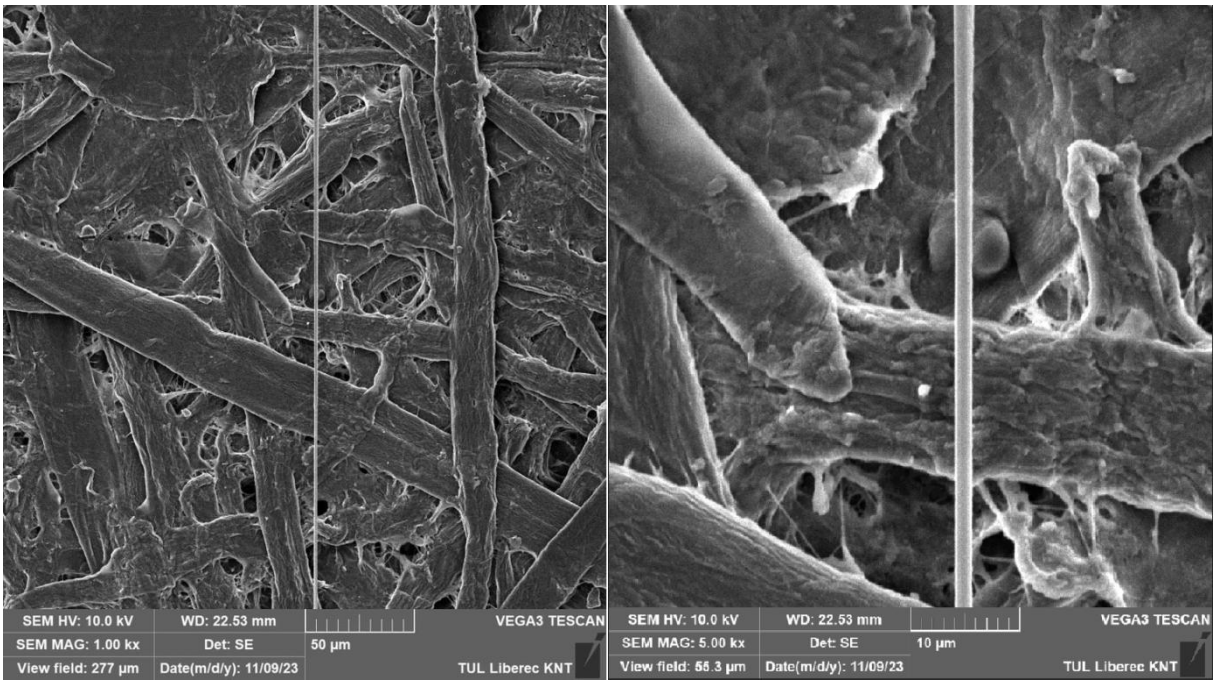
Při těchto vstupních parametrech docházelo na povrchu kapky k vytvoření jednoho taylorova kuželu, tudíž jen jednoho osamoceného proudu zvlákňování (obrázek 20).



Obrázek 20 a) detail osamoceného vlákna, b) detail průběhu zvlákňování

5.2 Výsledek experimentů

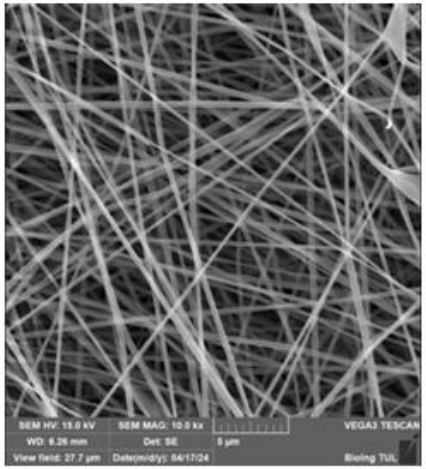
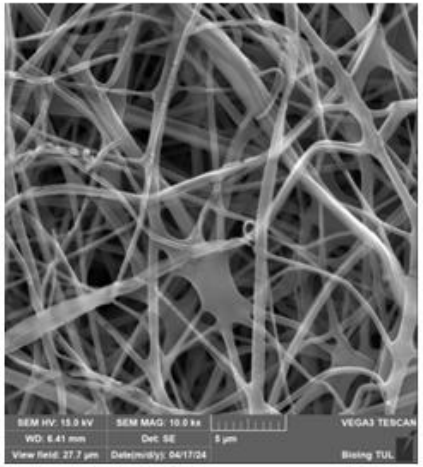
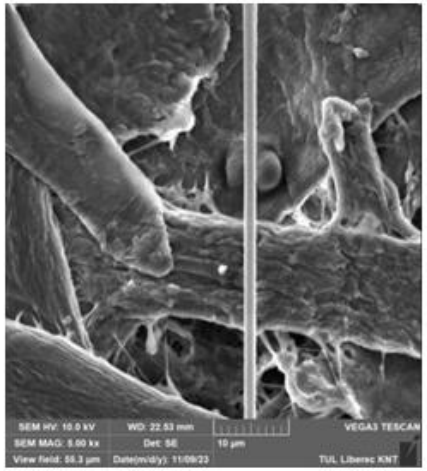
Po provedení série několika nanášení byl podkladový papír odejmut z kolektoru a poslán na mikroskopické pozorování, jež mělo za cíl objasnit, jak skutečně vypadá výsledná struktura vlákenné vrstvy. Na mikroskopických snímcích (obrázek 21) je patrné pouze jedno přímé osamocené vlákno a tloušťce cca. 1,8 µm. Byla tedy prokázána schopnost výroby vláken technologií electroprinting z PVB a byly nalezeny základní parametry, při kterých je možné tuto technologii provozovat. Proběhlo nejen vytvoření osamoceného vlákna, ale i dosažení jeho orientace pohybem trysky vůči kolektoru.



Obrázek 21 Mikroskopický snímek vlákenné struktury při zvětšení 1000x a 5000x

Bylo také prokázáno, že na experimentálním funkčním vzorku bylo možné provádět všechny 3 požadované technologie (DCES, ACES, Electroprinting). V tabulce 2 jsou uvedeny zjištěné parametry, při kterých proběhla každá z již zmíněných technologií, společně s výslednou strukturou vláken vyhodnocenou mikroskopem. Při zmenšování vzdálenosti kolektoru a jehly je zapotřebí menšího napětí pro docílení požadované technologie. Ve vztahu ke konstrukci vyráběného zařízení byly zjištěny potřebné rozsahy jednotlivých pohybů, velikost zařízení a volba vhodných komponent, jako je čerpadlo, jehla a další. Z výsledků vyplývá, že je možné v rámci jednoho zařízení technologie společně kombinovat. Je však nutné brát v úvahu, že kombinování technologií je limitováno používaným dávkovacím systémem, a to tak, že při užití zubového čerpadla je možné kombinovat technologie ACES a DCES v přepravovacím režimu a při použití infuzní pumpy je možné kombinovat technologie DCES a electroprinting. V případě potřeby kombinovat technologii ACES a electroprinting bude nutné používat střídavě oba typy dávkovacích systémů, což vede k nutnosti oba systémy zakomponovat do vyvíjeného zařízení.

Tabulka 2 Přehled parametrů

Technologie	DCES	ACES	Electroprinting
Vnější ø jehly	0,9 mm	0,9 mm	0,9 mm
Napětí	4-6 kV	4,5-4,75 kV_{ef}	3 kV
Vzdálenost kolektoru	10-45 mm	15 -20 mm	3 mm
Druh čerpadla	Infuzní/zubové*	zubové	infuzní
Dávkování roztoku	130 µl/hod/9,1 ml/min*	9,1 ml/min	20 µl/hod
Výsledná struktura	10000x 	10000x 	5000x 

*v případě přepravovacího režimu

6 Simulace rozložení intenzity elektrostatického pole v okolí trysky

Elektrostatické pole je speciálním případem elektrického pole. Může existovat jen v nevodivém prostředí, protože ve vodivém prostředí by došlo k pohybu nábojů a tím ke vzniku stejnosměrného proudu. Nejdůležitějšími veličinami charakterizujícími elektrostatické pole jsou intenzita elektrostatického pole a elektrický potenciál. [26, 27]

Intenzita elektrostatického pole je vektorová veličina vyjadřující velikost a směr elektrického pole. Je definována jako podíl elektrické síly F_e a velikosti kladného bodového náboje q, na který v daném místě působí (rovnice 1). Jednotkou v soustavě SI je volt na metr ($V.m^{-1}$). [26, 27]

$$E = \frac{F_e}{q} \; [V.m^{-1}] \tag{1}$$

Elektrický potenciál definujeme jako podíl elektrické potenciální energie E_p kladného bodového náboje a tohoto náboje. Jedná se o množství práce potřebné pro přenesení jednotkového náboje ze vztažného bodu, kterému je přisouzen nulový potenciál, do daného místa (rovnice 2). Jednotkou elektrického potenciálu je volt (V). [26, 27]

$$\varphi = \frac{E_p}{q} \; [V] \tag{2}$$

6.1 Cíl simulací

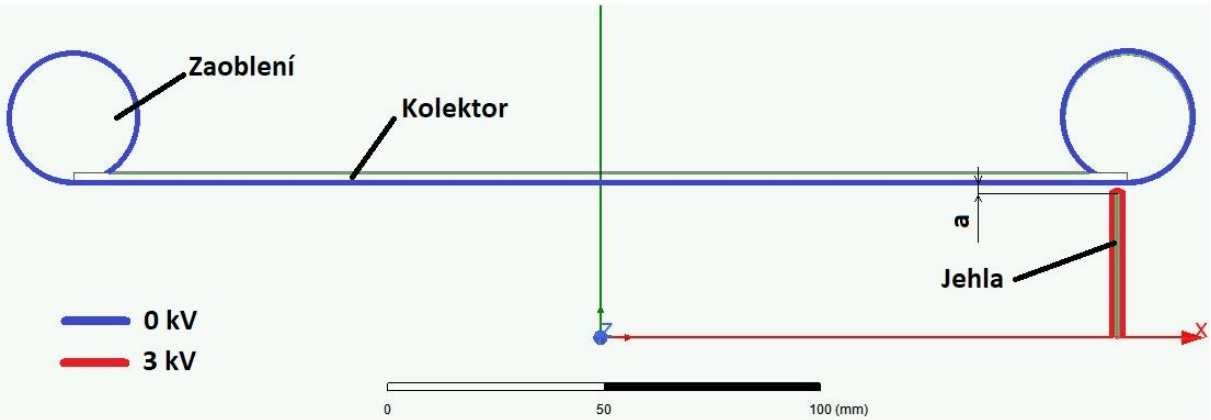
Cílem simulací bylo zjistit, jak se chová elektrostatické pole a jeho intenzita v určitých vzájemných polohách trysky a kolektoru, zejména pak na samotném okraji pracovní plochy. Dalším cílem bylo objasnit, jak se při zastínění komponent pod tryskou bude chovat intenzita elektrostatického pole, která má přímý vliv na zvlákňovací proces. Provedení simulací bylo inspirováno odborným článkem [28], ve kterém byl taktéž řešen okraj kolektoru. K vlastnímu provedení simulací sloužil software ANSYS electronics 2019.

6.2 Simulace vlivu vzájemné polohy trysky a kolektoru

Účelem této simulace bylo objasnit, jak se bude chovat intenzita elektrostatického pole při přiblížení k vnějšímu průměru kolektoru a zdali bude při pohybu po pracovní ploše konstantní. Kdyby byl zanechán vnější průměr kolektoru bez úpravy, hrozil by na něm kritický nárůst intenzity vlivem náhlé změny geometrie ostré hrany. Z tohoto důvodu byla navržena dvě řešení. Zaoblení kolektoru buď pomocí tisknutého dílu z PLA nasazeného na aktuální kolektor ve tvaru anuloidu, nebo zhotovením nového zakrouženého kolektoru například pomocí tažení plechu. Další simulací pak bylo ověření vhodné vzdálenosti pro zvlákňování, která již byla stanovena z předchozích experimentů.

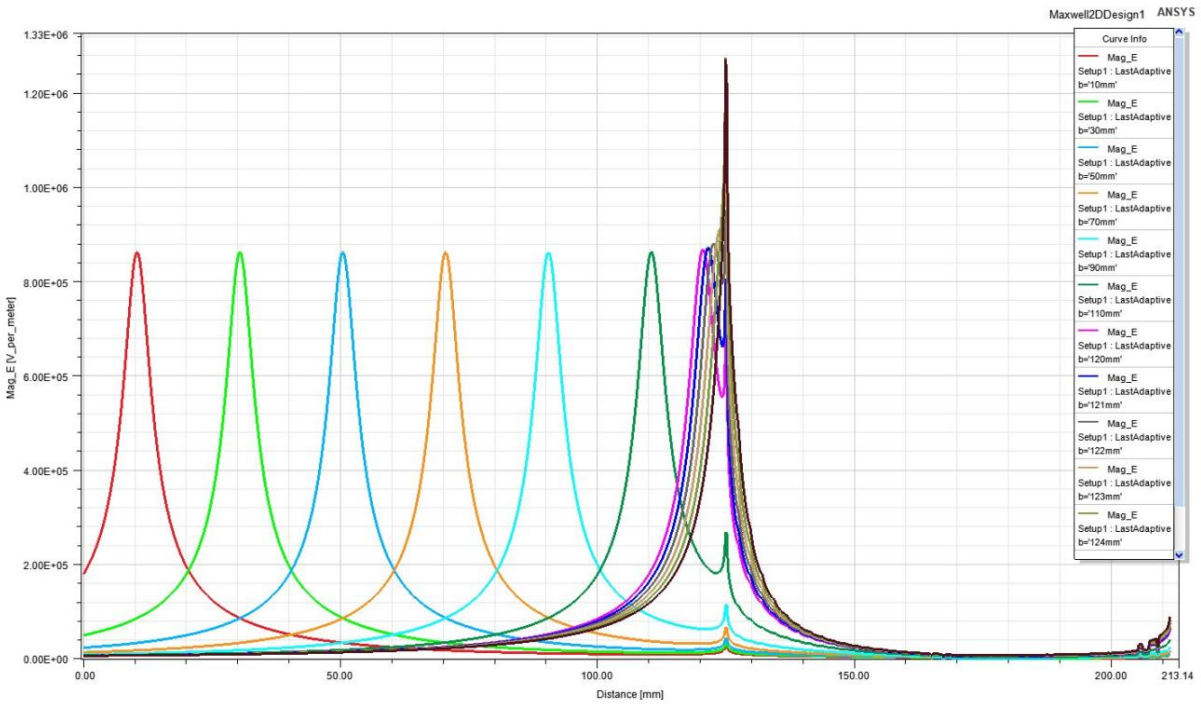
6.2.1 Použití kolektoru se zaoblením z PLA

Nastavení simulace proběhlo tak, aby byly dodrženy parametry získané z laboratorních experimentů. Byla zvolena simulace ve 2D, jež by měla postačovat pro získání validních výsledků. Na obrázku 22 je znázorněn použitý výpočtový model a rozvržení komponent pro provedení simulace. Generovaná síť byla lokálně zahuštěna kolem plochy kolektoru, jehly a kapky polymerního roztoku. Vzdálenost *a* byla u následujících simulací nastavena na 3 mm.



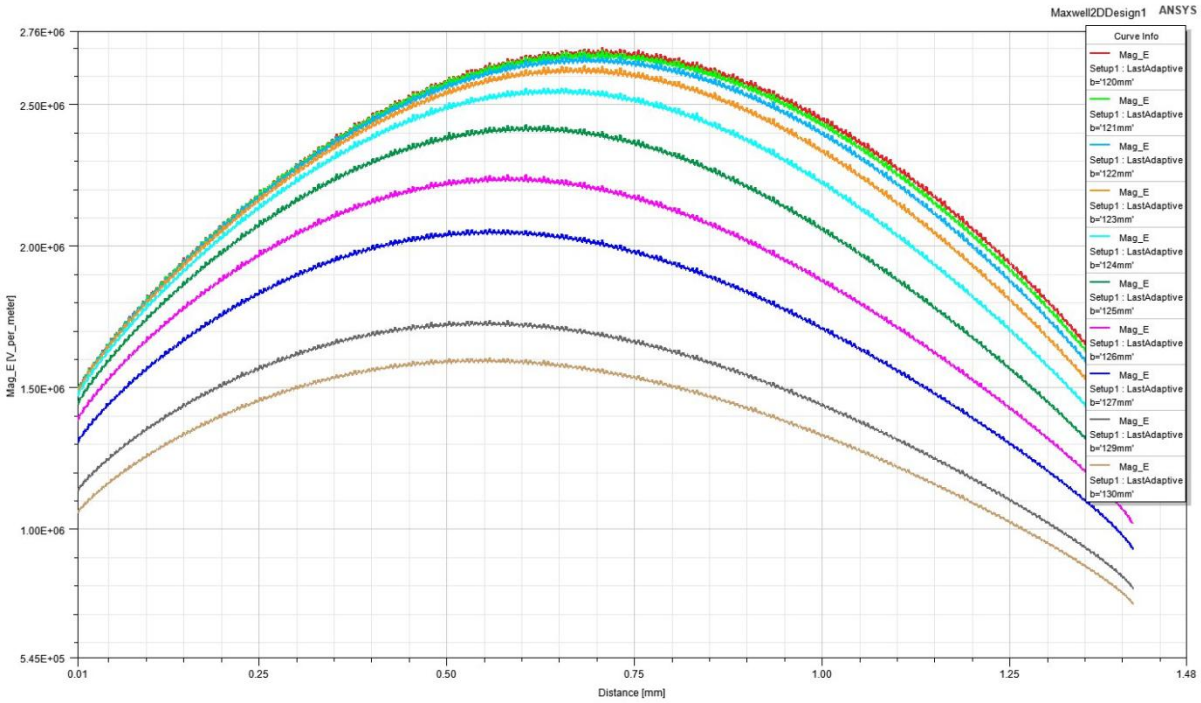
Obrázek 22 Výpočtový model pro simulace vlivu různých variant zaoblení kolektoru

Po provedení simulace byly zjištěny hodnoty intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru v jednotlivých místech pracovní plochy. Z obrázku 23 je patrné, že v závislosti na poloze jehly od středu kolektoru zůstává intenzita konstantní, ale při přiblížení k okraji kolektoru narůstá.



Obrázek 23 Graf rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru při použití tištěného PLA přípravku

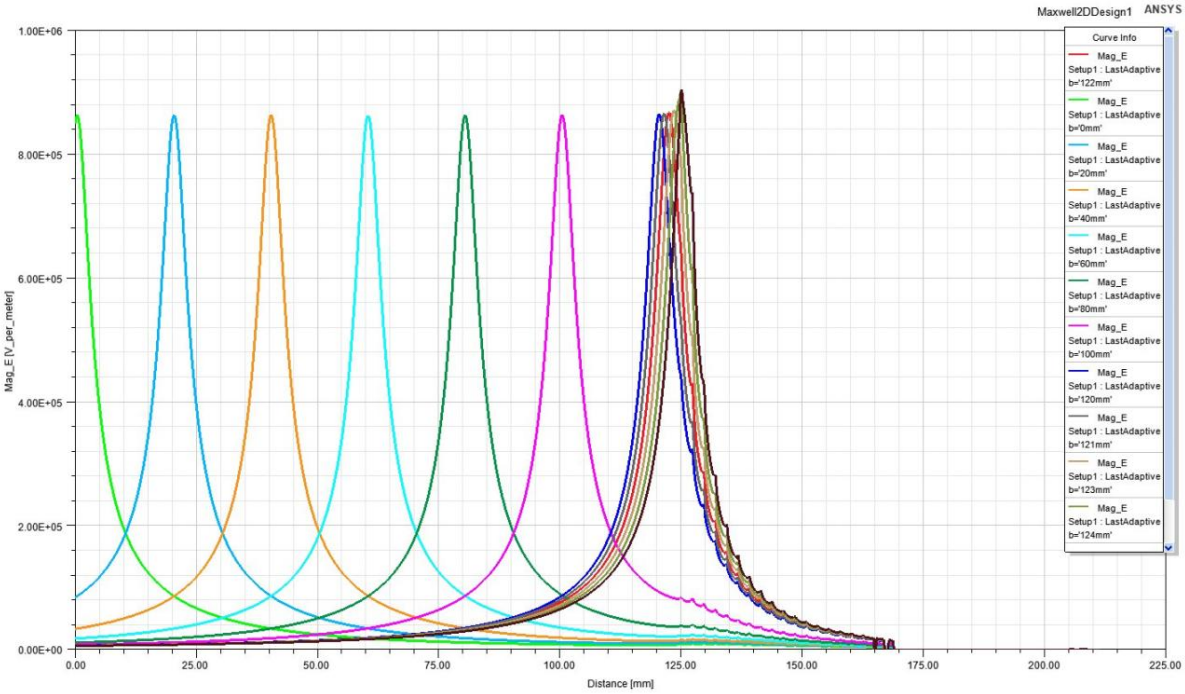
Z grafu rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kapky polymerního roztoku (obrázek 24) plyne, jak se tato intenzita bude měnit při přiblížení ke kraji kolektoru.



Obrázek 24 Graf rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kapky polymerního roztoku

6.2.2 Použití kolektoru se zaoblením z kovu

Použit byl shodný výpočtový model a rozvržení jednotlivých komponent, proběhla však výměna materiálu zaoblení kolektoru z PLA na kov, což mělo odpovídat využití celokovového kolektoru vyrobeného například tažením. Pro tento případ byly taktéž zjištěny hodnoty intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru (obrázek 25).



Obrázek 25 Graf rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru při použití celokovového kolektoru

6.2.3 Zhodnocení obou variant

Při použití obou typů zaoblení kolektoru na vnějším průměru byl sledován nárůst intenzity elektrostatického pole při přiblížení k samotnému kraji kolektoru. Z výsledných grafů je však patrné, že PLA zaoblení nedokázalo tak kvalitně zastínit ostrou hranu kolektoru, jako tomu bylo v případě celokovového kolektoru. Příčinou tohoto jevu byla rozdílná permitivita použitých materiálů, díky které není pole plynule rozloženo. Pro menší vliv na prováděné zvlákňování by tedy bylo vhodné použít celokovový kolektor. Jeho nevýhodou je však složitá výroba, tudíž bylo do modelu prozatím implementováno zaoblení z PLA.

Simulace ukázala, že rozložení intenzity na povrchu kapky se mění s polohou trysky vůči kolektoru. Nejvýraznější ovlivnění je pozorováno v případě, že se tryska nachází v blízkosti kraje kolektoru.

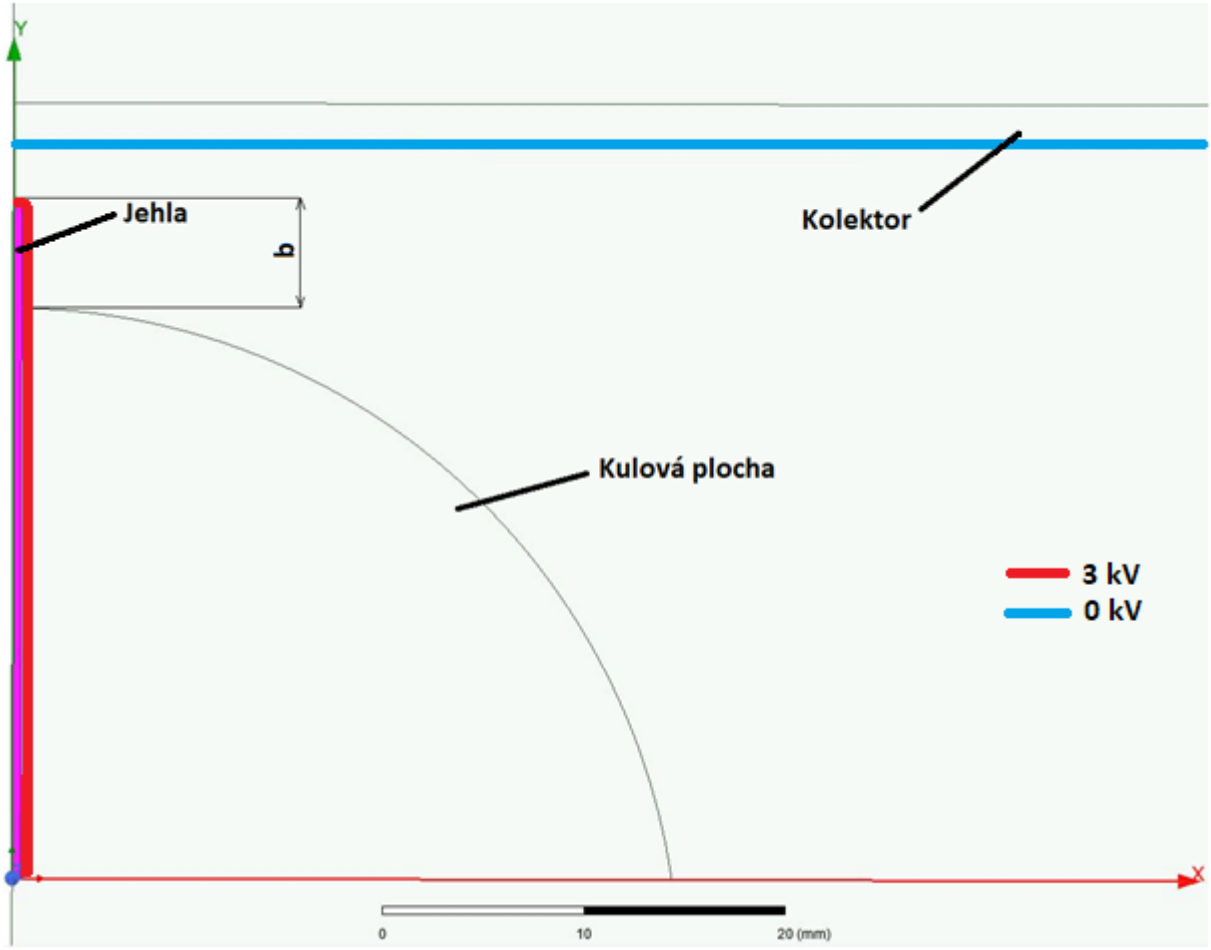
Dále bylo simulacemi zjištěno, že pro variantu kovového zaoblení, jsou podmínky pro zvlákňování z hlediska rozložení intenzity homogenní na ploše kolektoru o průměru až 240 mm.

6.3 Simulace vlivu plochy pod tryskou

Při této simulaci byl sledován další parametr, a to jaký vliv na výslednou intenzitu má tvar povrchu, ze kterého je jehla vysunuta a zároveň jaký je vliv vzdálenosti vzdálenost mezi tímto povrchem a koncem jehly na intenzitu na kapce a kolektoru. Byly použity dvě varianty, kdy první z nich byla použití kulové plochy a druhá spočívala ve využití plochy rovinné. Bylo uvažováno, že oba tyto prvky budou vytištěny z PLA.

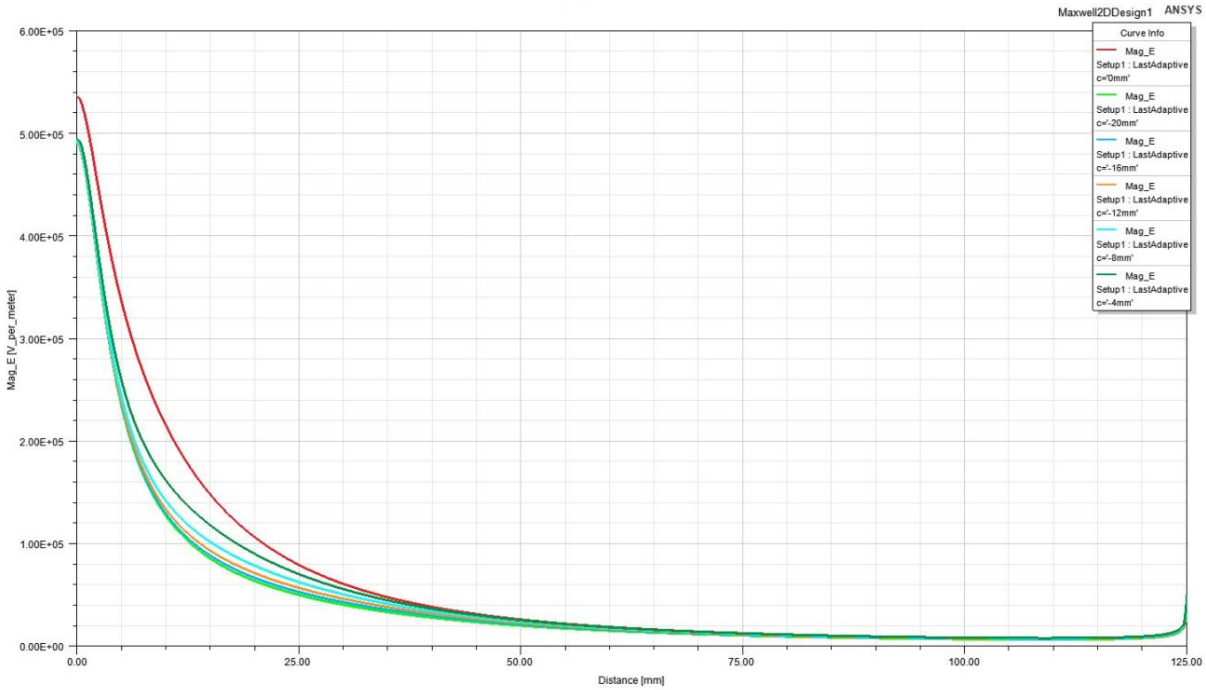
6.3.1 Využití kulové plochy

Výpočtový model zobrazený na obrázku 26 byl v tomto případě vytvořen jako 2D axisymetrická úloha. Sledovaným parametrem je vliv kulové plochy o průměru 70 mm, ze které tryska vystupuje v závislosti na vzdálenosti *b*.



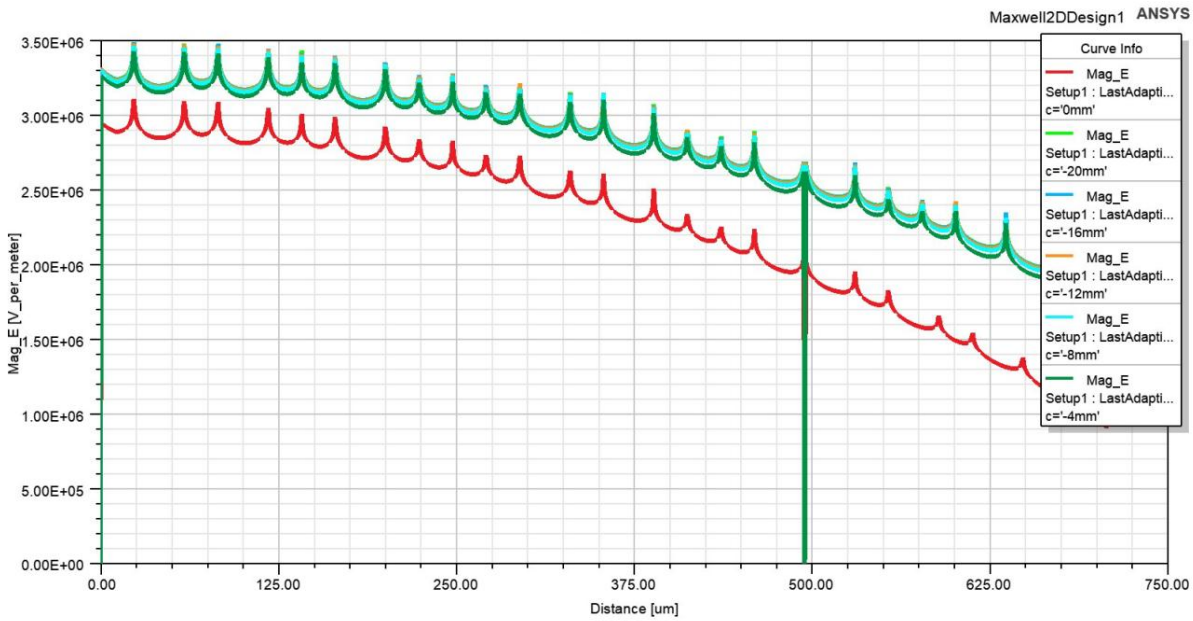
Obrázek 26 Rozložení komponent simulace při použití kulové plochy pod jehlu

Z provedené simulace byly zjištěny výsledky rozložení intenzity elektrostatického pole zanesené do grafu jak pro plochu kolektoru (obrázek 27), tak pro povrch kapky polymerního roztoku na špičce jehly (obrázek 28). Z obrázků plyne, že rozložení intenzity elektrostatického pole je od určité hodnoty vzdálenosti *b* prakticky nemění.



Obrázek 27 Rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru při využití kulové plochy pod jehlu

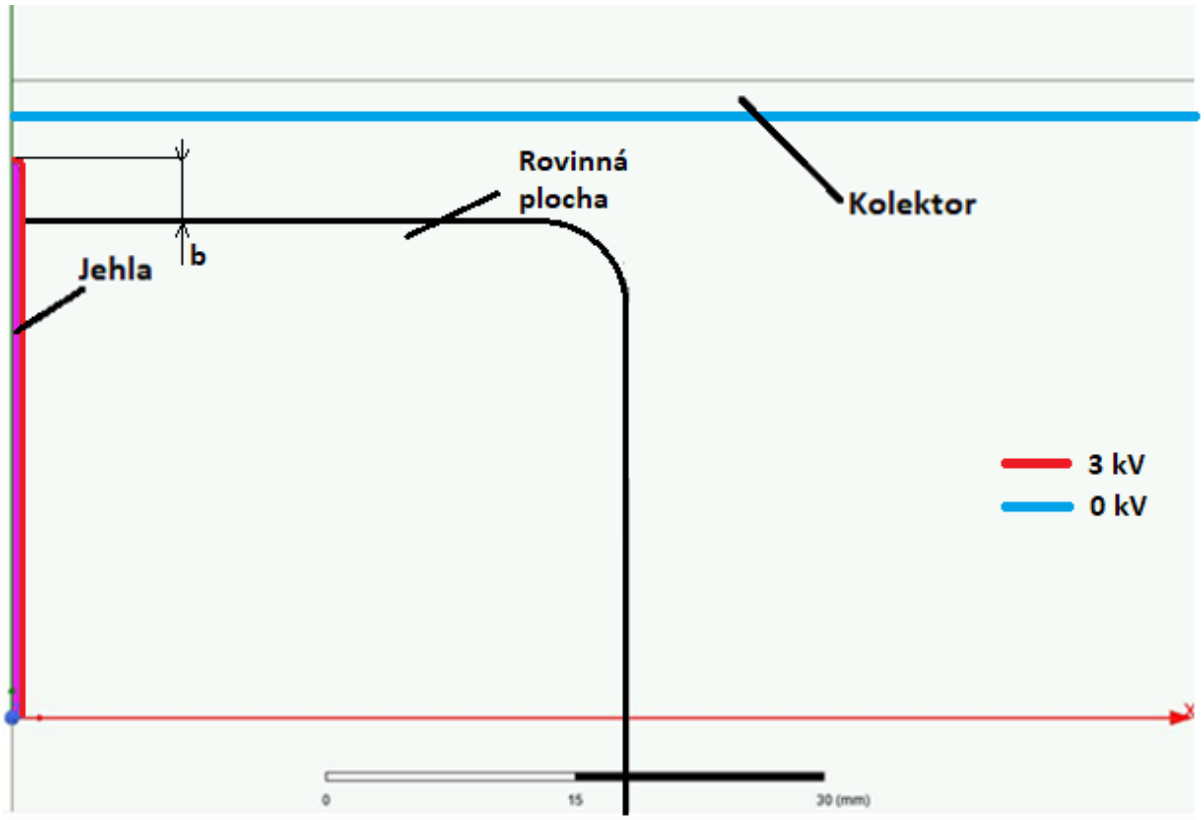
Skok, který je pozorován v grafu pro rozložení intenzity na povrchu kapky vznikl selháním výpočtu, kdy v jedné iteraci nebyla hodnota zaznamenána.



Obrázek 28 Rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kapky při využití kulové plochy pod jehlu

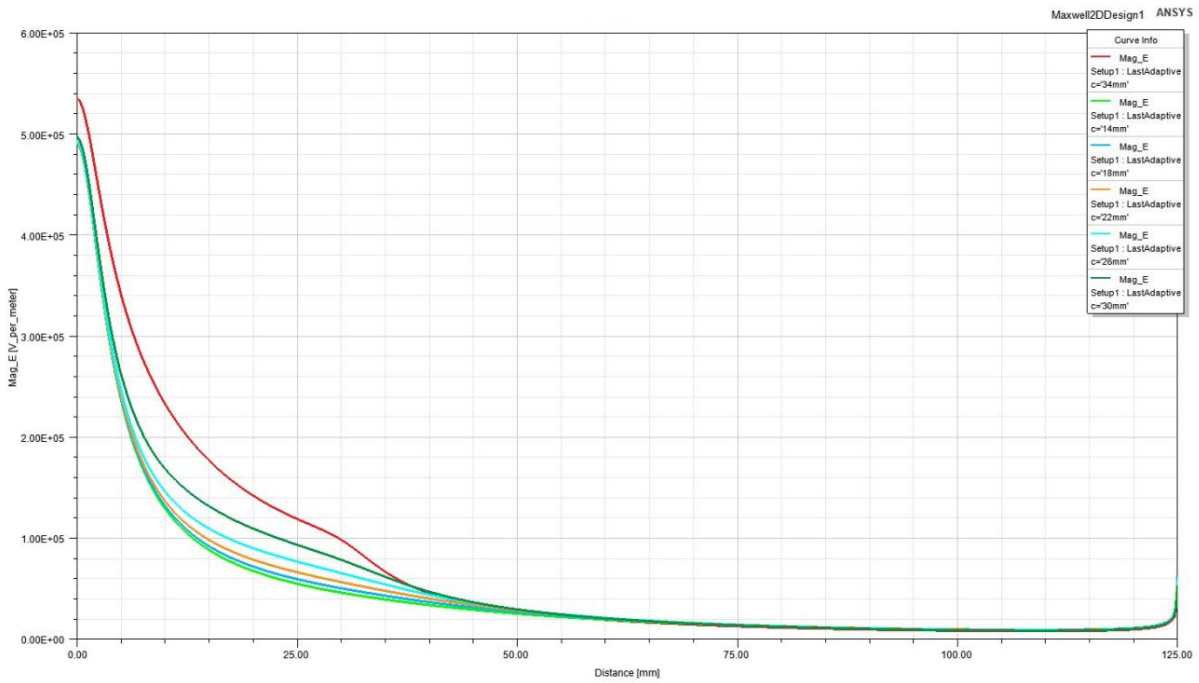
6.3.2 Využití rovinné plochy

Při simulování druhé varianty byla použita plocha, která odpovídá povrchu válce o průměru 70 mm se zaoblenou hranou R = 8 mm. Shodně jako u první varianty byla i tato plocha parametrizována, aby bylo možné realizovat její posuv v ose Y pro simulování různých vzdáleností *b*. Výpočtový model je uveden na obrázku 29.

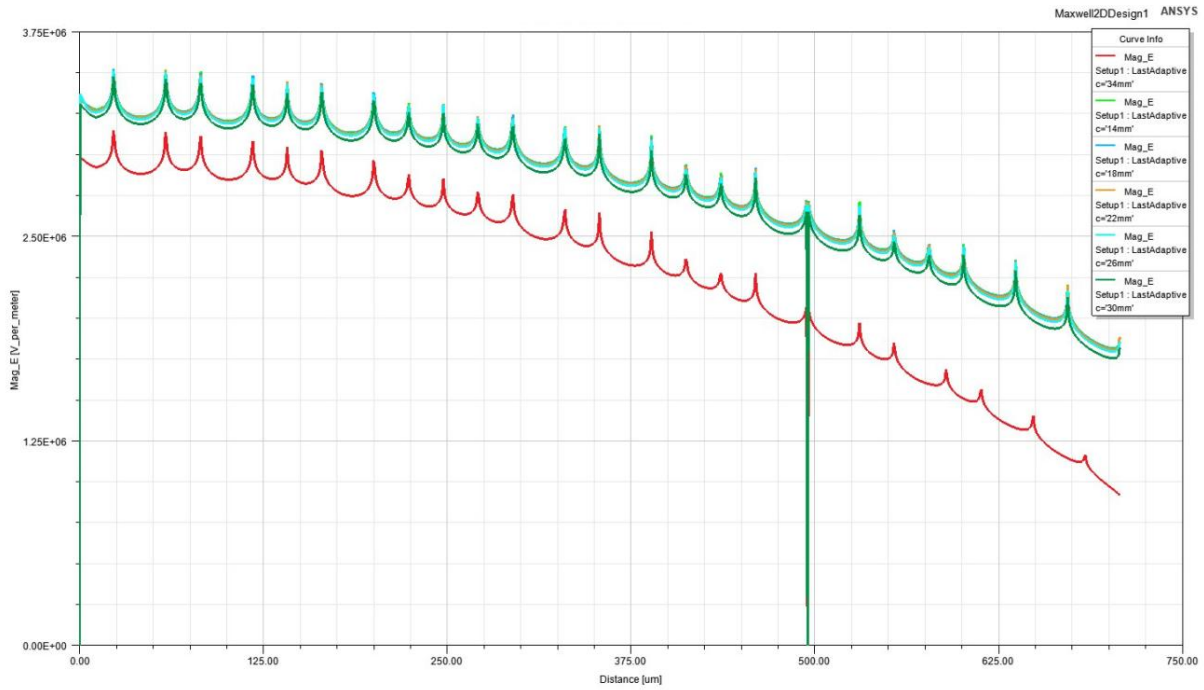


Obrázek 29 Rozložení komponent simulace při použití rovinné plochy pod jehlu

Po provedení byly hodnoty intenzity na ploše kolektoru a kapky shodně zaneseny do grafu (obrázek 30 a 31).



Obrázek 30 Rozložení intenzity elektrostatického pole na ploše kolektoru při použití rovinné plochy

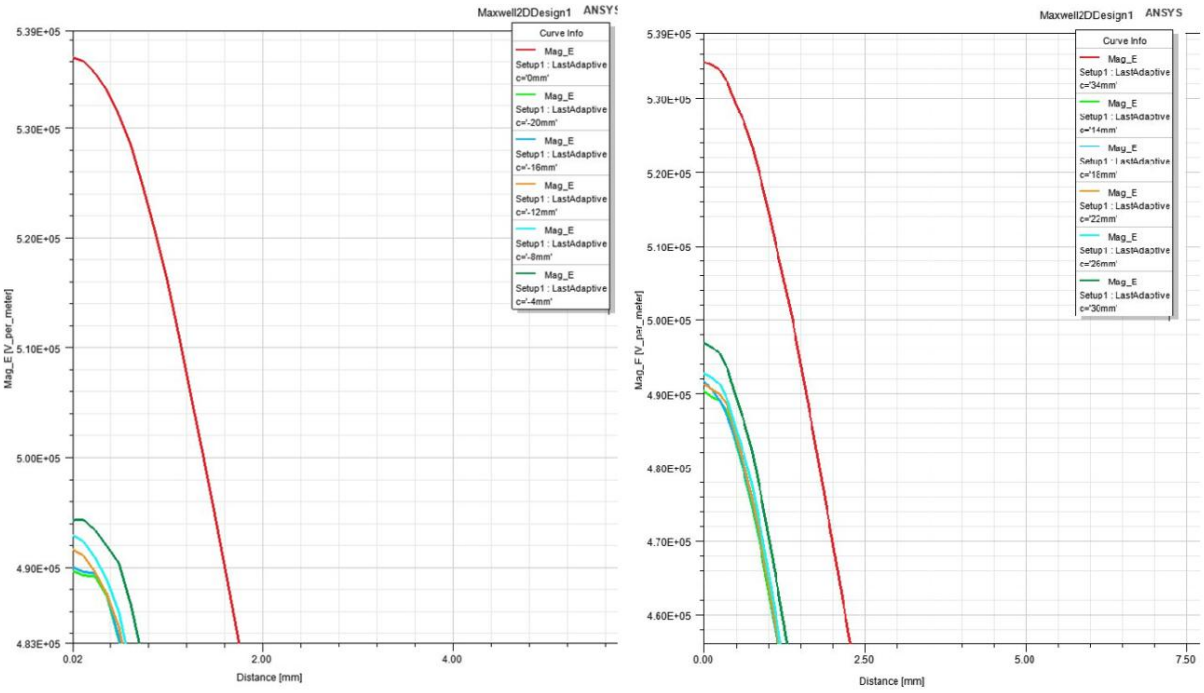


Obrázek 31 Rozložení intenzity elektrostatického pole na ploše kapky při použití rovinné plochy

6.3.3 Zhodnocení obou variant

Při použití obou variant modelů plochy pod jehlou ve snaze o zamezení vlivu ostatních komponent či jiných faktorů na průběh zvlákňování a tudíž docílení zvýšení opakovatelnosti provádění procesu za stejných podmínek bylo dosaženo vesměs shodných výsledků. V obou případech však simulace vykazovaly dosažení téměř konstantních hodnot při vysunutí jehly vzhledem k ploše pod ní o 8 mm. Od této hodnoty už se

intenzita prakticky neměnila, viz obrázek 32, který ukazuje srovnání hodnot intenzity elektrostatického pole na ploše kolektoru detailněji. Ustálená hodnota intenzity byla tedy přibližně 0,492 kV/m.



Obrázek 32 Porovnání intenzity na kolektoru

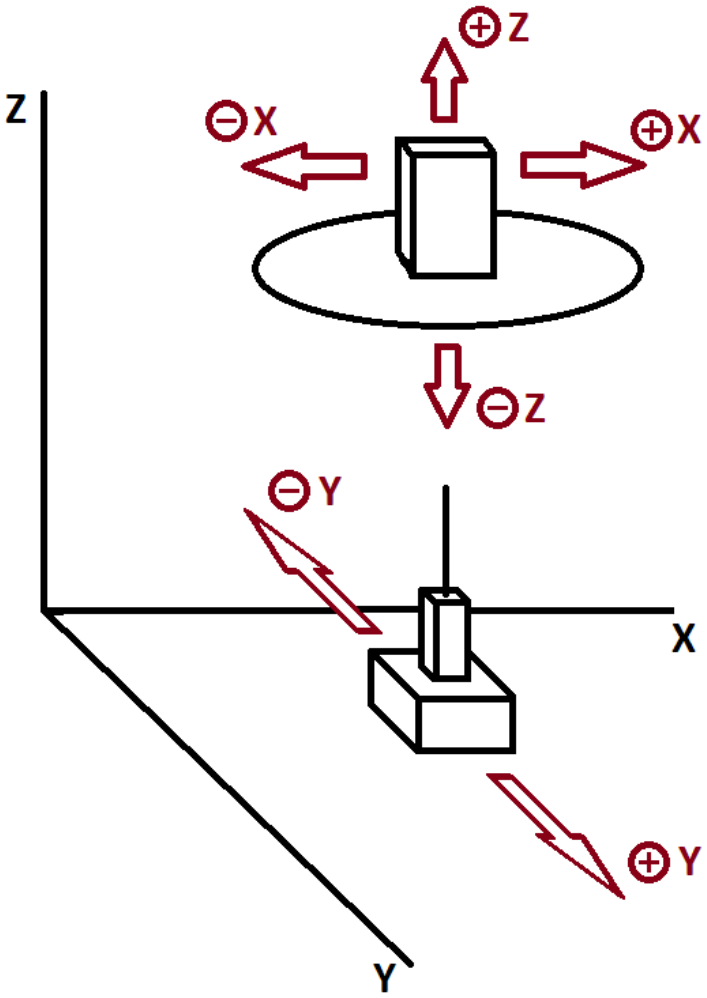
Všechny provedené simulace byly nápomocné pro určení vhodných konstrukčních parametrů vyvíjeného zařízení na výrobu kombinovaných nanostruktur.

7 Konstrukce zařízení pro electroprinting

Celý návrh konstrukce tohoto zařízení je zhotoven za pomocí programu Creo Parametric 9. Základní představa je inspirována zejména 3D tiskárnami firmy PRUSA, které disponují velkým množstvím tisknutých dílů upevněných na rám stroje.

7.1 Volba koncepce tiskárny

Prvním krokem konstrukce je volba koncepce celé tiskárny, tedy rozvržení jednotlivých pohybových os. Z experimentů vyplynula vzájemná poloha kolektoru a trysky, které jsou posazeny na pohybové osy tak, aby docházelo k jejich vzájemnému pohybu.



Obrázek 33 Schéma koncepce pohybových os zařízení

Na obrázku 33 je schematicky ukázáno zvolené rozložení pohybů kolektoru a jehly. Jedná se o stejnou koncepci, jako u řady 3D tiskáren PRUSA MK, akorát se záměnou

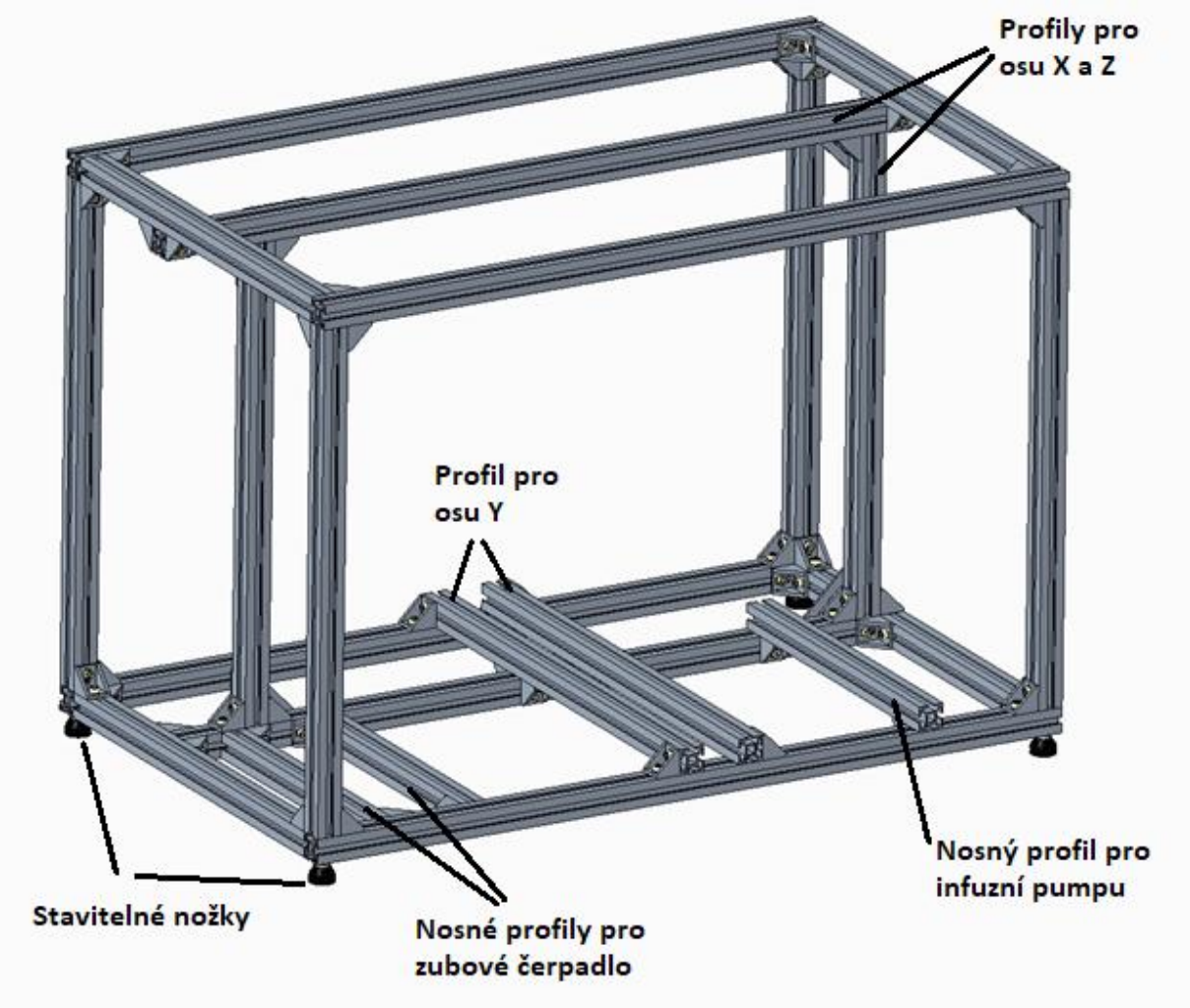
komponent. V předchozí rešerši, zabývající se oblastí velkorozměrových 3D tiskáren, bylo zmiňováno využití systému Core XY, jež dovoloval dosahování vysokých rychlostí tisku. Ten by však v této aplikaci neměl větší význam, jelikož přístroj nebude nucen dosahovat vyšších rychlostí, ale spíše pomalého rozvádění vlákna. Zároveň ani u trysky, ani u kolektoru, nebude nosič obsahovat motor, což značně ušetří hmotnost, která se po ose bude pohybovat, tudíž nebude docházet ke vzniku velkých momentů setrvačnosti, které by nepříznivě ovlivňovali celou konstrukci.

7.2 Konstrukce rámu

Pro konstrukci rámu je využito hliníkových extrudovaných profilů, přesněji stavebnicového systému kombi 30x30 firmy ehlinik. Tyto profily mají specifickou drážku pro vzájemné spojování, či připevňovaní dalších komponent.

Vnější rozměry rámu jsou navrženy tak, aby bylo při instalaci všech komponent nezbytných pro průběh procesu dodrženo bezpečnostních vzdáleností. Celkové rozměry konstrukce tak vycházejí 950 x 660 x 580 mm.

Další profily, které jsou instalovány do rámu, slouží jako nosné elementy jednotlivých pohybových os, nebo čerpacích zařízení. Spojení profilů je realizováno rohovými spojkami, montovanými pomocí kamenů do drážek profilů. Profily pro osy X a Z jsou v rozích ještě opatřeny plochými rohovými výztužemi pro zvýšení tuhosti. Pro ustavení zařízení do rovnováhy je využito stavitelných výklopných nožek. Finální podoba rámu přístroje je vyobrazena na obrázku 34.



Obrázek 34 Rám zařízení

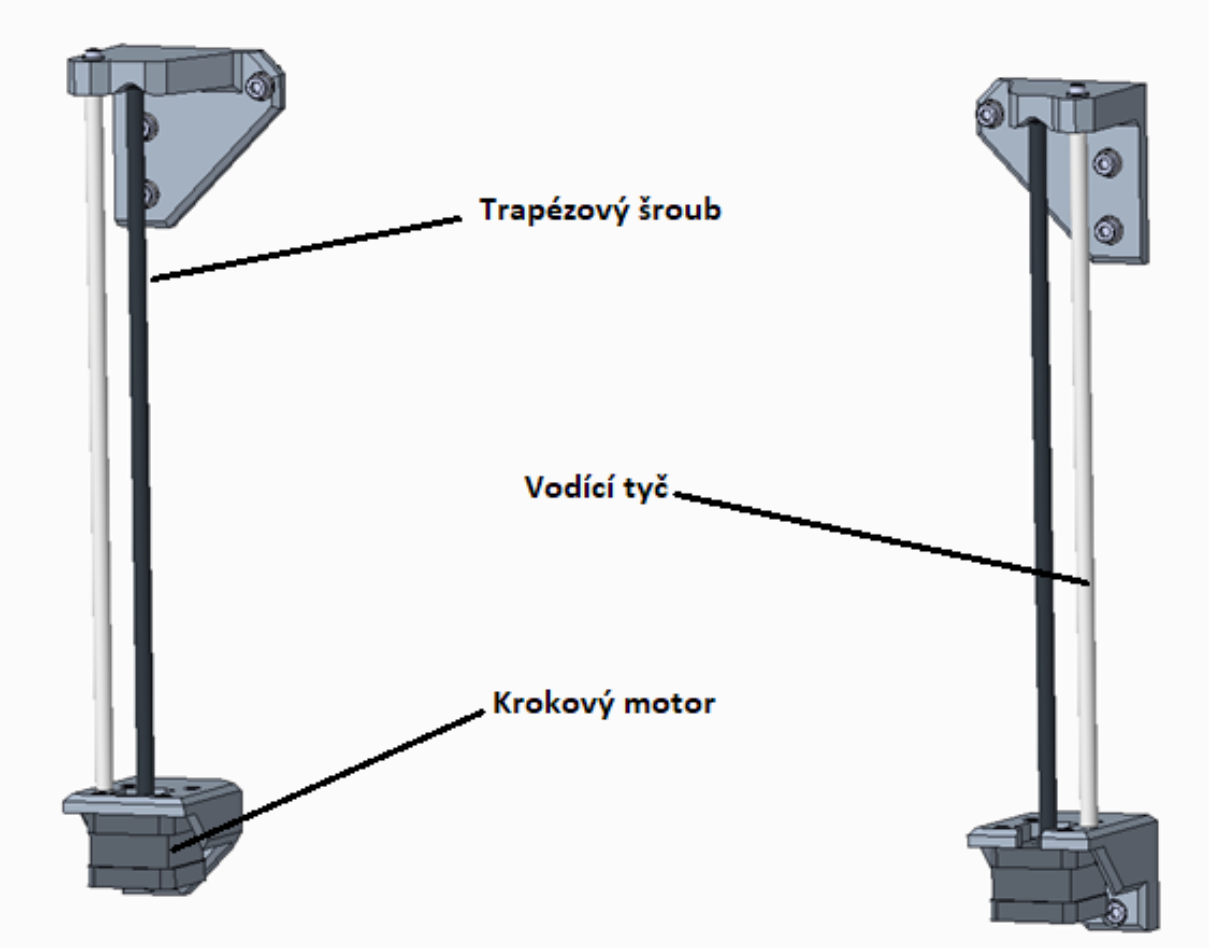
7.3 Návrh jednotlivých pohybových os

Pohybové osy stroje byly navrhovány jako kombinace tištěných tvarových PLA dílů s lineární technikou vedení a pohonnými elementy. Dle zvolené koncepce obstarávají pohyb kolektoru osy X a Z. Osa Y zprostředkovává pohyb jehly.

7.3.1 Osa Z

Na obrázku 35 je představen konstrukční návrh pohybové osy Z. Jako pohybový element byl využit krokový motor s trapézovým šroubem. Pro lineární vedení je použita vodicí tyč. K ustavení komponent do správné polohy a následné připevnění na rám jsou navrženy díly pro 3D tisk. Jelikož na sobě tato osa má nést celou osu X, jejíž délkový

rozměr je velký, je nutné zvolit oboustranné uchycení, tedy 2 trapézové šrouby a vodící tyče, na každé straně konstrukce jeden.



Obrázek 35 Model osy Z

7.3.2 Osa X

Jak bylo již zmíněno, osa X je celá vertikálně unášena osou Z a sama vykonává horizontální pohyb. K pohybu je zde využito řemenového převodu poháněného jedním krokovým motorem, přičemž funkci napínání řemene zastává pomocný šroub nacházející se v nosném díle motoru. Metráž řemenu je upnuta oběma konci na unášeč kolektoru pohybující se po ose. Potřebná délka řemene je určena dle vztahu 3.

$$L_i = \pi * \frac{d_1 + d_2}{2} + \frac{d_1 - d_2}{2} * \beta + 2 * a_1 * cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{3}$$

$$L_i = \pi * \frac{13 + 13}{2} + \frac{13 - 13}{2} * 0 + 2 * 809{,}5 * cos\left(\frac{0}{2}\right) = 1659{,}84\ mm \tag{4}$$

Kde:

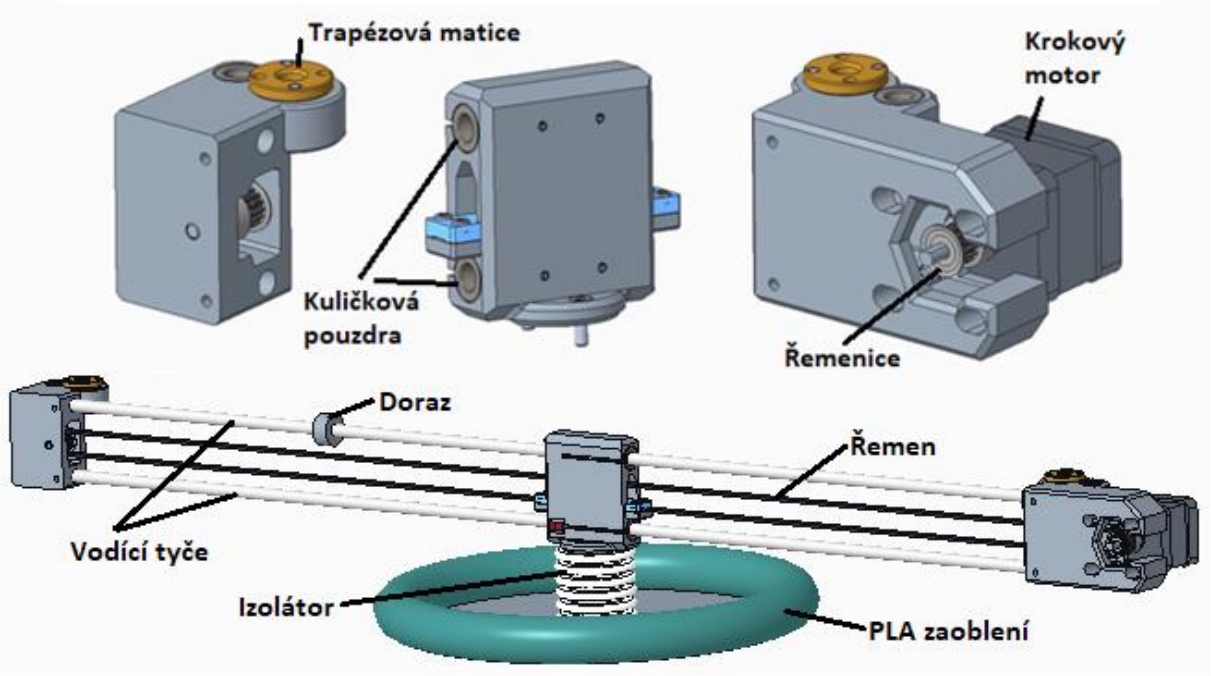
d_1 = průměr řemenice č. 1

d_2 = průměr řemenice č. 2

β = úhel opásání řemene

a_1 = rozteč řemenic 1 a 2

Dvojice vodících tyčí a kuličková pouzdra pak zajišťují přesné vedení s co nejmenším třením. Krajní polohu zajišťuje doraz. Unašeč kolektoru, stejně jako komponenty pro uchycení tyčí, řemenic a motoru, jsou opět navrhnuty pro 3D tisk, kvůli snížení hmotnosti a jejich tvarové náročnosti. Návrh konstrukce této osy ukazuje obrázek 36.



Obrázek 36 Model osy X a detail hlavních komponent

Taktéž bylo zmíněno, že vlivem vysokého napětí užívaného k zvlákňování, bude nutné dodržet bezpečnostní vzdálenosti vzhledem k rámu. Ačkoliv je tedy celková možná délka pohybu nosiče kolektoru 800 mm, bude jako pracovní délka využito jen 250 mm, což se rovná průměru kolektoru.

7.3.3 Osa Y

Stejně jako tomu bylo u osy X, i zde je využito k realizaci pohybu řemenového převodu s krokovým motorem. Potřebná délka řemene určena dle vztahu 5.

$$L_i = \pi * \frac{d_3 + d_4}{2} + \frac{d_3 - d_4}{2} * \beta + 2 * a_2 * cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (5)$$

$$L_i = \pi * \frac{13 + 13}{2} + \frac{13 - 13}{2} * 0 + 2 * 503{,}35 * cos\left(\frac{0}{2}\right) = 1047{,}54\ mm \quad (6)$$

Kde:

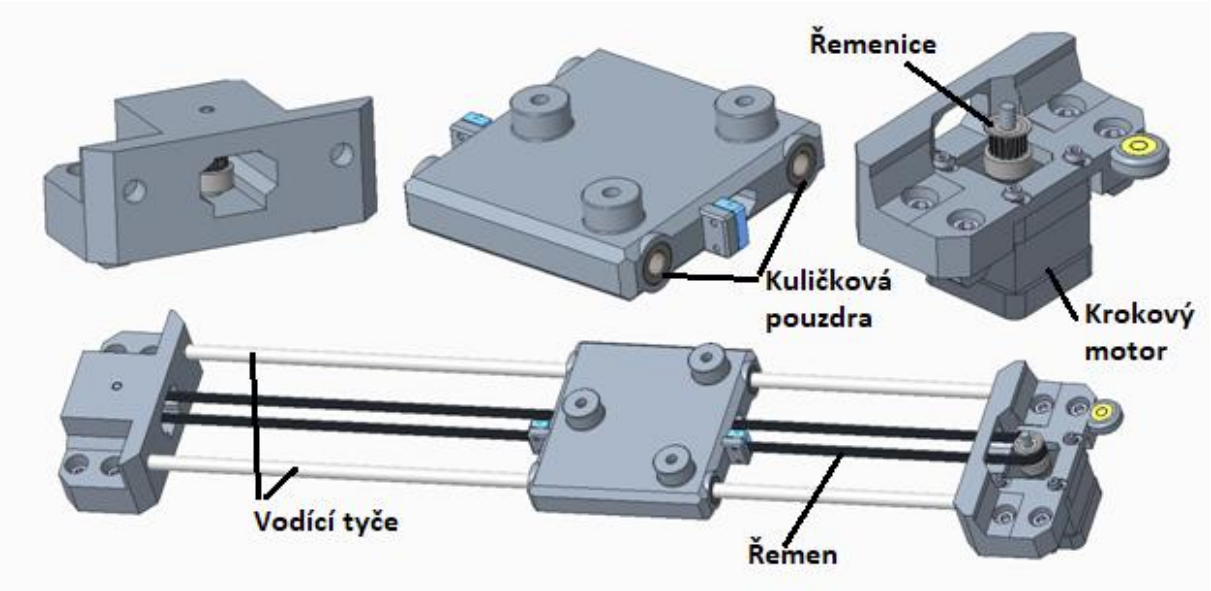
d_3 = průměr řemenice č. 3

d_4 = průměr řemenice č. 4

β = úhel opásání řemene

a_2 = rozteč řemenic 3 a 4

Lineární vedení je na této ose řešeno obdobně jako u osy x. Pracovním prostorem trysky, pohybující se v tomto směru, bude opět jen 250 mm a zbylá délka osy bude představovat bezpečnostní vzdálenost a zároveň prostor pro manipulaci obsluhou zařízení. Pro uvedení osy y do rovnováhy je na držák motoru vložena kruhové libela. Obrázek 37 představuje konstrukční řešení celé pohybové osy včetně detailu hlavních komponent.

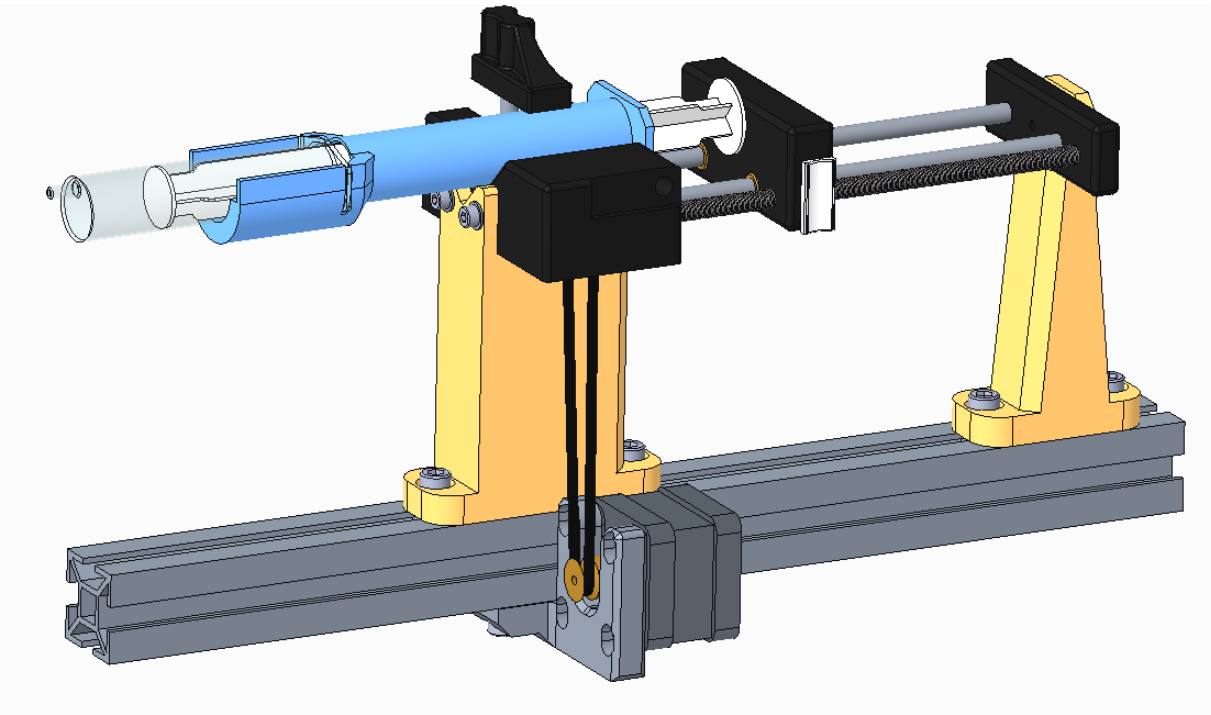


Obrázek 37 Model osy X a detail hlavních komponent

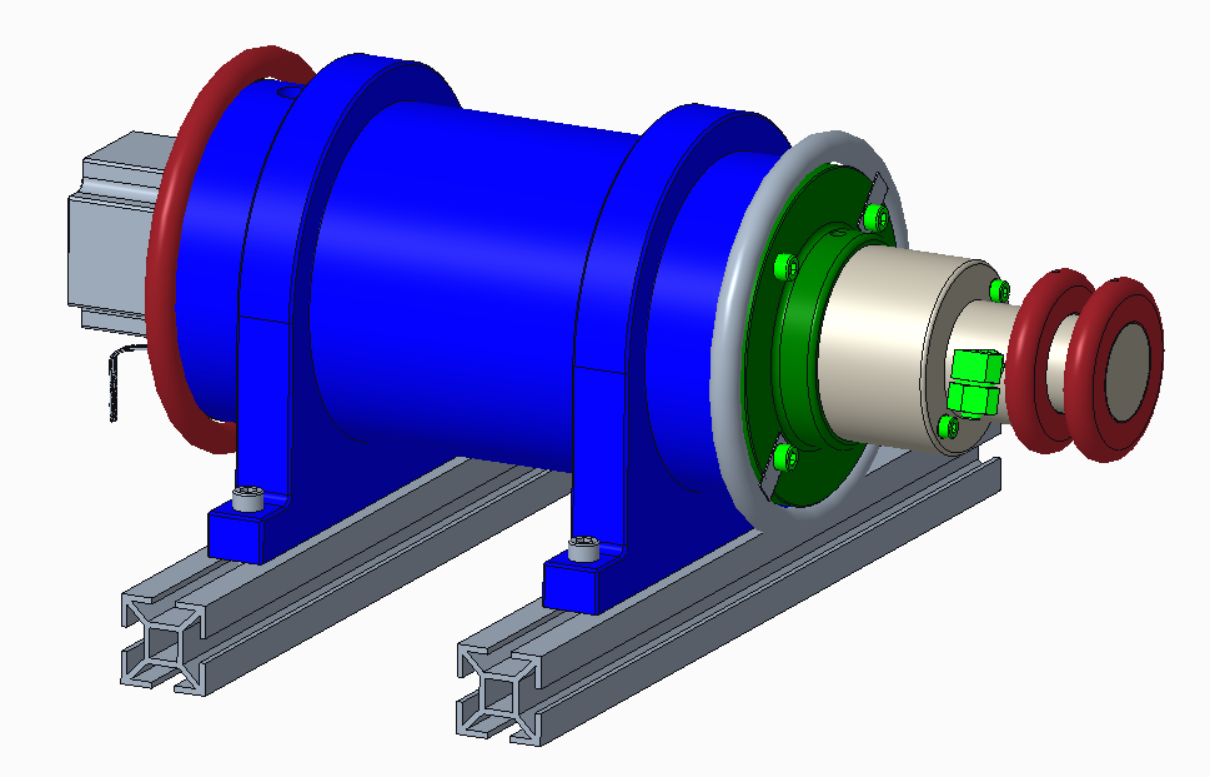
7.4 Volba čerpadla

Při provedených experimentech vyšlo najevo, že pro docílení samotného electro-printingu postačuje infuzní stříkačková pumpa NE-300 JUST INFUSION. S touto konfigurací bylo možné realizovat taktéž DC electrospinning. Infuzní pumpa je tedy nezbytnou komponentou, avšak neposkytuje do budoucna možnost výroby vláken pomocí střídavého proudu, pro který bylo zapotřebí přeplavování jehly. AC electrospinning by do budoucna mohl být přínosem při zhotovování různých variací kombinovaných struktur. Z tohoto důvodu je, pro zvýšení technologické flexibility zařízení, přidáno i zubové čerpadlo GJ Series N25, které bylo upraveno v rámci bakalářské práce [29] za účelem provozu při vysokém napětí, jež nabízí možnost přeplavování a tudíž docílení AC-electrospinningu. V případě infuzní pumpy postačuje využít jen akční části její konstrukce společně s krokovým motorem, což výrazně zmenší nároky na zástavbový prostor. Stříkačka vkládaná do této pumpy je opatřena ochranným izolačním nástavcem. Obě čerpací zařízení jsou uložena na jednotlivé profily rámu stroje tak, aby nenarušovala bezpečnostní vzdálenosti celé konstrukce (obrázek 38 a 39).

Jelikož se jedná o laboratorní zařízení a k dispozici jsou pouze určité komponenty, je použito dostupných čerpadel. V budoucí koncepci bude vhodné zaměřit se na vytipování systému, jež bude zastávat obě funkce zároveň, nebo realizovat vývoj vlastního řešení čerpání.



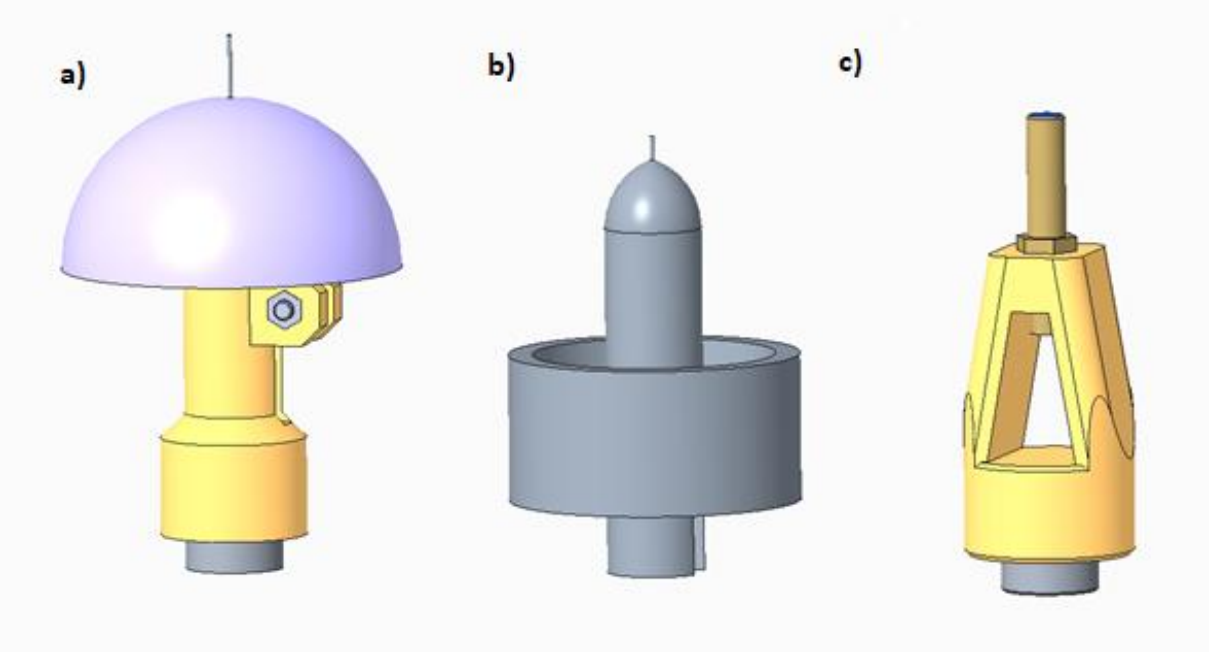
Obrázek 38 Model infuzní pumpy



Obrázek 39 Model zubového čerpadla [29]

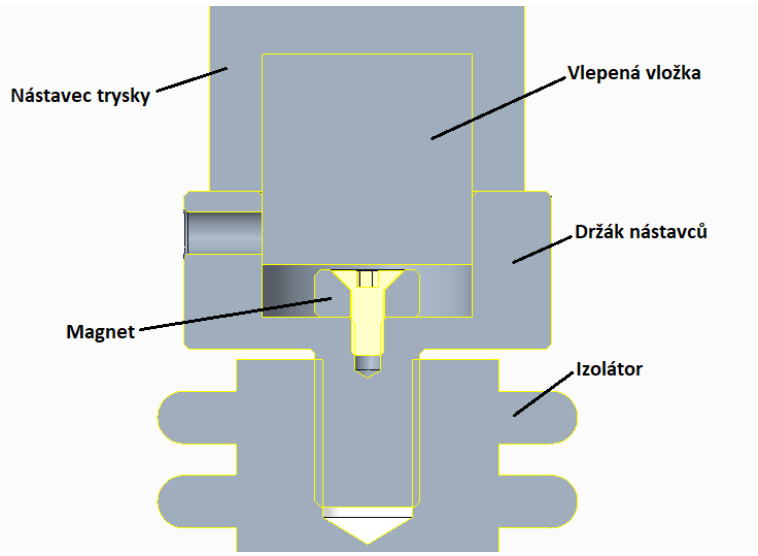
7.5 Konstrukce trysky

Hlavní komponentou konstrukčního návrhu trysky je injekční jehla, do které je dodáván polymerní roztok pomocí hadice s luer spojkou. Jehla je usazena do tvarového přípravku vyrobeného 3D tiskem (obrázek 40a). Tento přípravek je navrhnut tak, aby na něj bylo možné nasadit požadovanou tvarovou plochu, jejíž tvar byl řešen v simulacích v kapitole 6.3. Protože k technologii AC electrospinning je vyžadováno přeplavování, je navrhnut samostatný přípravek na jehlu, jež tuto funkci dovoluje (obrázek 40b). Pro nastavení referenční polohy jehly je použit indukční senzor, který lze zaměňovat s jehlou a je taktéž uložen do tisknutého přípravku (obrázek 40c).

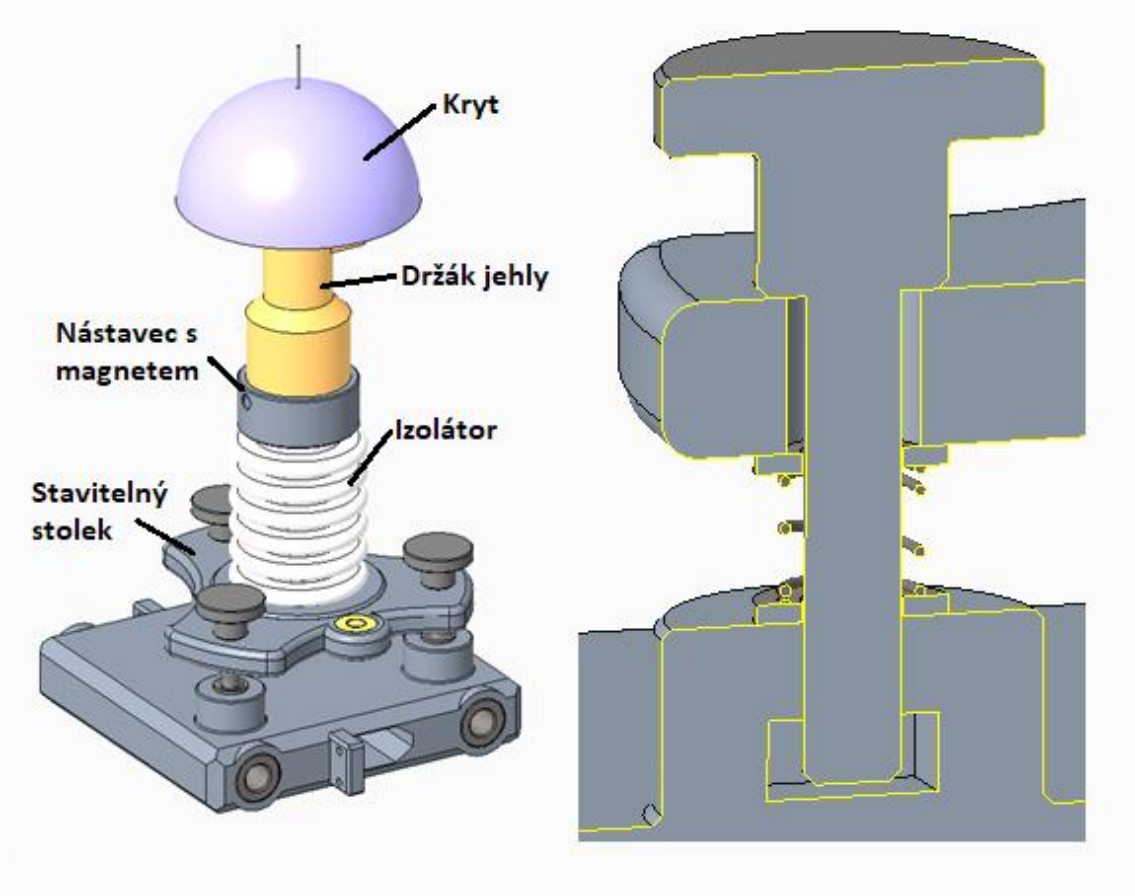


Obrázek 40 Jednotlivé nástavce pro: a) snímáč, b) electroprinting a DC electrospinning, c) AC electrospinning

Aby bylo možné tyto jednotlivé komponenty jednoduše zaměňovat, je zhotoven systém magnetického usazení pro všechny přípravky (obrázek 41). Do těch jsou vlepeny kruhové ocelové tyče, jež slouží nejen jako tvarové spojení, ale i jako prvek přitahovaný magnetem. Samotný magnet je pak umístěn v držáku pro všechny nástavce a celá sestava je opatřena izolátorem stejně jako kolektor. Pro vyrovnávání vnitřních nerovností stroje je tryska posazena na nastavitelný stolek, který je opatřen třemi ovládacími šrouby a kruhovou vodováhou. Na obrázku 42 je pak vyobrazena celá sestava trysky umístěná na nosném prvku pro osu Y společně s detailem řešení nastavitelného stolku.



Obrázek 41 Systém magnetického uchycení



Obrázek 42 Celá sestava trysky

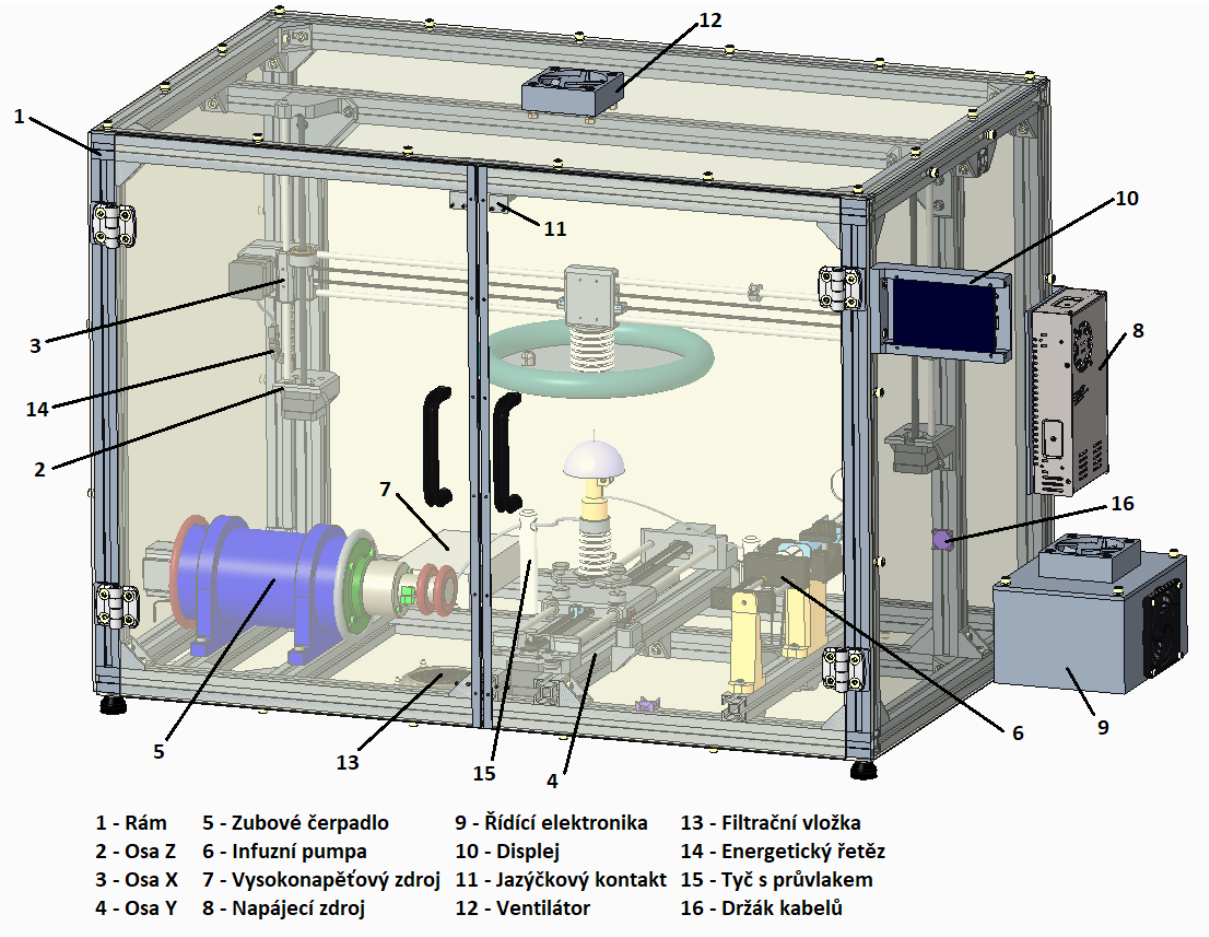
7.6 Kompletní návrh zařízení

Na obrázku 43 je zobrazena kompletní sestava zařízení, která krom jichž zmíněných pohybových os a dávkovacích systémů obsahuje také vysokonapěťový zdroj pro napájení elektrody (7). Dále je zde taky umístěn 24V napájecí zdroj (8) a box s řídící elektronikou (9). Součástí řídící elektroniky je základní deska BTT SKR PICO V 1.0 propojená s minipočítačem Raspberry Pi 4 opatřeným chladícím blokem. Pro snadné ovládání byl přidán dotykový displej (10).

Pro vhodné vedení kabeláže po rámu stroje jsou přidány tištěné prvky zajišťující polohu kabelů (16). Kabel k motoru osy X je uložen do energetického řetězu (14). Poloha hadice dodávající polymerní roztok do trysky a kabelu vysokonapěťového zdroje je zajištěna nevodivými tyčemi s průvlaky (15) tak, aby byly dodrženy bezpečnostní vzdálenosti komponent vzhledem k uzemněnému rámu stroje.

Celé zařízení je zakrytováno polykarbonátovými deskami pro zajištění bezpečnosti při obsluze zařízení. Do prostoru zařízení obsluha vstupuje dvoukřídlými dveřmi tvořenými polykarbonátovou deskou. Aby nedošlo ke spuštění stroje v momentě, kdy

jsou dveře otevřené, jsou jednotlivá křídla opatřena jazýčkovým kontaktem (11), který nedovolí řídící jednotce spustit stroj, pokud nejsou obě křídla zavřená, případně vstoupit do spuštěného zařízení během procesu. Pro zamezení zvyšování koncentrace par rozpouštědel je zajištěno odvětrávání vnitřního prostoru ventilátorem (12). Přisávání okolního vzduchu je zajištěno otvorem ve spodní části stroje, opatřeným filtrační vložkou (13).



Obrázek 43 Kompletní sestava celého zařízení

8 Závěr

V první části diplomové práce byla provedena rešerše zabývající se technologiemi pro výrobu nanovláken. Detailněji byl průzkum věnován DC electrospinningu, AC electrospinningu a také metodám souvisejícím s technologií electroprintungu.

V následující části bylo nahlédnuto do problematiky velkorozměrových 3D tiskáren různých výrobců, jež napomohly k inspiraci konstrukce zařízení pro realizaci technologie electroprinting. Nejvíce inspirací poskytla tuzemská firma PRUSA Research a.s.

Za účelem získání znalostí pro možnost výroby orientovaných nanovlákenných struktur technologií electroprinting a následnému vývoji technologického zařízení byly provedeny různé experimenty, na základě kterých byly zjištěny potřebné technologické parametry. Jako jedním z nejzásadnějších parametrů ovlivňujícím zkoumané technologie se ukázala rychlost dávkování polymerního roztoku. Bylo zjištěno, že pro technologii electroprinting je potřebná rychlost dávkování řádově čtyřikrát nižší, než u technologie ACES. Z tohoto důvodu je nutné použít rozdílné čerpací systémy pro realizaci obou technologií v jednom zařízení. Experimentálně vyrobené vlákenné vrstvy byly prozkoumány pomocí SEM a byla prokázána schopnost výroby nanovláken jak metodou ACES, tak DCES a také bylo dosaženo výroby osamocených vláken, orientovaných ve směru pohybu trysky, s průměry do 2 μm. Byly tak nalezeny vhodné parametry pro realizaci technologie electroprinting.

Další část diplomové práce se zabývala simulacemi rozložení intenzity elektrostatického pole, jež je nezbytné pro zvlákňování. Byl sledován vliv vzájemné polohy kolektoru a trysky na rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru a také na povrchu polymerní kapky. Bylo zjištěno, že změna polohy trysky vůči ose kolektoru má přibližně na 95% plochy zanedbatelný vliv. Lze tedy předpokládat, že na této ploše bude technologie electroprinting probíhat při srovnatelných podmínkách. Dále byl sledován vliv vysunutí jehly vůči krytu, kdy byla nalezena vzdálenost, od které se již intenzita na jehle a na kolektoru prakticky nemění. Také bylo prokázáno, že tvar krytu má na rozložení intenzity na jehle a kolektoru zanedbatelný vliv.

V návaznosti na provedené experimenty a simulace byl navržen finální koncept zařízení pro realizování technologie electroprinting. Koncept zařízení je realizován jako XYZ 3D tiskárna. Podstatná část dílů, které tvoří pohybové osy, je realizována technologií 3D tisk. Pohyb na osách X a Y je realizován pomocí krokových motorů s řemenovým pře-

vodem. Osa Z je realizovaná dvojicí krokových motorů s trapézovými šrouby. Rám stroje je zhotoven z hliníkových profilů kombi 30x30 ehlinik, spojený typizovanými prvky. Byly navrženy dva typy zvlákňovací trysky tak, aby bylo možné docílit technologií ACES, DCES a electroprinting. Pomocí tohoto zařízení tak bude možné vytvářet kombinované nanovláknenné 3D struktury.

Použitá literatura

[1] KLÍČOVÁ, Markéta. *Vývoj dvouvrstvých nanovlákenných materiálů pro fortifikaci střevních anastomóz* [online]. B.m., 2024 [vid. 2024-05-15]. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Dostupné z: https://theses.cz/id/vqzy8b/#panel_latex

[2] HORÁKOVÁ, Aneta. *Vývoj a testování biodegradability nanovlákenných nosičů pro tkáňové inženýrství* [online]. B.m., 2012 [vid. 2024-05-13]. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/12263

[3] SOUČEK, Jiří. Zvlákňovací elektroda pro výrobu směsového nanovlákenného materiálu [online]. 2019 [vid. 2023-10-11]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/150926

[4] RAMAKRISHNA, Seeram. *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*. B.m.: World Scientific, 2005. ISBN 978-981-256-761-1.

[5] LONDON, Physical Society of. *Proceedings of the Physical Society*. B.m.: Taylor & Francis, 1888.

[6] O nanovláknech. *NAFIGATE Park* [online]. [vid. 2023-10-09]. Dostupné z: https://www.nafigatepark.cz/o-nanovlaknech/

[7] POKORNÝ, Pavel. *Analýza procesu elektrostatického zvlákňování a možnosti jeho řízení* [online]. B.m., 2019 [vid. 2023-10-09]. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/142777

[8] MIHÁLIK, Matěj. *Analýza a optimalizace zvlákňovací hlavy* [online]. B.m., 2013 [vid. 2023-10-11]. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/19050

[9] *Vyvíjíme technologii budoucnosti | Elmarco* [online]. [vid. 2023-10-14]. Dostupné z: https://www.elmarco.com/cs/

[10] BAŤKA, Ondřej. *Zařízení na výrobu jádrové příze* [online]. B.m., 2015 [vid. 2023-10-09]. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/17433

[11] 1012+ / __STROY. *Výprava za tajemstvím výroby nanovláken | 1012plus* [online]. 4. říjen 2023 [vid. 2023-10-14]. Dostupné z: https://1012plus.cz/cs/magazin-detail/vyprava-za-tajemstvim-vyroby-nanovlaken

[12] LIBERCI, Technická univerzita v. Představila se linka na zvlákňování polymerů střídavým proudem. *T-uni* [online]. [vid. 2023-10-14]. Dostupné z: https://tuni.tul.cz/rubriky/univerzita/id:90820/predstavila-se-linka-na-zvlaknovani-polymeru-stridavym-proudem

[13] BERAN, Jaroslav, Jan VALTERA, Martin BĂ-LEK, Ondřej BAŤKA, Josef SKŘIVÁNEK, Petr ŽABKA, Jiří KOMÁREK, David LUKÁŠ, Pavel POKORNÝ, Eva KUŽELOVÁ-KOŠŤÁKOVÁ, Petr MIKEŠ, Jiří CHVOJKA, Tomáš KALOUS a Filip SANETRNĂ-K. Lineární vlákenný útvar s pláštěm z polymerních nanovláken obalujícím nosný lineární útvar tvořící jádro, způsob a zařízení k jeho výrobě [online]. CZ306428B6. 18. leden 2017. [vid. 2023-10-14]. Dostupné z: https://patents.google.com/patent/CZ306428B6/cs?oq=306428

[14] BERAN, Jaroslav, Jan VALTERA, Martin BĂ-LEK, Josef SKŘIVÁNEK, Ondřej BAŤKA, David LUKÁŠ, Pavel POKORNÝ, Tomáš KALOUS, Julie SOUKUPOVÁ a Eva KOŠŤÁKOVÁ. Způsob výroby polymerních nanovláken elektrickým zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru, zvlákňovací elektroda pro tento způsob, a zařízení pro výrobu polymerních nanovláken osazené alespoň jednou touto zvlákňovací elektrodou [online]. CZ306772B6. 28. červen 2017. [vid. 2023-10-11]. Dostupné z: https://patents.google.com/patent/CZ306772B6/cs

[15] HÜBNER, Kamil. *Analýza a optimalizace zařízení na výrobu nanovláken* [online]. B.m., 2012 [vid. 2023-10-11]. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/12721

[16] BLAŽKOVÁ, Lenka. Odstředivé zvlákňování nanovláken [online]. 2018 [vid. 2023-10-16]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/112556

[17] LI, Yongqiang, Chao ZOU, Jianzhong SHAO, Xiangwu ZHANG a Ya'nan LI. Preparation of SiO 2 /PS superhydrophobic fibers with bionic controllable micro–nano structure via centrifugal spinning. *RSC Advances* [online]. 2017, **7**(18), 11041–11048. Dostupné z: doi:10.1039/C6RA25813A

[18] REIZABAL, Ander, Biranche TANDON, Senentxu LANCEROS-MÉNDEZ a Paul D. DALTON. Electrohydrodynamic 3D Printing of Aqueous Solutions. *Small* [online]. 2023, **19**(7), 2205255. ISSN 1613-6829. Dostupné z: doi:10.1002/smll.202205255

[19] HSU, Ming-Yi, Chu-Han FENG, Yen-Wei LIU a Shih-Jung LIU. An Orthogonal Model to Study the Effect of Electrospraying Parameters on the Morphology of poly (d,l)-lactide-co-glycolide (PLGA) Particles. *Applied Sciences* [online]. 2019, **9**(6), 1077. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9061077

[20] LUKÁŠ, David. Plateauova – Rayleighova nestabilita Rozpad kapalinové trysky. nedatováno.

[21] FANG, Feiyu, Xulei TAO, Xun CHEN, Han WANG, Peixuan WU, Jiarong ZHANG, Jun ZENG, Zimin ZHU a Zhen LIU. Microlens Fabrication by Replica Molding of Electro-Hydrodynamic Printing Liquid Mold. *Micromachines* [online]. 2020, **11**(2), 161. ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi11020161

[22] Částečně sestavená 3D tiskárna Original Prusa XL s jednou nástrojovou hlavou | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši. *Prusa3D by Josef Prusa* [online]. [vid. 2024-04-03]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/castecne-sestavena-3d-tiskarna-original-prusa-xl-s-jednou-nastrojovou-hlavou/

[23] K1 Max AI Fast 3D Printer. *Creality Europe* [online]. 2024 [vid. 2024-04-03]. Dostupné z: https://store.creality.com/eu/products/k1-max-ai-fast-3d-printer

[24] THE4. Tronxy X5SA-500 Pro Large 3D Printer DIY Kit 500x500x600mm. *Tronxy3dprinter.com* [online]. [vid. 2024-04-03]. Dostupné z: https://www.tronxy3dprinter.com/products/tronxy-x5sa-500-pro-large-3d-printer-diy-kit-500x500x600mm

[25] X5SA-500-Pro instructions.pdf. *Google Docs* [online]. [vid. 2024-04-03]. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/1C2hJ_WrqLONfYnXwo2SD0MuZIClGKKny/view?usp=drive_link&usp=embed_facebook

[26] LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. *Fyzika pro gymnázia. Elektřina a magnetismus*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2000. ISBN 978-80-7196-202-1.

[27] *Elektrostatické pole – WikiSkripta* [online]. [vid. 2024-04-30]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Elektrostatick%C3%A9_pole

[28] SKRIVANEK, J., O. BATKA a J. VALTERA. Analysis of electric field on the circular collector. In: [online]. 2020, s. 204–209. ISBN 978-80-87294-95-6. Dostupné z: doi:10.37904/nanocon.2019.8671

[29] JANEČEK, Tomáš. Zvlákňovací elektroda pro výrobu plošného nanovlákenného materiálu [online]. 2021 [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/161076

Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma zařízení pro DC electrospinning 12
Obrázek 2 Válečková elektroda Elmarco 13
Obrázek 3 Princip využití strunové elektrody 14
Obrázek 4 Výroba jádrové příze metodou AC electrospinning na TUL 15
Obrázek 5 Přeplavovací elektroda 15
Obrázek 6 Princip metody dloužení vláken 16
Obrázek 7 Princip technologie forcespinning 17
Obrázek 8 a) schéma laboratorního zařízení pro electrospraying, b) struktura nanesená electrosprayingem 19
Obrázek 9 Schéma zařízení pro technologii drop-on-demand 19
Obrázek 10 Struktura vyprodukovaná pomocí drop-on-demand technologie 20
Obrázek 11 Schéma technologie jet-deflection 20
Obrázek 12 3D tiskárna Original PRUSA XL 22
Obrázek 13 3D tiskárna Creality K1 Max 23
Obrázek 14 3D tiskárna Tronxy X5SA 24
Obrázek 15 Schéma variant rozložení experimentu a) a b) 26
Obrázek 16 Sestava prvního experimentu 27
Obrázek 17 Průběh zvlákňování AC electrospinningem při zmenšování vzdálenosti kolektoru a trysky 28
Obrázek 18 Nanesené struktury 28
Obrázek 19 Nová sestava experimentu 29
Obrázek 20 a) detail osamoceného vlákna, b) detail průběhu zvlákňování 30
Obrázek 21 Mikroskopický snímek vlákenné struktury při zvětšení 1000x a 5000x 31
Obrázek 22 Výpočtový model pro simulace vlivu různých variant zaoblení kolektoru 34
Obrázek 23 Graf rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru při použití tištěného PLA přípravku 35
Obrázek 24 Graf rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kapky polymerního roztoku 35
Obrázek 25 Graf rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru při použití celokovového kolektoru 36
Obrázek 26 Rozložení komponent simulace při použití kulové plochy pod jehlu 37
Obrázek 27 Rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kolektoru při využití kulové plochy pod jehlu 38
Obrázek 28 Rozložení intenzity elektrostatického pole na povrchu kapky při využití kulové plochy pod jehlu 38

Obrázek 29 Rozložení komponent simulace při použití rovinné plochy pod jehlu 39
Obrázek 30 Rozložení intenzity elektrostatického pole na ploše kolektoru při použití rovinné plochy 40
Obrázek 31 Rozložení intenzity elektrostatického pole na ploše kapky při použití rovinné plochy 40
Obrázek 32 Porovnání intenzity na kolektoru 41
Obrázek 33 Schéma koncepce pohybových os zařízení 42
Obrázek 34 Rám zařízení 44
Obrázek 35 Model osy Z 45
Obrázek 36 Model osy X a detail hlavních komponent 46
Obrázek 37 Model osy X a detail hlavních komponent 47
Obrázek 38 Model infuzní pumpy 48
Obrázek 39 Model zubového čerpadla [29] 49
Obrázek 40 Jednotlivé nástavce pro: a) snímáč, b) electroprinting a DC electrospinning, c) AC electrospinning 50
Obrázek 41 Systém magnetického uchycení 50
Obrázek 42 Celá sestava trysky 51
Obrázek 43 Kompletní sestava celého zařízení 52

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry pro electroprinting..... 30
Tabulka 2 Přehled parametrů 32

Seznam přiložených souborů

1. Seznam přířezů profilů pro rám
2. Výkresová dokumentace

Seznam přířezů profilů pro rám

Ehlinik kombi 30x30:

5 x 950 mm

1 x 890 mm

4 x 600 mm

4 x 580 mm

4 x 520 mm

1 x 387,8 mm

2 x 327,8 mm