



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Pózmán Réka Alexandra

**MASZKOK SZŰRŐKÉPESSÉGÉNEK VIZSGÁLATA ÉS
NÖVELÉSE ELEKTOSZTATIKUS SZÁLKÉPZÉS
SEGÍTSÉGÉVEL**

TDK dolgozat

KONZULENS

Dr. Cselkó Richárd

Székely László

BUDAPEST, 2022

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Abstract.....	5
1 Bevezetés	6
2 Szálképző berendezés működési elve	7
3 A szálképzés folyamata.....	8
4 Technológiai fejlesztések a hatékonyság növelése érdekében.....	10
4.1 Több tűs elrendezés	10
4.2 Forgó elektródos elrendezés	10
4.3 Szabad felszínes elrendezés	11
4.4 Egy cseppes elrendezés.....	11
5 Nanoszálak előnyei és alkalmazási területei.....	12
5.1 Nanoszálak szűrő mechanizmusai	13
6 Saját készítésű elektrosztatikus szálképző berendezés és annak vizsgálata	14
7 A szálképzést befolyásoló tényezők vizsgálata	16
7.1 Oldat tulajdonságai	16
7.1.1 Alkalmazott anyagok	17
7.2 Alkalmazott feszültség.....	18
7.3 Elektródtávolság	19
7.3.1 Az elektródtávolság, feszültség és térerősség közötti kapcsolat vizsgálata	20
7.4 Környezeti hatások	23
7.5 Elektródelrendezés	24
7.5.1 Öt tűs elrendezés vizsgálata.....	24
7.5.2 Két tűs elrendezés vizsgálata	26
8 Maszk szűrőrétegének készítése	28
8.1 Anyagra képzett réteg	28
8.2 Minták készítése során alkalmazott paraméterek	29
8.3 Szűrési hatékonyság laboratóriumi vizsgálata	30
8.4 Szűrési hatékonyság vizsgálatának eredményei	31
8.4.1 Szűrt részecskeszám szerinti hatékonyság.....	33
8.4.2 Szűrt tömegszázalék szerinti hatékonyság (FFP besorolás)	35

8.5	Szűrőréteg tartósságának vizsgálata használat esetén.....	39
8.5.1	Kezelés nélküli réteg tartósságának vizsgálata.....	40
8.5.2	Kezelt réteg tartósságának vizsgálata	41
9	Összefoglalás.....	43
	Köszönetnyilvánítás	45
	Irodalomjegyzék.....	46

Összefoglaló

2019-ben jelent meg a Covid-19, ami azóta is érzékelteti hatását az életünkre. A vírus számtalan módon terjedhet, leginkább a kilélegzett, fertőzött folyadék részecskék által jut el emberről emberre. Szinte a legelső, és azóta elterjedt védekezési óvintézkedés az orrot és szájat eltakaró maszkok folyamatos használata, amiknek a hatékonysága viszont több paramétertől is függ. Három nagy kategóriába soroljuk hivatalosan a maszkokat szűrőképesség alapján, mégpedig FFP1, FFP2 és FFP3-ba. Mindhárom a 0,6 mikrométeres és annál kisebb részecskéket képes szűrni, azonban az FFP1 80%-os, az FFP2 94%-os, míg az FFP3 típusú maszkok mindezt 99%-os hatékonysággal teszik meg. A probléma a textil maszkok megjelenésével indult, melyek szűrőképessége nem sorolhatók be az előbbi kategóriákba, így megfelelő védelmet sem nyújt viselője számára.

A kutatásom fő célja ennek a problémának az orvoslása egy általam készített elektrospinning technológiát alkalmazó, nagyfeszültség segítségével nanoszálakat képző berendezés segítségével. COMSOL szimulációval egy modell több esetét is teszteltem, amely során különböző paramétereket vizsgálva keresem az optimális beállításokat. Ilyen vizsgálati paraméter többek között a tűk száma és ezeknek az egymástól való távolsága. Több tűt alkalmazó mérések során a pozicionálásban kiemelt szerepet kapott a villamos térerősség eloszlása, és az egyes tűk egymásra gyakorolt hatásának vizsgálata. Ezzel a lépéssel elérhető, hogy a berendezés magas szűrőhatékonysággal rendelkező nanoszálakból álló maszk méretű, egyenletes réteget hozzon létre, amit laboratóriumi körülmények között tudok vizsgálni. A tesztelés során előkerülő fontosabb paraméterek még az oldat tulajdonságai, az elektródtávolság és a feszültség értéke is. A célom, hogy olyan szövetből és egy arra applikált poliamid nanoszálak rétegből álló maszkot hozzak létre, ami mérések alapján jobb szűrőképességgel rendelkezik, mint a csupán textil anyagú maszkok. A motivációt az kutatáshoz számomra az adta, hogy olyan egyszerű és gazdaságos megoldás álljon rendelkezésre maszkok gyártására, ami készlethiány esetén megoldást jelenthet.

Abstract

In 2019, Covid-19 pandemic appeared and affected the health of humanity. The virus can spread between people in many ways, but mostly from infected liquid particles. A fundamental method of defense is the use of a face mask in public, however, the efficiency of wearing a mask can be influenced by a number of factors. Most of the masks have a classification based on its filtration efficiency. There are three categories, the FFP1, FFP2 and FFP3. All the three types can filter particles down to the size of 0.6 micrometer, but the FFP1's efficiency is 80%, the FFP2's 94%, while the FFP3's reaches 99%. The problem is that the commonly used textile masks do not have a classification, which means that these cannot protect the wearer from being infected.

The aim of my research is to solve this problem by using a high-voltage nanofiber forming device based on electrospinning technology. COMSOL simulation is used to test several cases of a model, examining different parameters to find the optimal setup. Such test parameters include the number of needles and their distance from each other. For measurements with several needles, the positioning is mainly based on the distribution of the electric field and the influence of each needle on the other. This step provides the equipment to create a mask-size, uniform layer of nanofibres with high filter efficiency, which can be tested in the laboratory. Other important parameters that can be obtained during testing are the properties of the solution, the electrode distance and the voltage level. My goal is to create a mask consisting of a textile fabric and a polyamide nanofiber layer applied to it, which can be measured to have better filtering properties than masks made of textile material only. The motivation for my research was to find a simple and economical option to produce face masks, which could be a solution in case of stock shortages.

1 Bevezetés

Az elektrosztatikus szálképzés, más néven elektrospinning egy egyre növekvő népszerűségnek örvendő technológia, melynek segítségével nagyfeszültség hatására ultravékony szálak képezhetőek polimer oldatból. A szálképzési technika már az 1900-as évek eleje óta ismert [1] [2], azonban az utóbbi évtizedben lett igazán népszerű, amikor a technológiai fejlesztéseket az igényekhez igazítva dolgozták ki és mára az élet egyre több területén találkozhatunk egy-egy berendezés közvetlen használatával, vagy a termékeként létrejövő nanoszálalás réteg alkalmazásával [3]. A létrejövő végtermékkel már a mindennapok során is összefuthatunk, ugyanis nanoszálalás szűrőrétegeket tartalmazhatnak a háztartási szűrőberendezéseink is, valamint az egészségügyben is egyre gyakoribb a technológia alkalmazása [4], melynek nagy előnye, hogy bár a lebegőben található részecskéket kiszűri, de a tiszta levegőt gond nélkül átjuttatja az anyagon.

Kutatásom során egy elektrosztatikus szálképzésre alkalmas berendezést terveztem meg, melyen a működést és szálképződést befolyásoló paramétereket vizsgáltam. A berendezés hatékonyságának növelése érdekében különböző elrendezéseken végeztem méréseket, majd a megfelelő paramétereket alkalmazva textilanyagra képeztem nanoszálalás réteget, melynek mechanikai kopását és hordás közbeni tartósságát elemeztem különböző esetekben. Az általam készített plusz réteget tartalmazó maszkok szűrőképességét vizsgáltam és hasonlítottam össze egy textilből készült arcmaszkhoz képest.

A kutatásom célja, hogy az optimális paramétereket megtalálva olyan nanoszálalásból álló réteget hozzak létre, melyet maszk méterű textilanyagra applikálva szűrőréteggént lehet alkalmazni, ezzel jobb védelmi hatásfokot elérve, mint a standard textil maszkok esetében. Ennek eredményeképpen elkerülhetővé válna az időszakos maszkhiány, amire a korábbi évek során volt már példa [5], valamint megfelelő hatékonyságú textil maszkok hordásával a vírusok emberek közti terjedése is csökkenne.

2 Szálképző berendezés működési elve

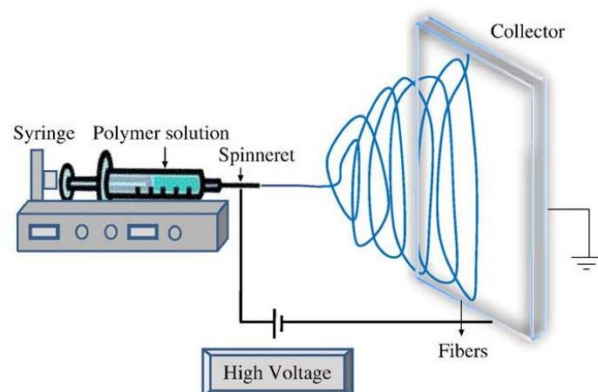
Az elektrosztatikus szálképző berendezés eredeti elrendezése egy egyszerű elven alapszik, amely három fő részből áll: egy adagoló túbóból, egy feszültségforrásból és egy gyűjtő elektródból. [6] Az utóbbi években azonban számos új, innovatív megoldás jelent meg a piacon [7], amikről a későbbiekben lesz szó.

Az adagoló a tűelektródra van csatlakoztatva, ez biztosítja az oldat eljutását a tű végéhez, ahol a szál kialakul. Az adagolás mértékét a szálképződés sebességéhez kell igazítani, hogy folyamatosan legyen oldat a tű végén, viszont ne olyan mennyiségű, ami lefolyna, lecsöppenne az elektród hegyéről. A tű vezetőképes anyagból készül, erre kapcsoljuk rá a feszültséget. [8]

A feszültségforrás AC vagy DC feszültséggel táplálja az elrendezést, melynek értéke általában 5-30 kV között változik az tű és gyűjtő elektród közötti távolság függvényében. [9] [10]

A gyűjtő lemez egy fémből készült elektród, amit földelünk, vagy ellentétes potenciálra kapcsolunk. Feladata az, hogy az érkező polimer szálakat összegyűjtse, ennek felületén alakul ki a szálakból álló réteg.

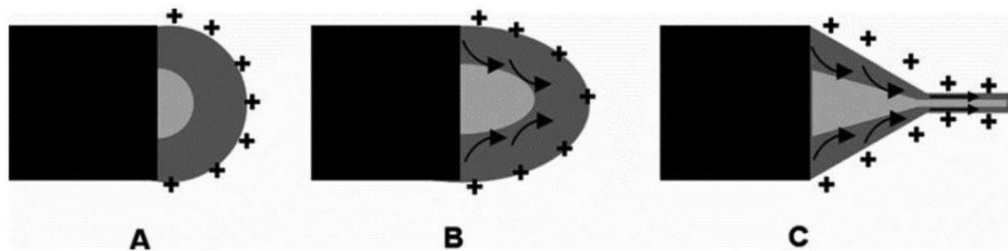
Az elrendezésnek minden esetben úgy épül fel, hogy a gyűjtő lap és az adagoló tű egymással szemben, kb. 3-15 centiméterre van elhelyezve egymástól. Ezt a távolságot nevezzük a továbbiakban elektród távolságnak. A szálképződés a két elektród között ezen távolságon történik meg, melynek irányultsága viszont nincs megszabva, függőleges és vízszintes elrendezésben is működik a folyamat [11]. Egy egyszerű, vízszintes elrendezés vázlatát ábrázolja az 1. ábra.



1. ábra: Elektroszpinning elrendezés vázlatát [12]

3 A szálképzés folyamata

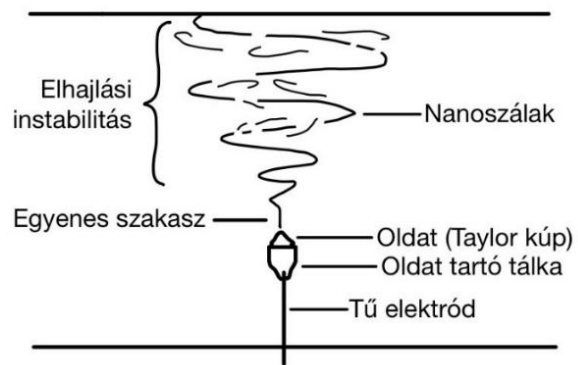
A szálképzési folyamat során az elrendezést feszültséggel tápláljuk, miközben az adagoló a beállított térfogatáramú oldatot biztosítja a tű végén. A feszültség hatására a villamos térerősség értéke megnő a tű körül [13], majd a kritikus értéket elérve az oldat felszínén megjelenő töltések hatására a csepp megnyúlik és kúp formát vesz fel, amit Taylor-kúpnek nevezünk [14]. Kis idő múlva ennek csúcsából egy szál indul ki, ezt a folyamatot 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: Taylor-kúp kialakulásának folyamata [15]

A folyamat szabad szemmel alig észrevehető, a kialakulás időtartama nagyjából 1 ms [16]. Az A képen a még csepp formájú oldat látható, ahol már megjelennek a töltések a rákapcsolt feszültség hatására. A B jelű ábrán a csepp megnyúlik és kúp formát vesz fel, míg végül a C jelű ábrán látható módon egy szál el nem indul a kúp formájú csepp közepéből.

A szál útja két szakaszra bontható. A kiindulás után egyenesen halad a gyűjtő felé, ezt egyenes szakasznak nevezzük, ekkor még az átmérője viszonylag nagy, valamint a sav is nagy koncentrációban van jelen. A térerősség gyorsító hatást fejt ki a szálra, ami miatt az megnyúlik és elvékonyodik, miközben szétszakadozik és spirálisan kezd el szóródni. Ezt a szakaszt nevezzük elhajlási instabilitásnak [17]. A folyamat egésze során a sav intenzíven párolog, ami tovább csökkenti a szálátmérőt, így a gyűjtőhöz érve már nanométer nagyságrendbe esik és közel tiszta polimerből áll [18]. Ezt a folyamatot mutatja a 3. ábra.



3. ábra: A szál útja a tűtől a gyűjtő elektródig

4 Technológiai fejlesztések a hatékonyság növelése érdekében

Az elektrospinning technológiának az egyszerűsége és számos előnye mellett egy nehezen leküzdhető hátránya is van, mégpedig az alacsony termelékenység [19]. Mint ahogy az előző fejezetben megfigyelhető, a folyamat kapcsán nagyon kis méretekről van szó, ebből következően a nanoszálakkal fedett réteg is viszonylag kicsi. Az elmúlt években számos törekvés volt annak érdekében, hogy a szálképzési technika gazdaságosabb legyen, ebben a részben ennek részleteibe szeretnék bővebb betekintést nyújtani.

Bár a működési elv szerinti szálképződés folyamatát nem tudjuk hatékonyabbá tenni, ugyanakkor a kiinduló szálak számát különböző módszerekkel növelni tudjuk [20]. Ennek a gondolatnak a mentén született meg rengeteg innovatív megoldást.

4.1 Több tűs elrendezés

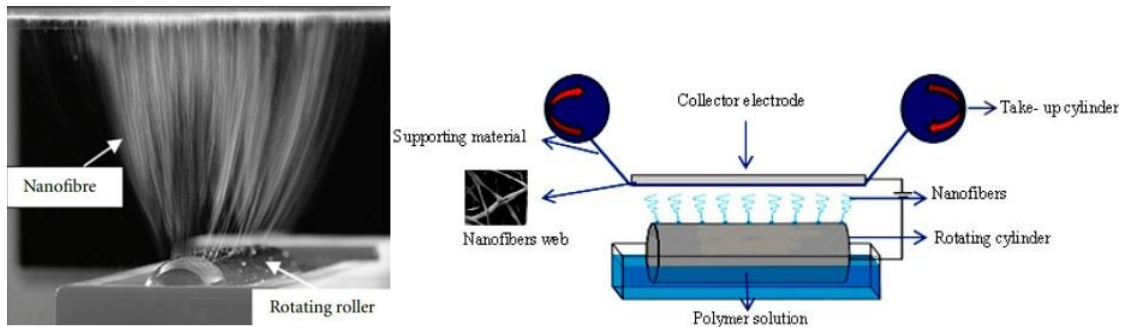
A több tűs elrendezés csupán annyiban különbözik az eredeti elvtől, hogy az adagoló egyszerre több tűt táplál, így egy időben több szál képződése válik lehetségessé [21]. A 4. ábra egy ilyen berendezést szemléltet működés közben és annak leegyszerűsített vázlatát.



4. ábra: Több tűs elrendezés működése és annak egyszerűsített vázlata [22][23]

4.2 Forgó elektródos elrendezés

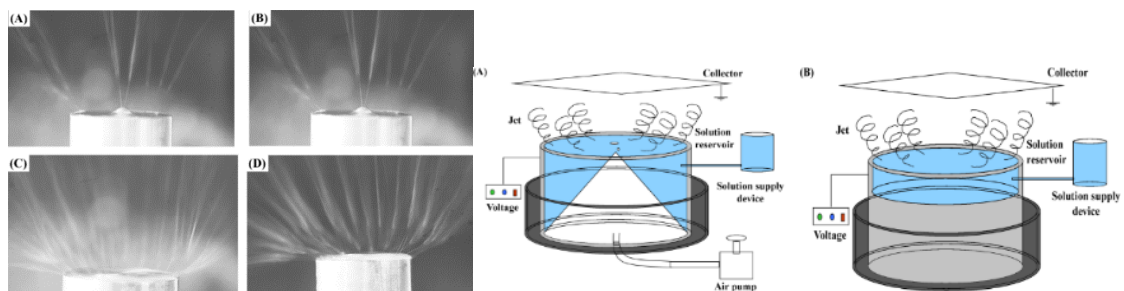
Forgó elektródos elrendezés esetén alul egy oldattal töltött kád található, amiben egy vezetőképes, feszültségre kapcsolt elektród forog. Folyamatos mozgása során a felületére oldat rakódik, amiről a térerősség hatására egy időben több szál is képződik. [24] A működését és vázlatát az 5. ábra mutatja.



5. ábra: Forgó elektródos elrendezés működése és annak egyszerűsített vázlatja [25][26]

4.3 Szabad felszínes elrendezés

A szabad felszínes elektrospinning esetében az alul elhelyezkedő oldattal töltött kád vezetőképes anyagból készült, erre csatlakozik a feszültségforrás, ami biztosítja az oldat szabad felszínén a szükséges villamos térerősséget. Kellően nagy feszültséget alkalmazva a szálak az oldat felszínéről indulnak ki [27]. Ennek hátránya, hogy a szabad felszín miatt a sav párolgása sokkal intenzívebb, mint az adagolás elrendezés esetén, ami amellet, hogy folyamatosan változtatja az oldat koncentrációját, a közelben tartózkodók egészségére is káros. Az elrendezés vázlatja és működése a 6. ábra mutatja.



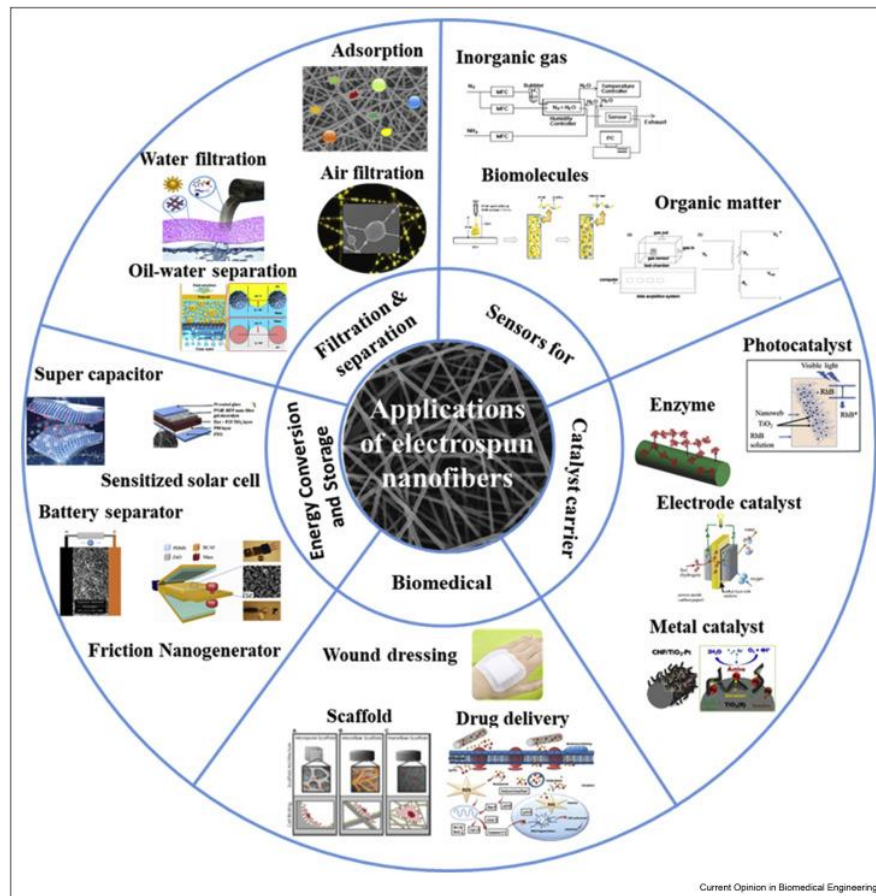
6. ábra: Szabad felszínes elrendezés működése és annak egyszerűsített vázlatja [28]

4.4 Egy cseppes elrendezés

Az egy cseppes elrendezés a szabad felszínes elektrospinning előnyeit törekszik kihasználni a hátrányok kiküszöbölése mellett. A működéséhez nem szükséges adagoló, viszont nincs nagy felületen párolgó oldat sem. A szálak képzéséhez csupán egy-egy csepp oldat szükséges egy vezetőképes elektródra csöppentve. Kutatásom során ezt a modellt terveztem meg és alkalmaztam a mérések kivitelezéséhez.

5 Nanoszálak előnyei és alkalmazási területei

Az ultravékony szálakból álló réteg egy új generációs felfedezés, amely egyedülálló tulajdonságokkal rendelkezik. Létrehozása egyszerű és költséghatékony, nagy terület/térfogat arány és magas szakítószilárdság jellemzi. Az anyag legnagyobb előnye a kiváló szűrőképességhez társuló alacsony légellenállás, ami annak köszönhető, hogy a sűrűn szórt nanométer átmérőjű szálak közötti réseken a levegő gond nélkül áramlik, míg a benne található részecskék fennakadnak [29]. Ezek a tulajdonságok teszik a nanoszálak anyagokat különlegessé, melyeknek már számos felhasználási területe ismert. A 7. ábra az elektrosztatikus szálképzéssel készült rétegek alkalmazási módjait szemlélteti.



7. ábra: Elektrosztatikus szálképzéssel készült nanoszálak alkalmazási területei [30]

A technológia rendkívül népszerűvé vált az egészségügyben, ahol sebfehérítéshez, gyógyszer adagoláshoz, sejtgyógyításhoz használják, azonban számos egyéb területen használják ki az anyag szűrőképességét, alkalmazzák elemekben energiataroláshoz,

katalizátorokhoz vagy akár szenzorokhoz [31]. Az alkalmazott területek között nem szerepel a maszkok készítése, bár kutatások folynak ennek vizsgálatára is [32].

5.1 Nanoszálak szűrő mechanizmusai

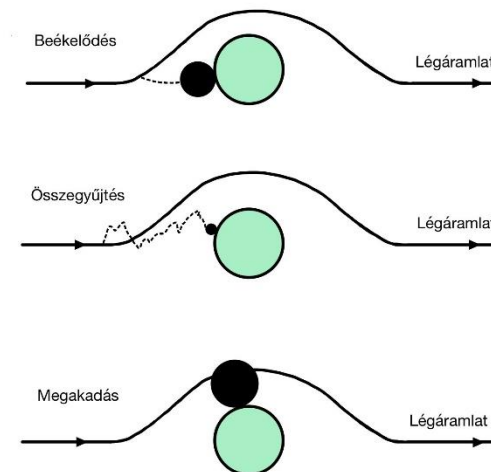
A részecskék szűrés során egyszerre több mechanizmus is szerepet játszhat. A nanoszálak szűrését három ilyen mechanizmus jellemzi: a beékelődés, a megakadás és az összegyűjtés. [33] [34] [35]

A beékelődés mechanizmusa abban az esetben érvényesül, ha egy légáramlat a szűrőhöz érve annak hatására eltérül, a benne hordott részecskék viszont nem követik le a levegő mozgását és a szálba érkeznak. A beékelődés esélye a részecskék méretével és a sebesség növekedésével arányosan nő.

Az összegyűjtés mechanizmusa révén a szűrés a részecskék véletlenszerű mozgásából ered. Ekkora az apró részecskék különböző útvonalakat követnek, így jelentősen megnő annak az esélye, hogy a szűrőbe érkezzenek. Ez a jelenség általában a mikrométer alatti részecskék esetében következik be.

Megakadás során a részecske tömegközéppontja megközelíti a szűrő felületét, azonban a méretéből adódóan megakad benne. Ez a mechanizmus a 10 μm -nél nagyobb részecskék esetén fordul elő.

Ezeket a mechanizmusokat szemlélteti a 8. ábra.



8. ábra: Nanoszálak szűrő mechanizmusai

6 Saját készítésű elektrosztatikus szálképző berendezés és annak vizsgálata

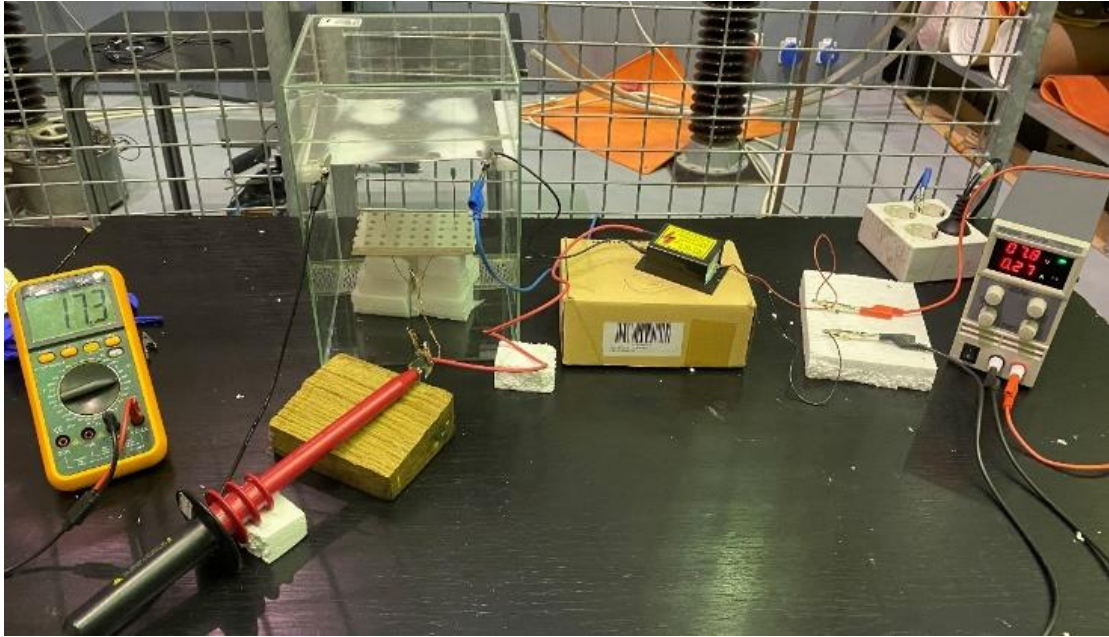
A mérések megkezdése előtt a berendezés megtervezése volt a feladatomban. Mivel a kutatásom célja az, hogy textil maszkokra képezek plusz szűrőréteget, így a tervezés során a fő szempont az volt, hogy a gyűjtő egy kiterített maszk méretével megegyezzen, valamint egy textilanyag ráhelyezhető legyen, hogy a szálakat közvetlenül az anyagra képezhessem.

Az adagolós megoldás egy tű alkalmazásával nem fedti le a szükséges területet, a több tűs elrendezés pedig megkötésekkel járna, így az adagoló nélküli módszert találtam a legoptimálisabbnak. A megalkotás során az egy cseppes modellt vettem alapul, ahol az elektródok száma és azok elrendezése egyszerűen variálható. Az adagolótű helyett vezető anyagból készült tüelektródokat alkalmaztam, amik tetején egy apró, tálka szerű oldat tartó található. Az elektródok egy-egy szigetelt vezetékhez vannak kötve, ezeken keresztül jut el a feszültség alulról az oldat felszínéig.

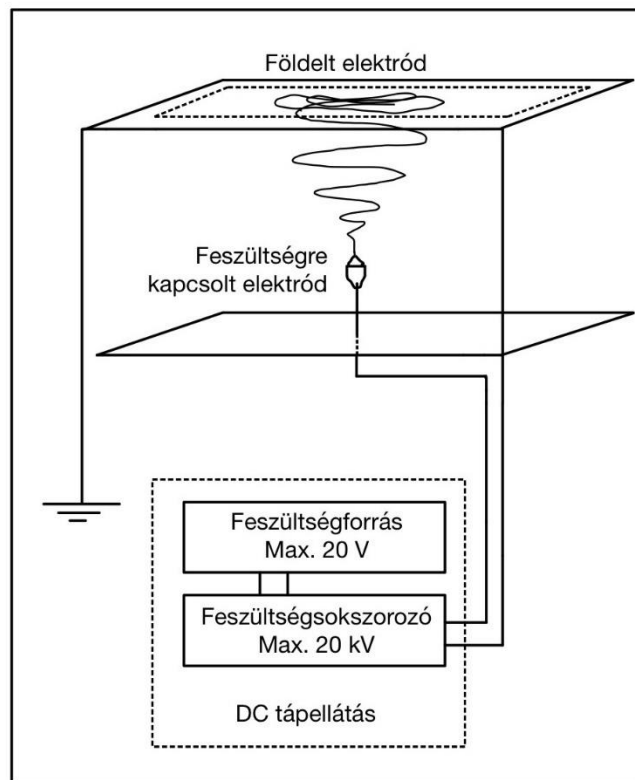
A szálképzés függőleges irányba történik, alul helyezkedik el a feszültséggel táplált oldattartó elektród, míg felette egy sima felületű, vezetőképes, földelt gyűjtő lap, amire a szálak érkezik. A tüelektródok pozícióját egy szigetelő anyagból készült tartó lap stabilizálja, melyben a tűk száma és azok elrendezése szabadon változtatható, valamint az elektródtávolság is állítható a tűk függőleges irányába való mozgásával. A berendezés egy üveg tárolóban van felépítve, melynek felhelyezhető üveg ajtaja teszi lehetővé, hogy feszültség alatti állapotban ne jelentsen bármilyen veszélyt a környezetében tartózkodó emberekre nézve.

Az üveg tárolón kívül a 230 V-os hálózatra csatlakoztatott DC feszültségforrás kapott helyet, melynek maximális kimeneti feszültsége 20 V, így egy nagy teljesítményű DC-DC konvertert kötöttem az áramkörbe, ami felerősítette a jelet. Az aktuális feszültséget digitális multiméterrel segítségével kísértem figyelemmel, azonban mivel ez az eszköz 20 kV-os tartományon nem képes mérni, így a multiméter elé egy feszültségosztót kapcsoltam.

Az elrendezést, illetve annak kapcsolási vázlatát az 9. ábra és a 10. ábra mutatja.



9. ábra: Saját készítésű elektrosztatikus szálképző berendezés működés közben



10. ábra: Saját készítésű elektrosztatikus szálképző berendezés vázlata

7 A szálképzést befolyásoló tényezők vizsgálata

Az elektrosztatikus szálképzési folyamat bár nagyon egyszerű elven alapszik, de a berendezés működőképességét és a létrejövő szál minőségét számos tényező befolyásolja. Ilyen meghatározó paraméter az oldat tulajdonsága, az alkalmazott feszültség, a gyűjtő és tüelektród közötti távolság, a környezeti hatások, valamint az elektródelrendezés [36] [37]. Az optimális működéshez szükséges beállításokat célszerű tapasztalati úton megismerni, ugyanis a szakirodalomban szereplő elrendezéseket szinte lehetetlen egy az egyben megismételni.

A mérések során ezeknek a paramétereknek a befolyásoló hatását vizsgáltam, keresve az optimális beállításokat. A tapasztalatokat és eredményeket a következő pontokban részletezem.

7.1 Oldat tulajdonságai

Elektrosztatikus szálképzés szempontjából az oldat minőségét három fő tulajdonság befolyásolja: a viszkozitás, a villamos vezetőképesség, valamint a felületi feszültség. [38]

Ezek közül is a viszkozitás a legfontosabb, ugyanis ez a paraméter van hatással a Taylor-kúp kialakulására, a szál stabilitására az útja során, illetve a gyűjtőre érkező szálak átmérőjére is. Ha az oldat viszkozitása túl nagy, akkor a szálak átmérője megnő vagy a szálképzés el sem indul. Ezzel szemben, ha az oldat alacsony viszkozítású, akkor a szálakon apró, gyöngy szerű cseppek jelennek meg, amik rontják a létrehozott réteg minőségét. Ezeket a hibákat vizsgálva kell a választott anyagokhoz megkeresni az optimális koncentrációt. [39]

A villamos vezetőképesség egy anyagtulajdonság, ami az oldat kapcsán leginkább az oldószer vezetőképességétől függ, azonban az alkalmazott polimer is befolyásolja.

A felületi feszültség a folyadék felszínének csökkentésére törekszik, a lehető legkisebb fajlagos felületű alakzatot igyekszik felvenni, ami a gömb forma [40]. Ez az erő a szál kiindulását akadályozza, nagy értéke esetén nagyobb feszültség szükséges, hogy az elektrosztatikus taszítóerő nagyobb legyen, mint a felületi feszültség, ami a szál elindulását eredményezi.

7.1.1 Alkalmazott anyagok

Elektrosztatikus szálképzéshez oldat anyagaként polimert alkalmazunk, amit általában szerves savban oldunk. A polimereknek két nagy csoportját különböztetjük meg: szintetikus és természetes műanyagok. Mindkét típus alkalmas szálképzéshez, azonban anyagtulajdonságaik eltérőek, így az ezekből előállított nanoszálak anyagok tulajdonságai is különböznek egymástól.

A szintetikus műanyagok legnagyobb előnyei a jó mechanikai tulajdonságok és költséghatékonyság mellett a könnyű kezelhetőség, ugyanis a legtöbb szerves savban könnyen oldódnak és képezhető belőlük nanoszál. A leggyakrabban használt anyagok a poliamid (PA), a politejsav (PLA) és a poli(vinil-alkohol) (PVA) [41]. Az anyag szálszerkezetének megerősítéséhez gyakran adalékanyagokat alkalmaznak, amik a szűrést is hatékonyabbá vagy éppen antibakteriálissá teszik. Ilyen adalékként fordul elő a szálak között az aktív szén, az üveg, arany, vagy éppen ezüst részecskék. [42]

A természetes műanyagok használata leginkább a technológia egészségügyben való népszerűsége miatt jelentős. A bioműanyagokból készült oldatok ártalmatlanok az egészségre, ezek készítéséhez többek között kollagént, zselatint vagy kitozánt alkalmaznak. [43]

Az oldószer megválasztásának fő szempontja az, hogy oldódjon benne az oldani kívánt anyag. Az alkalmazható oldószerek listája bár véges, de a legtöbb polimerhez találunk olyan egyszerűen beszerezhető szerves savat, ami alkalmas az oldat készítéséhez. Ilyen például a hangyasav és az ecetsav. [44] A legnagyobb gond azonban az, hogy ezek az anyagok szinte kivétel nélkül károsak az egészségre, így szigorú feltételeket betartva lehet őket tárolni és alkalmazni.

A „zöld” oldatok készítése kapcsán az oldószer kiválasztásánál is törekednek olyan anyagot találni, ami a lehető legkevésbé károsítja az emberi szervezetet és annak környezetét. Egy kutatás során komplex vizsgálatok alapján a metanolt és az etanolt ítélték a célnak legmegfelelőbbnek. [45]

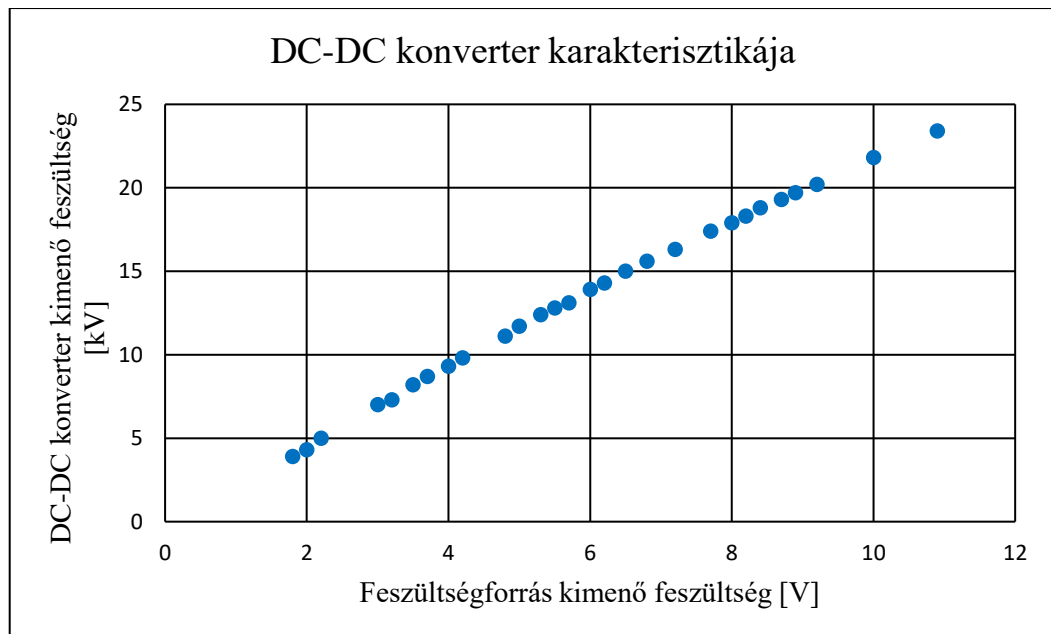
Az általam használt oldathoz poliamid-6 anyagot választottam a sokoldalúsága, valamint maszk készítéséhez kedvező anyagtulajdonságai miatt. Magas mechanikai- és ütőszilárdsága mellett ellenálló a legtöbb olajjal, zsírral szemben, valamint beszerzése is viszonylag egyszerű granulátum formában. [46]

Oldószerként 85%-os hangyasavat alkalmaztam, aminek már a párolgó gőze is kifejezetten káros a szerves anyagokra nézve, így elengedhetetlen volt a megfelelő védőruházat viselése a mérések alatt.

Különböző szakirodalmak szálszerkezet vizsgálatai alapján $13 \frac{m}{m}$ %-os oldattal dolgoztam [47], amit kifejezetten ennek tárolására alkalmas üvegben készítettem el, ami gátolja a sav párolgását, kialakítása pedig elősegíti az oldódást. A polimer a savval érintkezve szinte egyből reagál, azonban a homogén oldat eléréséhez több óra, nap is szükséges lehet attól függően, hogy milyenek az anyag tulajdonságai, valamint, hogy külső hatások elősegítik-e a folyamatot. Az oldódási idő csökkentése érdekében az üveget egy berendezésbe helyeztem, ami folyamatos rázással segíti elő a homogenitást.

7.2 Alkalmazott feszültség

Az elkészült berendezés használata előtt annak érdekében, hogy az alkalmazott feszültség értéke ismert legyen és megfelelően tudjam szabályozni mérés közben, kimértem a DC-DC konverter karakterisztikáját, ami a 11. ábra diagramján látható.



11. ábra: DC-DC konverter kimért karakterisztikája

A mérések során az alkalmazott feszültség szemmel láthatóan befolyással volt az eredményre. Alacsony feszültség szinten a villamos térerősség még nem rendelkezik elegendő energiával ahhoz, hogy Taylor-kúpot képezve elindulhasson a szálképzés, csupán az apró koronakisülések hallhatóak az oldat felszínén.

Túl nagy feszültség alkalmazása esetén azonban az oldat nem egyenletesen képez szálakat, hanem a térerősség inhomogenitása miatt a szükségesnél nagyobb oldat cseppeket szór a gyűjtőre. Ezek a csepp hibák láthatóak a 12. ábra mikroszkópos felvételein.



12. ábra: Feszültség hatására keletkezett hibák a rétegben

Az általunk alkalmazott mikroszkóp nagyítása nem teszi lehetővé, hogy a nanoszálak szerkezetét és átmérőjét elemezni tudjam, azonban a feszültség hatása, valamint a szálképzett réteg folytonossága kiválóan megfigyelhető vele. A 12. ábra felső képén a hibák tisztán kivehetőek az anyagon, foltként jelennek meg a nanoszálás egybefüggő rétegben, míg az alsó képén ugyanaz a terület látható kiegészülve egy milliméter skálával, amelyen egy lépték egy millimétert jelöl, így a hibák méretei pontosan beazonosíthatóak.

7.3 Elektródtávolság

Az elektródtávolság több ponton is befolyásolja a folyamatot, azonban a leglátványosabb hatása az, hogy a távolság növelésével bizonyos mértékig nő a szálakkal fedett terület is a gyűjtőn. Mivel tudjuk, hogy az elhajlási instabilitás szakaszában a szálak spirálisan szóródnak, így belátható az is, hogy ha a szálút megnő, akkor ez a szakasza tovább nyúlik, aminek következtében a szóródás nagyobb felületen lesz tapasztalható, ahogy a 13. ábra is szemlélteti.

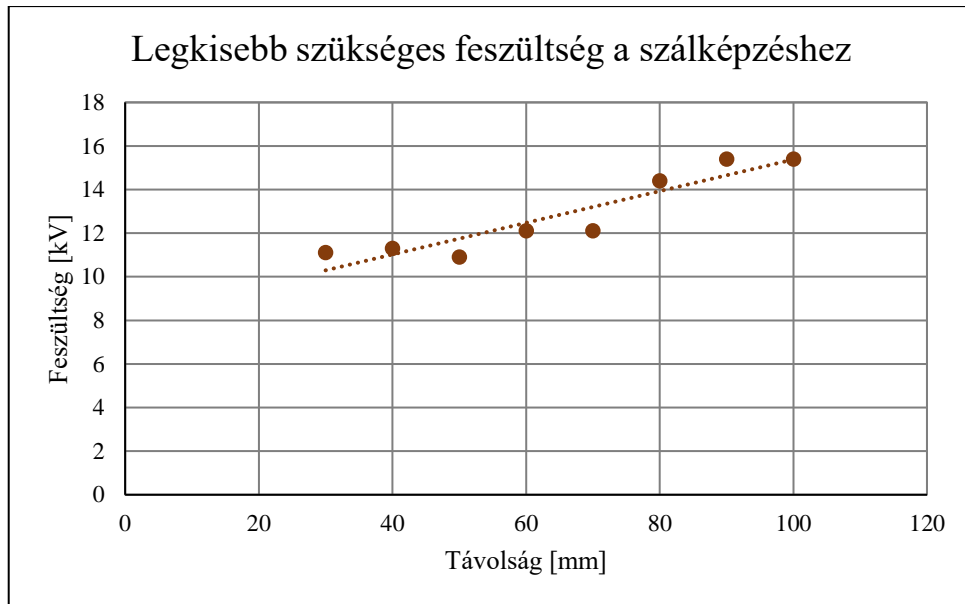


13. ábra: Szálak által lefedett terület különböző elektródtávolságok esetében

Az úthossz azonban a szórt területen kívül a szálak szerkezetét is befolyásolja, hiszen a sav párolgása és az átmérő csökkenése is ez idő alatt történik meg. Ha a szálak úthossza nem elegendő, akkor a gyűjtőre érkező anyag még nagy arányban tartalmaz savat, ami a gyűjtőre érkezés után elpárologva a szálak deformációját okozza. Túlnyújtott úthossz esetén viszont az elektródok között olyan mértékűre csökken a térerősség, hogy kevesebb szál képes kiszakadni az oldat felszínéből. Ebben az esetben a gyűjtőn alig, vagy egyáltalán nem látszik eredmény, ugyanis a kiinduló szálak mértéke csökken, ráadásul gyakran el sem érnek a gyűjtőig, már útjuk során eltérülnek a gyenge tér miatt. [48] Az adott elektródtávolság hatása azonban függ az alkalmazott feszültség szintjétől is, ezek kapcsolatának vizsgálatával foglalkoztam a továbbiakban.

7.3.1 Az elektródtávolság, feszültség és térerősség közötti kapcsolat vizsgálata

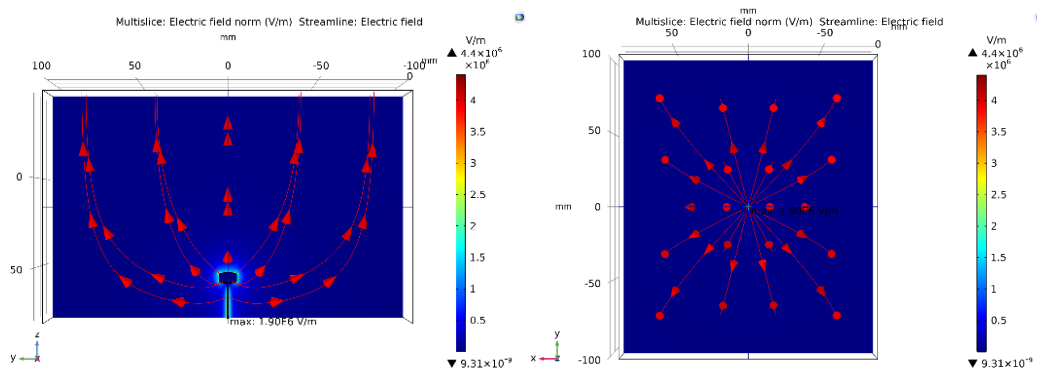
A vizsgálat során egy tüelektródot használtam, a távolságot pedig 30 és 100 milliméter között változtattam és figyeltem meg ennek befolyásoló hatását a feszültség függvényében. Tíz milliméterenként növeltem a távolságot, majd minden beállításnál addig emeltem a feszültségszintet, amíg el nem indult a szálképződés. Ezt a feszültség értéket ábrázoltam a 14. ábra diagramján a távolság függvényében. [49]



14. ábra: A szálképzéshez szükséges feszültség a távolság függvényében

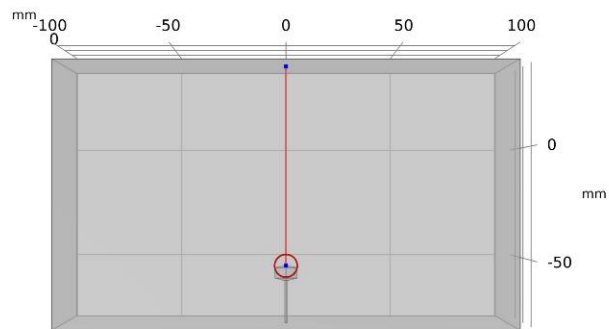
Az eredmények alapján elmondható, hogy a távolság növelésével nő a legkisebb szükséges feszültség értéke. Mivel tudjuk, hogy a szálképzés az oldat felszínén megnövekedett térerősség hatására indul el a, ezért a térerősség és távolság kapcsolatának vizsgálatára, valamint a tapasztalati eredmények alátámasztására COMSOL Multiphysics program segítségével modelleztem az elrendezést.

A programban minden eset számításánál 12kV egyenfeszültséggel tápláltam a tüelettrodát. A 15. ábra színskálája a villamos térerősség eloszlását szemlélteti, ami az elektrodától távolodva drasztikusan lecsökken, míg a piros vektorok az áramlásának irányát jelölik, ami elől- és felülnézetből is láthatóan szimmetrikus formát vesz fel. A szimulációban a térerősség a tüelettrod alján maximális, azonban ennek értéke a tívégeken is közel azonos a kialakuló Taylor-kúpnek köszönhetően.

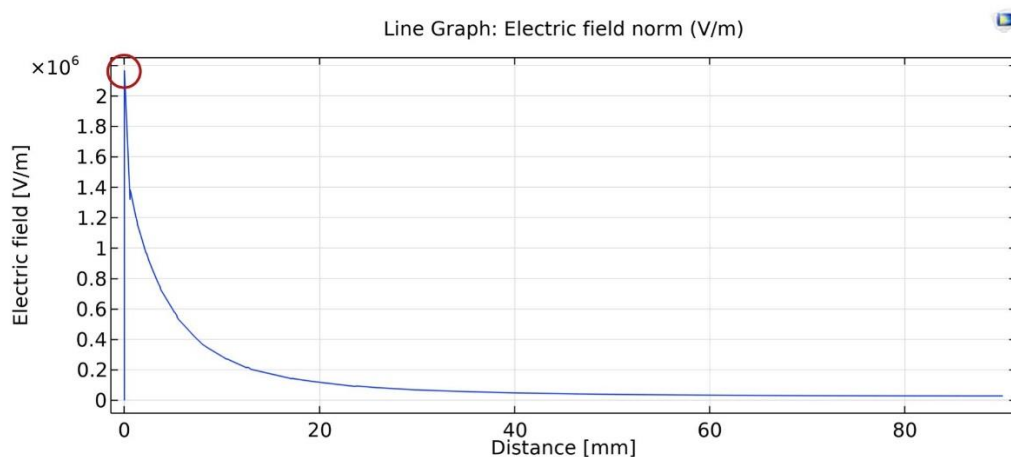


15. ábra: COMSOL modell a villamos térerősség eloszlásáról és áramvonalairól

A térerősség csökkenését diagramon ábrázoltam a Taylor-kúptól egészen a gyűjtőig, ezt szemlélteti a 16. ábra, ami a vizsgált pontokat jelöli, illetve a 17. ábra, ami ezeknek a vizsgált pontoknak a térerősségét ábrázolja.



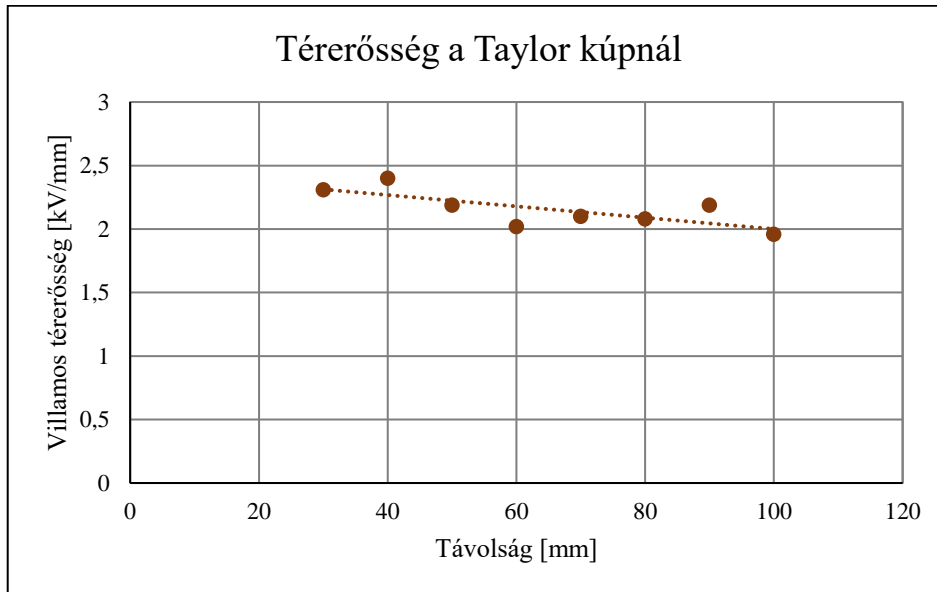
16. ábra: Villamos térerősség szempontjából vizsgált pontok



17. ábra: A villamos térerősség csökkenése a vizsgált szakaszon

Megfigyelhető, hogy a görbe kezdeti értéke egy csúcsérték, ami a Taylor-kúpnál mérhető, itt jelenik meg a vizsgált szakaszban a legnagyobb térerősség, illetve ez az érték

játszik szerepet a szálképzésben is. A programban ezt az értéket megkeresve minden távolsági beállítás esetén, a 18. ábra diagramján látható módon ábrázolható a villamos térerősség távolságtól való függése.



18. ábra: Villamos térerősség maximális értéke a vizsgált távolságok esetében

Az elkészített modell jól prezentálja, hogy a villamos térerősség a távolság növelésével csökken, ezzel alátámasztva a mérési eredményt, valamint azt, hogy a feszültség és a villamos térerősség között egyenesen arányos kapcsolat áll fenn.

7.4 Környezeti hatások

Aszálképzési folyamatra számos jelentős környezeti tényezőtől függ.

A hőmérséklet több ponton is érezteti hatását, ugyanis amellet, hogy magas hőmérséklet esetén nő az oldat viszkozitása, a benne levő sav párolgásának intenzitása is megnő, ezáltal az anyag sokkal nehezebben kezelhetővé válik, ami a képzett szálak minőségén is meglátszódhat. Egy-egy mérés alkalmával ez a változás kevésbé szembetűnő, azonban több, különböző alkalommal kapott eredmények összehasonlításából már látszódhat az eltérés. [50]

A levegő páratartalma a képződő szálakra van hatással, azonban ennek mértéke függ a használt polimer molekuláris felépítésétől. Alacsony páratartalom esetén az oldat gyorsabban párolog, ami negatívan befolyásolja az eredményt, magas relatív páratartalom esetében viszont a szálak felülete simább lesz, valamint átmérője is csökken. [51]

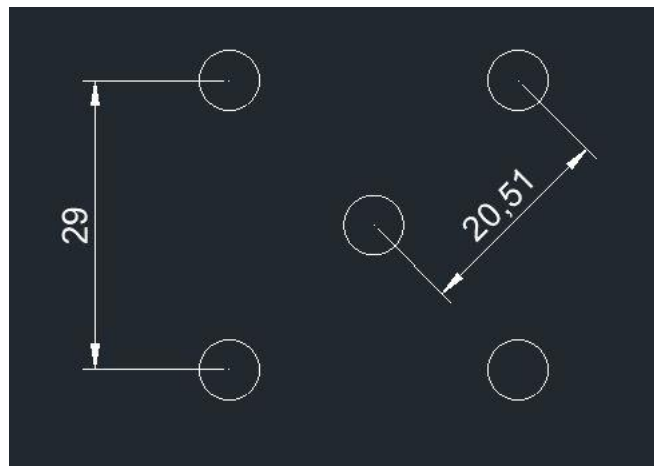
A légmozgás a szálak útját befolyásolja, gyenge légáramlat is könnyedén befolyásolja a szálképződést, így célszerű zárt térben vagy berendezésben végezni a méréseket.

7.5 Elektródelrendezés

A mérések során több tüelrendezést vizsgáltam, melynek célja az, hogy megtaláljam az optimális beállítást, amivel olyan egybefüggő réteg hozható létre, amit szövetre applikálva maszk szűrő rétegként lehet alkalmazni.

7.5.1 Öt tűs elrendezés vizsgálata

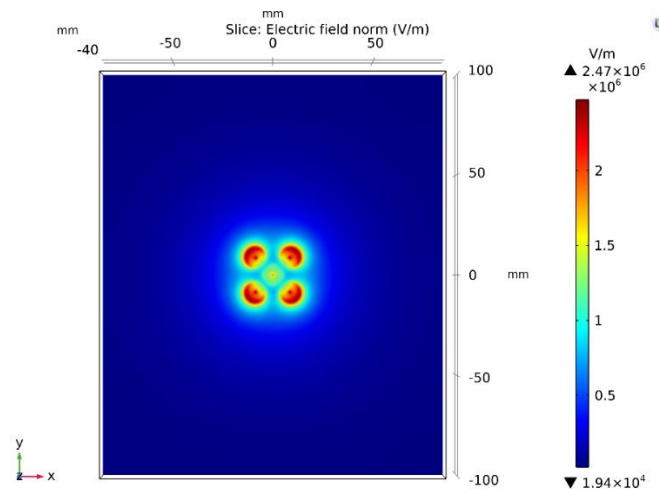
Öt tűs modell esetén a tüelektródokat dobókocka szerűen helyeztem el, négy szélső és egy középső elrendezésben, ahogy a 19. ábra is szemlélteti, melyen az értékek milliméterben értendők.



19. ábra: Öt modell tüelektródjainak pozíciója

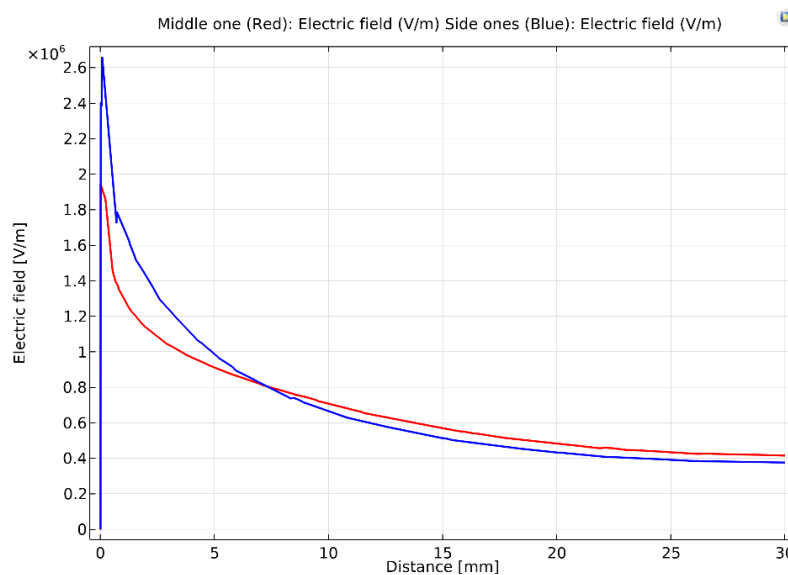
A mérés során azt a legkisebb szükséges feszültség értéket kerestem, ahol a szálképzés elindul 30 milliméteres elektródtávolság mellett. A feszültség egyenletes felszabályozásának hatására az első elektród 12,3 kV-nál lépett működésbe, majd közvetlen utána a második elektród felszínéről is elindult a szálképződés. 14,4 kV-nál a harmadik és negyedik elektród is aktiválódott, azonban az utolsó tű csak 20 kV-nál kezdett el működni. Az ötödik elektród, amelyiknek a legnagyobb feszültség igénye volt, középen helyezkedett el. A mérés végén az elkészült mintát megvizsgálva arra lettem figyelmes, hogy míg a négy szélső elektród egyenesen, függőleges szórta a szálakat, addig a középső tűről érkezők oldal irányban érkeztek az elektródra, nem középen képzett réteget. A tapaszt jelenségekre ismét a COMSOL program segítségével kerestem a

választ. A modellt 12 kV feszültséggel táplálva az elektródok közötti térerősség különbségét a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra: Elektródok közötti térerősség különbség felülnézetből

A szélső négy tű térerőssége szimmetrikus, értékük azonos, azonban a középső elektród felszínén megjelenő maximális térerősség ezekhez képest láthatóan kisebb. Az 21. ábra az eltérés mértékét prezentálja.



21. ábra: Szélső és középső elektródok vonalában mérhető térerősség a Taylor-kúptól a gyűjtőig

A vizsgált pontok a Taylor-kúptól a gyűjtőig tartanak mindkét esetben. A kék görbe a szélsők, míg a piros görbe a középső tű vonalában mérhető térerősség csökkenését ábrázolja. A szálak eltérülésének okára a modell nem ad magyarázatot, ugyanis ideális beállítás esetén a térerősség szimmetrikus, így a jelenség valószínűleg a valós mérés

pontatlanságai miatt következett be, mint például a nem teljesen vízszintes tüelektród beállítás.

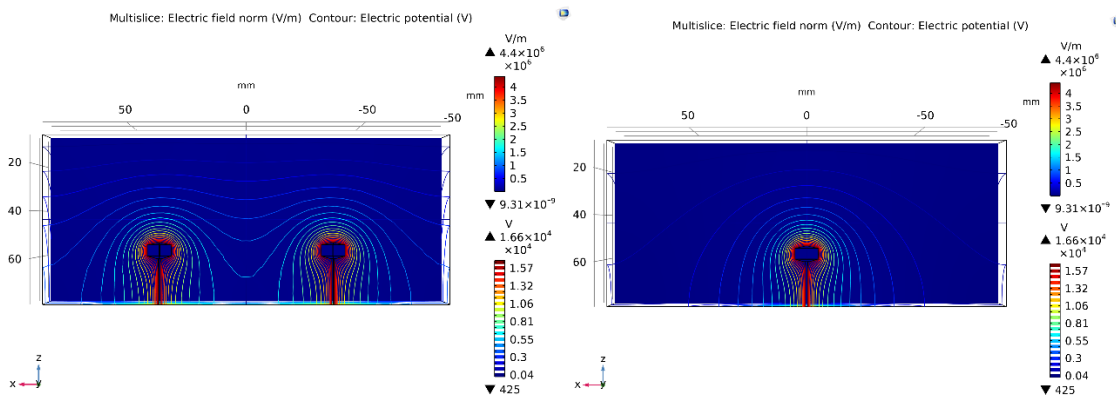
Az elrendezés a célnak nem felel meg, a tüelektródok távolságukból adódóan zavarják egymás terét, így a szálképzés sem egyenletes a működés során.

Lehetséges megoldás, hogy a tüelektródokat egymástól távolabb helyezem el, ugyanis ahogy a modell is prezentálja, a térerősség értéke a távolság függvényében drasztikusan lecsökken, így van olyan távolság, ahol a tűk már elhanyagolható mértékben torzítják egymás erőterét.

7.5.2 Két tűs elrendezés vizsgálata

A két tűs modell kialakítása során figyelembe vettem az öt tűs esetben tapasztalt tértorzulást, így a két elektród közötti távolságot 72,5 milliméterre növeltem. COMSOL modell segítségével vizsgáltam meg a térerősség eloszlását, valamint azt, hogy érdemes-e két tűs megoldást alkalmazni egy helyett.

A modell alapján az elektródok nem befolyásolják jelentősen egymás működését, ezt szemléltetik a 22. ábra egyenlő potenciált jelölő kontúr vonalai.



22. ábra: Egy és két tűs modell térerősség eloszlása

Ha a lefedett terület alapján hasonlítjuk össze az elrendezéseket, akkor a két tűt alkalmazó módszer hatékonyabbnak tűnik, viszont a szálképzés minősége is elengedhetetlen szempont, amit a Taylor-kúpnál mérhető maximális térerősség befolyásol. Ennek értékeit tartalmazza az 1. táblázat.

1. táblázat: Egy és két tűs modell maximális villamos térerőssége

Elrendezés	Villamos térerősség a Taylor-kúpnál [kV/mm]
Egy tűs modell	3,72
Két tűs modell	3,37

Az adatok alapján belátható, hogy két tű alkalmazása esetén adott feszültségnél alacsonyabb a térerősség értéke, aminek következtében a megfelelő működéshez nagyobb feszültségre lesz szükség.

Hatékonyság szempontjából összevetve az eredményeket, a két elektródos elrendezés esetében mérhető térerősség csökkenés mértéke kevesebb, mint tíz százalék, viszont a lefedett terület nagyobb arányban nő, így megéri a több tűs elrendezést alkalmazni.

8 Maszk szűrőrétegének készítése

A megfelelő paraméterek megtalálása után a következő lépés a nanoszálás szűrőréteggel rendelkező maszkok létrehozása és annak vizsgálata volt. Az elkészült mérő berendezéssel mintákat készítettem, amiket szűrés és kopás szempontjából elemeztem.

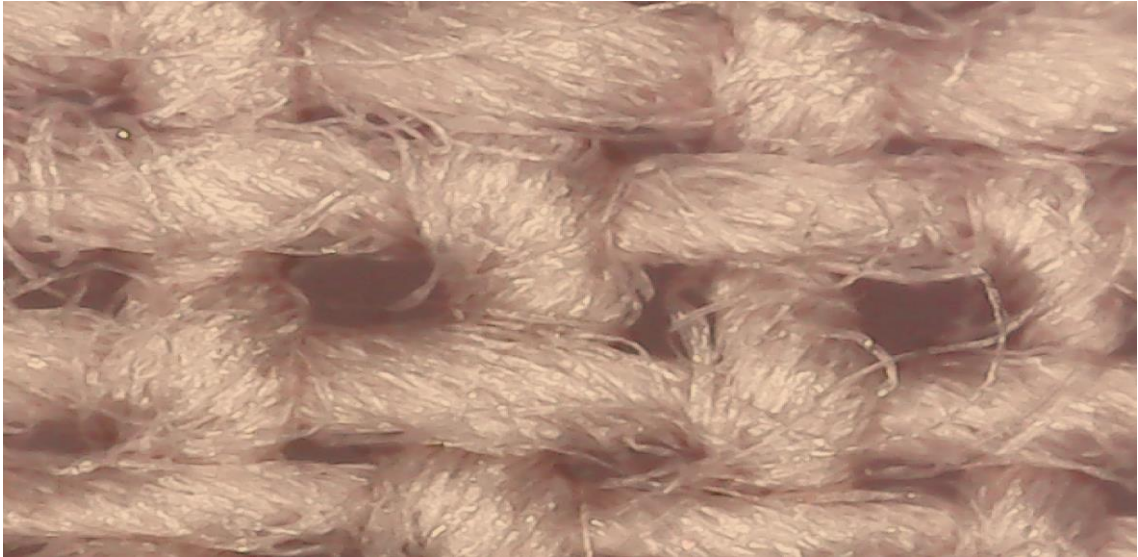
8.1 Anyagra képzett réteg

Textil anyagból törekedtem olyat alkalmazni, amit az elmúlt években gyakran használtak maszkokhoz varrásához. A választásom a 100% pamutból készült kartonra esett, ami közepes finomságú fonalakból, vászonkötéssel készült [52]. Az anyagot a gyűjtő lemez köré rögzítve helyeztem el a berendezésben, ezt szemlélteti a 23. ábra.



23. ábra: A gyűjtőre rögzített textilanyag a szálképző berendezésben

A kialakuló réteg egyenletességét mikroszkóppal ellenőriztem. Az 24. ábra a textil szálszerkezetét szemlélteti, míg alatta az 25. ábra ugyan ezt az anyag mutatja nanoszálakkal fedve.



24. ábra: A mérések során alkalmazott textil szálszerkezete



25. ábra: A mérések során alkalmazott textil szálképzett réteggel fedve

8.2 Minták készítése során alkalmazott paraméterek

A pontos szűrőhatékonyság kimérése érdekében több típusú mintát készítettem, amelyeket két ponton vizsgáltam. A folyamat során két, egymástól 72,5 milliméterre elhelyezett tüelektóddal és 55 milliméteres elektródtávolsággal dolgoztam, az elrendezést pedig 16-18 kV közötti DC feszültséggel tápláltam. A minták között csupán a működési időben van eltérés, mégpedig az alábbiak szerint:

- 60 másodpercen át képzett,
- 90 másodpercen át képzett,

- 120 másodpercen át képzett,
- 150 másodpercen át képzett,
- Kb. 10 percen át képzett.

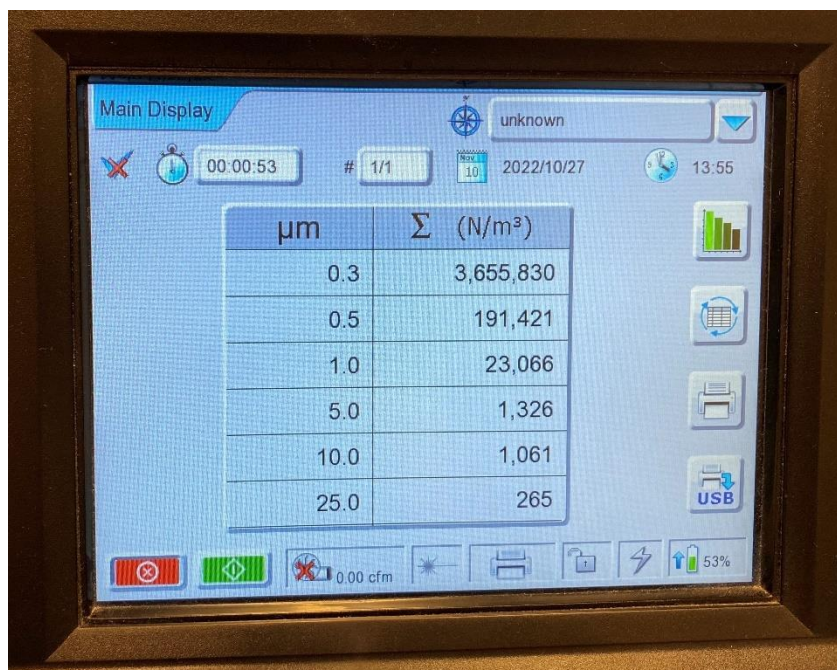
Az elkészült mintákat a 26. ábra mutatja.



26. ábra: A szűrési hatékonyság vizsgálatára készített minták

8.3 Szűrési hatékonyság laboratóriumi vizsgálata

A szűrési hatékonyság vizsgálatát az Elektronikai Technológia Tanszéken (ETT) végeztem egy Laser III 310C gép segítségével, ami kifejezetten maszkok szűrőképességének vizsgálatára lett kialakítva. A lézeres elven működő berendezés az adott helyiség $1m^3$ -ben lévő részecskéket számlálja méretek szerint $0,3$ és $25 \mu m$ között, ennek folyamatát mutatja a 27. ábra. A légcsatornába egy szűrő réteget behelyezve szintén megkapjuk azon részecskék számát, amik a szűrőn keresztül eljutnak a berendezés érzékelőjéhez. Az összes részecske számát összehasonlítva ezzel az értékkel, kiszámítható az anyag részecskeszámra vett szűrőképessége, valamint a szűrt tömegszázalék, ami az FFP besorolás kapcsán mérhető. Minden mérés egy percig tart, ez idő alatt az anyag légáteresztő képessége is meghatározásra kerül, ami, ha nem éri el az emberi légzéshez szükséges tömegáramot, akkor a minta nem alkalmas maszk készítésére.



27. ábra: Laser III 310C gép mérés közben

8.4 Szűrési hatékonyság vizsgálatának eredményei

A vizsgálat során a 10 percen át képzett anyag nem engedte át a szükséges légtömeget, így nem mérhető a szűrési hatékonysága sem. A 60, 90, 120 és 150 másodpercig képzett minták viszont megfeleltek, így légzési szempontból biztonságosan alkalmazhatóak arcmaszkként.

A szűrési hatékonyság vizsgálatát minden alkalommal a helyiség (ambiens) részecskeszám mérésével kezdtem, ami után a minta behelyezése következett. A két mérés ideje alatt a helyiségben nem történt légcseré, így a jelen lévő részecskeszám sem változott. A 2. táblázat egy ambiens és egy vizsgált minta eredményeit tartalmazza.

2. táblázat: Egy ambiens eredmény és a mintán átjutó részecskék száma méretek szerint

Részecskeméret [μm]	Ambiens részecskeszám [$\Delta \frac{N}{\text{m}^3}$]	Szűrő részecskeszám [$\Delta \frac{N}{\text{m}^3}$]
0,3	44 665 536	19 835 786
0,5	4 028 031	1 020 527
1	484 787	133 940
5	28 506	5 473
10	10 844	2 366
25	1 130	212

A részecskeméretekre számított szűrési hatékonyság százalékos értékét a fenti adatokból az (1) összefüggés segítségével számítottam ki. Az eredményeket a 3. táblázat tartalmazza.

$$\eta_{\text{szűrő}} = 1 - \left(\frac{N_{\text{ambiens}}}{N_{\text{szűrő}}} \right) \cdot 100$$

(1)

Ahol

$\eta_{\text{szűrő}}$ - szűrt részecskeszám szerinti hatékonyság [%]

N_{ambiens} - ambiens részecskeszám [$\Delta \frac{N}{\text{m}^3}$]

$N_{\text{szűrő}}$ - szűrőn keresztül jutott részecskeszám [$\Delta \frac{N}{\text{m}^3}$]

3. táblázat: Részecskeméretekre számított szűrési hatékonyság

Részecskeméret [μm]	Szűrési hatékonyság
0,3	55,59%
0,5	74,66%
1	72,37%
5	80,80%
10	78,18%
25	81,24%

8.4.1 Szűrt részecskeszám szerinti hatékonyság

Az egyes méretekre jellemző szűrési hatékonyságot átlagolva megkaptam az adott minta által kiszűrt részecskeszám százalékos értékét, ami a 3. táblázat adatai alapján 73,81%. A mintákat ezen módszerrel kiértékelve a kapott eredményeket 4. táblázat prezentálja.

4. táblázat: Minták szűrt részecskeszám szerinti hatékonysága

Minta sorszáma	Szálképzés ideje [mp]	Alkalmazott feszültség [kV]	Szűrt részecskeszám
E/a (etalon, sima anyag)	-	-	53,07%
E/b (etalon, sima anyag)	-	-	37,16%
1/a	60	17	59,43%
1/b	60	17	61,92%
2/a	60	18	59,57%
2/b	60	18	52,30%
3/a	90	19	73,81%
3/b	90	19	78,66%
4/a	120	17	80,57%
4/b	120	17	63,94%
5/a	120	18	60,86%
5/b	120	18	79,58%
6/a	150	17	71,98%
6/b	150	17	57,73%

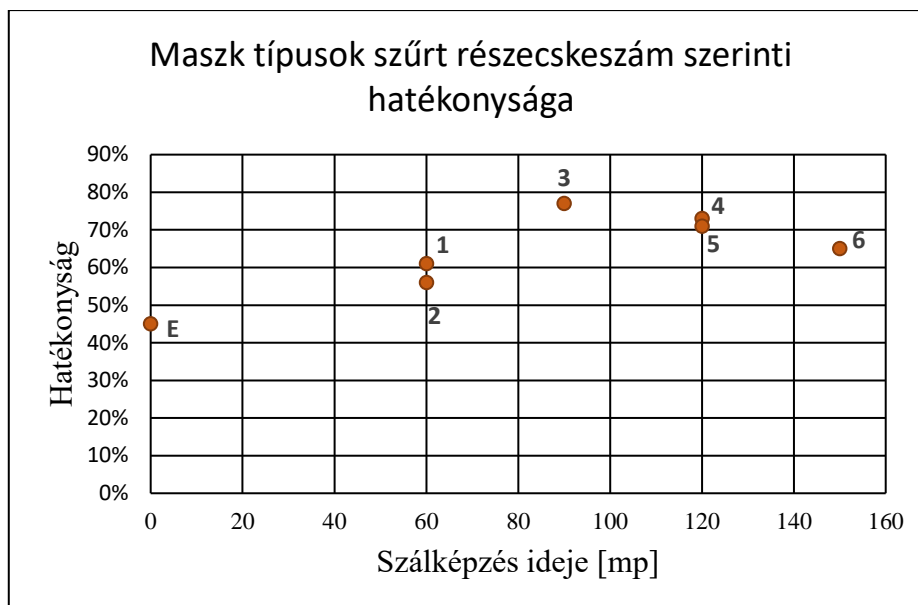
Az eredmények alapján megfigyelhető, hogy azonos paraméterekkel készült minták esetében is tapasztalható eltérés, melynek oka az, hogy a szálképzés sosem egzakt, két különböző ponton vizsgálva egyazon réteget, sosem kapjuk ugyan azt az eredményt, ebből adódóan a megismételhetőség esélye is csekély. Azonban, hogy ennek ellenére is képet kaphassunk az egyes típusok megközelítőleges hatékonyságáról, a két ponton mért eredményeket átlagoltam, így az 5. táblázat eredményei adódtak.

5. táblázat: Minta típusok szűrt részecskeszám szerinti hatékonysága

Típus sorszáma	Szűrés hatékonysága
E	45,12%
1	60,68%
2	55,94%
3	76,24%
4	72,26%
5	70,22%
6	64,86%

Az etalon, azaz a textilanyag szűrőképessége önmagában 45,12%, ehhez képes minden esetben nőtt a hatékonyság. Az 1-2, valamint 4-5 minták egymással összehasonlítva csak az alkalmazott feszültségben térnek el, viszont mindkét esetben tapasztalható, hogy a feszültség növelésének hatására a szűrőképességük minimálisan csökkent.

Az eredményeket diagramon ábrázolva a 28. ábra alapján további észrevételeket figyelhetünk meg. Mivel a feszültség értéke elhanyagolható mértékben befolyásolja az eredményeket, így a szűrőhatékonyságot a szálképzés idejének függvényében ábrázoltam.



28. ábra: Szűrt részecskeszám szerinti hatékonyság a szálképzés idejének függvényében

A diagram alapján megfigyelhető, hogy a hármas minta szűrőképessége a szálképzési időhöz képest kimagaslóan jó, míg a hatos minta esetében az elkészítés ideje 150 mp-volt, amit a hatékonyság értéke nem prezentál.

Összességében az eredmények szemléltetik mind a befolyásoló tényezők hatását, mind pedig az elektrospinning technológia működésének bizonytalanságát. A vizsgálat során kapott eredmények alapján 90 másodperces szálképzési idővel és 19 kV egyenfeszültség alkalmazásával tudtam a leghatékonyabb szűrőképességet elérni, aminek értéke 76,24%, azonban a minta bizonyos részein akár a 79% körüli érték is mérhető volt.

8.4.2 Szűrt tömegszázalék szerinti hatékonyság (FFP besorolás)

Az FFP maszkok szűrési hatékonyságát nem a szűrt részecskeszám alapján mérik, hanem az $0,6 \mu\text{m}$ és annál kisebb részecskék szűrt tömegszázaléka alapján. Az FFP1-es maszk hatékonysága 80%, az FFP2-é 94-95%, míg az FFP3 besorolású arcmaszkok szűrési képessége 99%. [53]

A kiértékelés célja, hogy megtudjam, az általam készített minták besorolhatóak-e ezen kategóriák egyikébe. Az adatok kiértékelte eredményeit az ETT mérésben segédkező munkatársaitól kézhez kaptam, ennek számítási módját részletezem. A 2. táblázat adatai alapján dolgoztam, azonban mivel az FFP besorolás szerinti $0,6 \mu\text{m}$ részecskeméretre nincs a berendezésbe programozva, így az $1 \mu\text{m}$ -nél kisebb részecskéket vettem figyelembe, ebből következően a táblázat első három sorának értékeivel számolok. A

szűrt tömegszázalék meghatározásához szükség van a részecskék össztérfogatára, ami a (2) képlet segítségével számítható. Ennek eredményeit a 6. táblázat tartalmazza.

$$C = N \cdot d^3 \quad (2)$$

Ahol

C - részecskék össztérfogata [μm^3]

C_0 - ambiens részecskék össztérfogata [μm^3]

C_{sz} - szűrőn átjutott részecskék össztérfogata [μm^3]

N - részecskék száma [db]

d - részecske mérete [μm]

6. táblázat: Ambiens és mintán átjutott részecskék össztérfogata

d [μm]	C_0 [μm^3]	C_{sz} [μm^3]
0,3	1 205 969,47	535 566,22
0,5	503 504,88	127 566,88
1	484 787,00	133 940,00
Szumma	2 194 260,35	797 072,10

A kapott eredményekből a (3) összefüggés alkalmazásával már kiszámítható a szűrt tömegszázalék.

$$\text{szűrt tömeg\%} = 1 - \left(\frac{C_{sz}}{C_0} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

A használt példa esetében ennek értéke 63,67%. Az összes mintára vonatkozóan az eredményeket a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat: Minták szűrt tömegszázalék szerinti hatékonysága

Minta sorszáma	Szálképzés ideje [mp]	Alkalmazott feszültség [kV]	Szűrt tömegszázalék
E/a (etalon, sima anyag)	-	-	19,21%
E/b (etalon, sima anyag)	-	-	24,77%
1/a	60	17	43,29%
1/b	60	17	45,09%
2/a	60	18	45,18%
2/b	60	18	44,73%
3/a	90	19	63,67%
3/b	90	19	74,05%
4/a	120	17	86,87%
4/b	120	17	74,23%
5/a	120	18	50,46%
5/b	120	18	87,64%
6/a	150	17	77,30%
6/b	150	17	55,37%

A kapott értékek közül két minta érte el a kívánt 80%-os szűrési képességet, így ezek megfelelnek az FFP1-es maszkok ezen követelményének. A képzési idő mindkét esetben 120 másodperc, az alkalmazott feszültség pedig az egyik esetben 17, a másikban 18 kV volt.

A 4. táblázat eredményeivel összehasonlítva, jelentős eltérést tapasztalunk, ami leginkább annak köszönhető, hogy az utóbbi esetben nem vettük figyelembe a nagyobb részecskék számát. Ebből következik az is, hogy az etalon minták hatékonysága drasztikusan csökkent, ugyanis az előző példában a nagy méretű szűrt részecskék aránya emelte meg az átlagos szűrőképesség százalékos értékét.

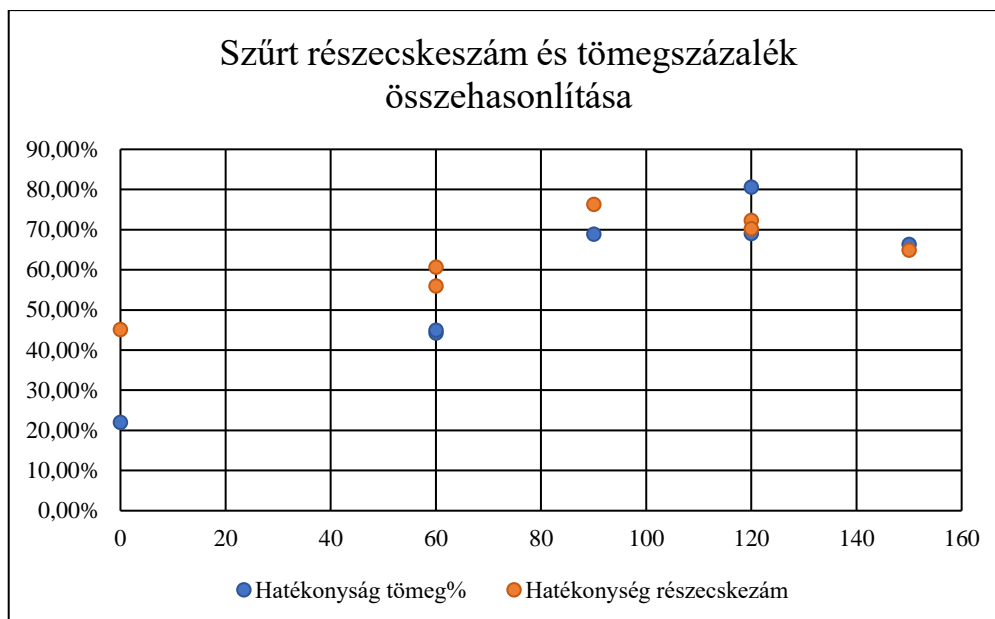
Az előző példához hasonlóan a mintákat típusok szerint átlagoltam, aminek eredményei a 8. táblázat mutatja.

8. táblázat: Minta típusok szűrt tömegszázalék szerinti hatékonysága

Típus sorszáma	Szűrt tömegszázalék
E	21,99%
1	44,19%
2	44,96%
3	68,86%
4	80,55%
5	69,05%
6	66,34%

Az azonos minták átlagolása után egy típus állta meg a helyét és érte el az FFP1-es maszk szűrési hatékonyságát, a 4-es, ami 120 másodperces működési idővel és 17 kV egyenfeszültség alkalmazásával készült. A 60 másodpercig készült minták esetében a feszültség változása nem okozott eltérést a szűrési hatékonyságban, míg a 120 másodperces típusok esetében több, mint tíz százalékos eltérést tapasztaltunk. Ez az eredmény újból igazolja a technológia bizonytalanságát, ugyanis nem állapítható meg teljes bizonyossággal, hogy a közel azonos paraméterekkel, egy helyen és egy időben készült minták közötti eltérés minek hatására alakulhatott ki.

A két mérés eredményeit a 29. ábra diagramján ábrázoltam, ami alapján látható, hogy a tömegszázalékos értékek az esetek többségében alacsonyabbak, mint a szűrt részecskék arányából számított eredmények, ami a várt értékeknek megfelel, ugyanis csak kis méretű részecskéket vizsgálva az átlag szűrőképesség nagy eséllyel csökken. A legnagyobb különbség az etalon esetében tapasztalható, melynek tömegszázalékos értéke az első esethez képest több, mint 50%-kal romlott.



29. ábra: Szűrt részecskeszám és tömegszázalék a szálképzés idejének függvényében

Összességében, a két kiértékelési módszer alapján maszk készítéséhez a legideálisabb beállítás a 90 valamint a 120 másodperces működés 17 és 19 kV közötti alkalmazott feszültséggel, azonban ezek közül is kimagasló a négyes típusú minta, ami eléri az FFP1-es, azaz 80%-os szűrési hatékonyságot.

8.5 Szűrőréteg tartósságának vizsgálata használat esetén

A technológia maszkok gyártásához történő alkalmazásához elengedhetetlen annak vizsgálata is, hogy a textilre képzett szűrőréteg mennyire tartós és milyen mechanikai terheléseket képes elviselni.

A mérések során többféle módját is tapasztaltam a nanoszálal réteg degradációjának. A szabadfelszíni rétegen bármilyen mechanikai behatás könnyedén sérülést okoz, erre a 30. ábra egy példát szemléltet.



30. ábra: Mechanikai sérülés a szálképzett anyagon

Ennek bekövetkezése azonban kiküszöbölhető, ha a szálás szűrő két textil réteg közé kerül. Arcmaszk formában viszont ezen túl is érhetik behatások az anyagot, akár viselés közben, akár a gyűrődés következtében. Ebben a fejezetben ennek vizsgálatát tűztem ki célul és készítettem maszkot, amin ezeket a hatásokat figyeltem meg.

8.5.1 Kezelés nélküli réteg tartósságának vizsgálata

Első alkalommal egy viszonylag vastag, nagy kiterjedésű réteget képeztem az anyagra, majd a szálképzett részt lefedtem egy textil réteggel, ebből készítettem maszkot, aminek formáját a 31. ábra mutatja.



31. ábra: Szálképzéssel készült szűrőréteget tartalmazó maszk

Az elkészített maszkot két napon át tartottam magamnál, ami alatt öt órán át hordtam, a maradék időben pedig olyan mechanikai terheléseknek vettem alá, ami egy átlagos maszkot is ér használata során (gyűrődés, dörzsölődés). Az idő leteltével szétbontottam és megvizsgáltam a szűrőréteg állapotát, amit a 32. ábra mutat.



32. ábra: A szálképzett réteg állapota két napi használat után

Több hibát is észre lehet venni az anyagon, leginkább a széleken, valamint a hajtások éleinél. Amire viszont nem számítottam, hogy a szűrőréteg szinte teljesen egybefüggően levált az anyagról, így hosszú távon nem tud maszkként funkcionálni. Ez alapján az általam készített maszk nem felelt meg az elvárásoknak, megoldást kellett találnom a sérülések, valamint az anyag leválásának kiküszöbölésére is.

8.5.2 Kezelt réteg tartósságának vizsgálata

A második vizsgálat során a szűrési hatékonyság eredményei alapján a textilre 90 másodpercig képeztem réteget, 17 kV egyenfeszültség alkalmazásával. A tartósság növelése érdekében a poliamid olvadáspontja alatt, 200 Celsius fokon megvasaltam az textilre képzett szűrőréteget. A maszk elkészítésének és vizsgálatának módja nem változott, a hordás után ebben az esetben is megvizsgáltam az anyag állapotát.

Ami szembetűnő különbség volt, hogy a vékonyabb réteg már nem vált le az anyagról, így a mechanikai befolyásokat is jobban bírta. A hajtott éleknél sem szemmel, sem mikroszkóppal nem vehető észre kopás vagy sérülés, azonban ennek bizonyosságára további vizsgálatok, esetleg elektronmikroszkóppal készített felvételek adnának pontos válaszokat.

Összességében a maszkok elkészíthetőek a technológia alkalmazásával, tartóssága egyszerű mérésekkel és szemrevételezéssel ellenőrizhető, valamint a paraméterek módosításával javítható. További mérések elvégzésével a technológia tökéletesíthető és maszkként kiválóan alkalmazható lehet.

9 Összefoglalás

Kutatásom során sikeresen terveztem meg és hoztam létre egy egycseppes kialakításon alapuló elektrosztatikus szálképző berendezést, amelyen részletesen vizsgáltam a működést befolyásoló paraméterek közül az oldat tulajdonságait, az alkalmazott feszültség és az elektródtávolság hatását, valamint megállapítottam az elektródtávolság, a feszültség és térerősség közötti kapcsolatot. Az egy tűs elrendezés mellett teszteltem és modelleztem az öt, és két elektródos megoldásokat, melyek közül az öt tűs elrendezés kis egymáshoz képesti távolsággal nem felelt meg, viszont két elektródot alkalmazva 72,5 milliméter távolságra egymástól, a szálképzés folyamata felgyorsíthatóvá vált.

Textil arcmaszkok alapanyagaként használt pamut kartonra képeztem különböző vastagságú nanoszálalás rétegeket, melyeknek szűrési hatékonyságát kifejezetten maszkok szűrőképeségét mérő berendezésen mértem. A vastagon képzett rétegek legáteresztése alacsony, így arcmaszok készítéséhez nem felel meg, viszont a 60, 90, 120 és 150 másodperces működési idővel készült mintákon átjutó légtömeg megfelel emberi használatra. Az elkészített maszk alapanyagok szűrőképeségét két módszerrel határoztam meg. Az első esetben a szűrt részecskék száma alapján számoltam, aminek eredményeképpen a minták hatékonysága 45%-ról 56-77%-ra nőtt az alkalmazott paraméterek függvényében, esetenként azonban 80-81%-os hatékonyság is mérhető volt. A második esetben tömegszázalék értékek alapján hasonlítottam össze az anyagokat, ami az FFP besorolás meghatározásához szükséges érték. Ennek során az etalonhoz képest a maszk minták sokkal jobb szűrési hatékonysággal rendelkeztek, akár négyszer jobb szűrőképeség is elérhető a nanoszálalás réteget tartalmazó anyagok esetén. A vizsgált minta típusok közül egy hatékonysága elérte a 80%-os értéket, ami az FFP1-es besorolásnak felel meg. A kapott eredmények korrelációban vannak egymással, azonban bizonyos esetek ettől eltértek, ami az elektrospinning technológia nem egzakt voltát bizonyítja. Megállapítottam, hogy az általam vizsgált minták közül a leghatékonyabb szűrést 90 és 120 másodperces szálképzési idővel és 17-19 kV egyenfeszültséggel tudtam elérni, ami két különböző ponton vizsgálva és átlagolva 68,86-80,55% közötti érték.

A szűrőréteg tartósságának vizsgálata során az anyag sérülékenységét elemeztem és annak javítása érdekében tettem intézkedéseket. Megállapítottam, hogy vastagon

képzett réteg esetén a rossz szűrőképesség mellett az anyagok közötti kohézió is gyenge, azonban a szűrőképesség vizsgálaton optimálisnak ítélt paraméterek alkalmazásával a vékonyabb réteg jobban ellenállt a mechanikai behatásoknak és hőbehatás valamint nyomás (vasalás) hatására az anyagok közötti kohézió is javulni látszik. Azonban a pontos eredmények érdekében ezen a területen további mérések szükségesek, valamint nagy nagyítású mikroszkópos felvételek a szálak sérülésének elemzéséhez.

Összességében a kutatásom célja megvalósult, sikeresen hoztam létre egy elektrosztatikus szálképző berendezést, ami minden esetben növelte a létrehozott maszkok szűrőképességét, néhány minta még az FFP1-es szűrőhatékonyságot is elérte. A kapott eredmények iránymutatást adnak afelé, hogy a kutatás későbbi szakaszában az FFP2-es hatékonyságot is elérjék az elektrospinning technológiával készült maszkok.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megragadni az alkalmat és megköszönni a konzulenseim, Dr. Cselkó Richárd és Székely László kitartó segítségnyújtását, valamint a Villamos Energetika Tanszék Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoportjának közreműködését, akik a kutatáshoz szükséges eszközöket biztosították.

Valamint ez a TDK dolgozat nem jöhetett volna létre az Elektronikai Technológia Tanszék közreműködése nélkül, akik segítségével a szűrési hatékonyság vizsgálatát végeztem.

Irodalomjegyzék

- [1] Sharma, G. K. , & James, N. R. (2022). *Electrospinning: The Technique and Applications*. In (Ed.), *Recent Developments in Nanofibers Research* [Working Title]. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105804>
- [2] Tucker, N., Stanger, J. J., Staiger, M. P., Razzaq, H., & Hofman, K. (2012). *The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995*. *Journal of engineered fibers and fabrics*, 7(2_suppl), 155892501200702S10.
- [3] Haider, A., Haider, S., & 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), 1165-1188.
- [4] Agarwal, S., Wendorff, J. H., & Greiner, A. (2008). *Use of electrospinning technique for biomedical applications*. *Polymer*, 49(26), 5603-5621.
- [5] <https://www.france24.com/en/20200508-pandemic-disarmament-why-france-was-ready-for-covid-19-a-decade-too-soon> (2020)
- [6] Odularu, A. T. (2022). *Basic Principles of Electrospinning, Mechanisms, Nanofibre Production, and Anticancer Drug Delivery*. *Journal of Chemistry*, 2022.
- [7] Li, Y., Zhu, J., Cheng, H., Li, G., Cho, H., Jiang, M., & Zhang, X. (2021). *Developments of advanced electrospinning techniques: A critical review*. *Advanced Materials Technologies*, 6(11), 2100410.
- [8] Lipol, L. S., & Rahman, M. M. (2016). *Electrospinning and electrospun nanofibers*. *World Journal of Nano Science and Engineering*, 6(02), 45.
- [9] Balogh, A., Cselkó, R., Démuth, B., Verreck, G., Mensch, J., Marosi, G., & Nagy, Z. K. (2015). *Alternating current electrospinning for preparation of fibrous drug delivery systems*. *International journal of pharmaceutics*, 495(1), 75-80.
- [10] Molnár, K. (2013). *Elektro-szálképzett nanoszálak szerkezetek és kompozitjaik*.
- [11] Munir, M. W., & Ali, U. (2020). *Classification of electrospinning methods*. In *Nanorods and Nanocomposites* (p. 229). London, UK: IntechOpen.
- [12] Avossa, J., Branda, F., Marulo, F., Petrone, G., Guido, S., Tomaiuolo, G., & Costantini, A. (2018). *Light electrospun polyvinylpyrrolidone blanket for low frequencies sound absorption*. *Chinese Journal of Polymer Science*, 36(12), 1368-1374.
- [13] Mu, X., Zheng, Y., & Xin, B. (2021, February). *Effects of the electric field distribution on electrospun PET fibers properties*. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1790, No. 1, p. 012059). IOP Publishing.
- [14] Reneker, D. H., & Yarin, A. L. (2008). *Electrospinning jets and polymer nanofibers*. *Polymer*, 49(10), 2387-2425.

- [15] <http://www.yflow.com/coaxial-electrospinning-electrospray-microencapsulation/>
- [16] Mahalingam, S., Matharu, R., Homer-Vanniasinkam, S., & Edirisinghe, M. (2020). *Current methodologies and approaches for the formation of core–sheath polymer fibers for biomedical applications*. Applied Physics Reviews, 7(4), 041302.
- [17] Garg, K., & Bowlin, G. L. (2011). *Electrospinning jets and nanofibrous structures*. Biomicrofluidics, 5(1), 013403.
- [18] Xie, J., & Xia, Y. (2008). *Electrospinning: an enabling technique for nanostructured materials*. Material Matters, 3(1), 19.
- [19] Omer, S., Forgách, L., Zelkó, R., & Sebe, I. (2021). *Scale-up of electrospinning: Market overview of products and devices for pharmaceutical and biomedical purposes*. Pharmaceutics, 13(2), 286.
- [20] SalehHudin, H. S., Mohamad, E. N., Mahadi, W. N. L., & Muhammad Afifi, A. (2018). *Multiple-jet electrospinning methods for nanofiber processing: A review*. Materials and Manufacturing Processes, 33(5), 479-498.
- [21] Theron, S. A., Yarin, A. L., Zussman, E., & Kroll, E. (2005). *Multiple jets in electrospinning: experiment and modeling*. Polymer, 46(9), 2889-2899.
- [22] http://www.yflow.com/services/custom_devices/
- [23] Begum, H. A., & Khan, K. R. (2017). *Study on the various types of needle based and needleless electrospinning system for nanofiber production*. Int. J. Text. Sci, 6(8).
- [24] Wu, D., Huang, X., Lai, X., Sun, D., & Lin, L. (2010). *High throughput tip-less electrospinning via a circular cylindrical electrode*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 10(7), 4221-4226.
- [25] Adomavičiūtė, E., Milašius, R., & Levinskas, R. (2007). *The influence of main technological parameters on the diameter of poly (vinyl alcohol)(PVA) nanofibre and morphology of manufactured mat*. Materials science, 13(2), 152-155.
- [26] Fahimirad, S., Fahimirad, Z., & Sillanpää, M. (2021). *Efficient removal of water bacteria and viruses using electrospun nanofibers*. Science of the Total Environment, 751, 141673
- [27] Ahmed, A., Yin, J., Xu, L., & Khan, F. (2020). *High-throughput free surface electrospinning using solution reservoirs with different radii and its preparation mechanism study*. Journal of Materials Research and Technology, 9(4), 9059-9072.
- [28] Fang, Y., & Xu, L. (2019). *Four self-made free surface electrospinning devices for high-throughput preparation of high-quality nanofibers*. Beilstein Journal of Nanotechnology, 10(1), 2261-2274.
- [29] Senthil, R., Sumathi, V., Tamilselvi, A., Kavukcu, S. B., & Aruni, A. W. (2022). *Functionalized electrospun nanofibers for high efficiency removal of particulate matter*. Scientific Reports, 12(1), 1-14.

- [30] Liu, Y., Hao, M., Chen, Z., Liu, L., Liu, Y., Yang, W., & Ramakrishna, S. (2020). *A review on recent advances in application of electrospun nanofiber materials as biosensors*. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 13, 174-189.
- [31] Thavasi, V., Singh, G., & Ramakrishna, S. (2008). *Electrospun nanofibers in energy and environmental applications*. *Energy & Environmental Science*, 1(2), 205-221.
- [32] Naragund, V. S., & Panda, P. K. (2022). *Electrospun nanofiber-based respiratory face masks—a review*. *Emergent materials*, 1-18.
- [33] Mamun, A., Blachowicz, T., & Sabantina, L. (2021). *Electrospun nanofiber mats for filtering applications—Technology, structure and materials*. *Polymers*, 13(9), 1368.
- [34] de Almeida, D. S., Martins, L. D., & Aguiar, M. L. (2022). *Air pollution control for indoor environments using nanofiber filters: a brief review and post-pandemic perspectives*. *Chemical Engineering Journal Advances*, 100330.
- [35] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. (2022) - *Maszkok szűrőképességének növelése electrospinning technológia használatával*, Mechwart András Ifjúsági Találkozó 2022
- [36] Okutan, N., Terzi, P., & Altay, F. (2014). *Affecting parameters on electrospinning process and characterization of electrospun gelatin nanofibers*. *Food Hydrocolloids*, 39, 19-26.
- [37] Rodoplu, D., & Mutlu, M. (2012). *Effects of electrospinning setup and process parameters on nanofiber morphology intended for the modification of quartz crystal microbalance surfaces*. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7(2), 155892501200700217.
- [38] Prahasti, G., Zulfi, A., & Munir, M. M. (2020). *Needleless electrospinning system with wire spinneret: an alternative way to control morphology, size, and productivity of nanofibers*. *Nano Express*, 1(1), 010046.
- [39] Nezarati, R. M., Eifert, M. B., & Cosgriff-Hernandez, E. (2013). *Effects of humidity and solution viscosity on electrospun fiber morphology*. *Tissue Engineering Part C: Methods*, 19(10), 810-819.
- [40] https://hu.wikipedia.org/wiki/Fel%C3%BCleti_fesz%C3%BClts%C3%A9g
- [41] Xue, J., Wu, T., Dai, Y., & Xia, Y. (2019). *Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications*. *Chemical reviews*, 119(8), 5298-5415.
- [42] Sundarrajan, S., Tan, K. L., Lim, S. H., & Ramakrishna, S. (2014). *Electrospun nanofibers for air filtration applications*. *Procedia Engineering*, 75, 159-163.
- [43] Soares, R. M., Siqueira, N. M., Prabhakaram, M. P., & Ramakrishna, S. (2018). *Electrospinning and electrospray of bio-based and natural polymers for biomaterials development*. *Materials Science and Engineering: C*, 92, 969-982.

- [44] Kailasa, S., Reddy, M. S. B., Maurya, M. R., Rani, B. G., Rao, K. V., & Sadasivuni, K. K. (2021). *Electrospun nanofibers: Materials, synthesis parameters, and their role in sensing applications*. *Macromolecular Materials and Engineering*, 306(11), 2100410.
- [45] Avossa, J., Herwig, G., Toncelli, C., Itel, F., & Rossi, R. M. (2022). *Electrospinning based on benign solvents: current definitions, implications and strategies*. *Green Chemistry*.
- [46] A műanyagok tulajdonságai - *A poliamidok tulajdonságai a feldolgozási körülmények és a kondicionálás függvényében* (2022)
- [47] Ádám, M., & Kolos, M. *Poliamid nanoszálak szövedékek fejlesztése és vizsgálata*.
- [48] Nurfaizey, A. H., & Munajat, N. A. (2020). *Effect of electrospinning distance and applied voltage on the production of polyacrylonitrile electrospun fibres*. *Proceedings of Mechanical Engineering Research Day, 2020*, 94-96.
- [49] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. (2022, July). *Examination of electric field distribution in a laboratory-built electrospinning device*. In *2022 8th International Youth Conference on Energy (IYCE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [50] De Vrieze, S., Van Camp, T., Nelvig, A., Hagström, B., Westbroek, P., & De Clerck, K. (2009). *The effect of temperature and humidity on electrospinning*. *Journal of materials science*, 44(5), 1357-1362.
- [51] Raksa, A., Numpaisal, P. O., & Ruksakulpiwat, Y. (2021). *The effect of humidity during electrospinning on morphology and mechanical properties of SF/PVA nanofibers*. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3458-3461.
- [52] <https://www.textilpont.hu/anyagismeret>
- [53] <https://virusmaszk.hu/blog/tesztekkel-igazolt-kulonbsegek-a-maszkok-hatekonysagaban/43>