



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamosenergetika Tanszék

Pózmán Réka Alexandra

**ELEKTROSZTATIKUS SZÁLKÉPZÉSI
TECHNOLÓGIA TERMELÉKENYSÉGÉNEK
VIZSGÁLATA ÚJSZERŰ TÁPLÁLÁSI
MÓDSZEREKKEL**

KONZULENS

Dr. Cselkó Richárd

Székely László

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	3
Abstract.....	4
1 Bevezetés	5
2 Elektrosztatikus szálképzés működési elve.....	6
3 Termelékenység növelési lehetőségek.....	9
3.1 Szálak képződését növelő módszerek.....	9
3.2 Váltakozó feszültség alkalmazása	10
4 Több tűs elrendezés vizsgálata DC feszültséggel	12
4.1 Mérési elrendezés	12
4.2 Tapasztalható jelenségek	12
5 Alkalmazott feszültség típusának vizsgálata	15
5.1 Mérési elrendezés	15
5.2 AC feszültség.....	16
5.2.1 Indulási feszültség.....	16
5.2.2 Szálképzett átmérő.....	17
5.3 DC feszültség.....	19
5.3.1 Indulási feszültség.....	20
5.3.2 Szálképzett átmérő.....	20
5.4 DC feszültséggel eltolt AC feszültség	23
6 Méretek és értékek növelése az elrendezésben.....	26
7 Konklúzió.....	28
Összegzés.....	29
Irodalomjegyzék.....	31

Összefoglaló

Az elektrosztatikus szálképzés, avagy electrospinning egy speciális eljárás ultravékony szálak előállítására. A technológia alapja, hogy a nagyfeszültség hatására kialakult villamos térerősség egy polimer oldatból képzett cseppre olyan erőhatást gyakorol, ami annak megnyúlását és így szálképzést eredményez. Korábbi kutatásom során már számos oldalról közelítettem meg a területet azzal a céllal, hogy egy könnyen elérhető és gazdaságos módszer segítségével növeljem a járvány időszakában hordott alacsony szűrési hatékonysággal rendelkező textil maszkok szűrési képességét egy szálképzett réteg textilre való applikálásával. A mérések eredményeképpen a maszkok szűrőképessége jelentősen nőtt, azonban a működés további optimalizálása elengedhetetlen annak érdekében, hogy az alkalmazhatóságot és a termelés költséghatékonyságát tovább növeljem.

Jelenlegi kutatásom célja a technológia egy nehezen leküzdhető hátrányának, az alacsony termelékenységnek a vizsgálata és javítása. Az elrendezést általában DC feszültséggel táplálják, azonban az utóbbi időben egyre nagyobb figyelem irányul az AC feszültséggel való szálképzésre, ami nagy mértékben növeli meg a szálképződés sebességét. A kutatás során egy saját készítésű szálképző berendezésen vizsgáltam a termelési hatékonyság növelésének módszereit. DC, AC, majd DC feszültséggel eltolt AC feszültséggel táplált elrendezésen végeztem méréseket, mely során vizsgáltam a feszültség szint és elektródtávolság hatását, a szálképzett réteg átmérőjét, polaritásfüggését és a maximális cseppmentes hozamot.

Abstract

Electrospinning is a special process for the production of ultra-thin fibres. The technology is based on the fact that the electric field generated by high voltage forces a droplet of polymer solution to elongate and form fibres. In my previous research I have approached the field from several angles with the aim of increasing the filtration efficiency of low filtration efficiency textile masks worn during pandemic periods by applying a nanofiber layer to the textile, using an easily accessible and economical method. As a result of the measurements, the filtration efficiency of the masks was significantly increased, but further optimisation of the operation is essential to further increase the applicability and cost-effectiveness of the production.

The aim of my current research is to investigate and improve one of the technology's most difficult drawbacks, low productivity. Arrangements are usually supplied with DC voltage, but recently more and more attention has been paid to electrospinning with AC voltage, which greatly increases the speed of fibre formation. In this research, I tested methods to increase productivity using a home-made electrospinning setup. Measurements were made with a DC, AC, and then AC with DC offset voltage supplied setup, investigating the effects of voltage level and electrode spacing, diameter of the fibre-formed layer, polarity dependence, and maximum droplet-free flow rate.

1 Bevezetés

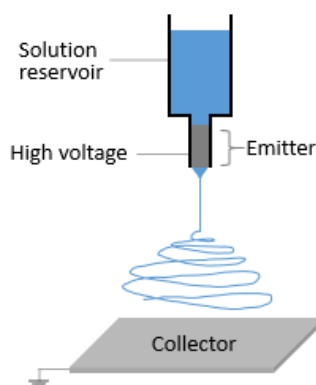
Az electrospinning során az oldatból kialakuló szálak átmérője akár néhány nanométer is lehet, így rendkívül rugalmas szerkezeteket hozhatunk létre. Ezen tulajdonságok miatt manapság már széles körben alkalmazzák a technológiát különböző területeken, például az orvostudományban és az energetikában [1][2]. A módszer előnye még, hogy lehetővé teszi a szálak egyedi tulajdonságainak, például összetételének, szerkezetének finomhangolását, ezzel az adott iparági igényekhez igazítva a végeredményt. Emellett a technológia rugalmasságának és az innovatív megoldásoknak köszönhetően lehetővé vált a termelést kis mennyiségektől egészen ipari szintig. Az elektrosztatikus szálképzés számos kutatás tárgya, folyamatosan fejlesztik az eljárást, hogy még több alkalmazási lehetőséget hozzanak létre a jövőben.

Kutatásom során megterveztem egy elektrosztatikus szálképző berendezést, amelyen számos szálképzést befolyásoló paramétert vizsgáltam, többek között a környezeti hatásokat, az oldat tulajdonságait az alkalmazott feszültséget, az elektródelrendezést és az elektródtávolságot. Optimális paraméterek mellett textilanyagra képeztem réteget, majd vizsgáltam szűrési hatékonyság és tartósság szempontjából.

Jelenlegi kutatásom célja, hogy a technológiát jellemző fizikai és kémiai folyamatokat jobban megismerve kísérletet tegyek az alacsony termelékenység javítására. Számos elrendezést vizsgáltam, egyenfeszültséget alkalmazva mérésekkel és véges elemes szimulációval teszteltem különböző elektródelrendezéseket, a feszültség szint és elektródtávolság hatását, valamint a szálképzés polaritásfüggését. AC, majd DC feszültséggel eltolt AC feszültséggel táplált elrendezésen végeztem méréseket, mely során vizsgáltam a szálképzett réteg átmérőjét és a maximális cseppmentes hozamot.

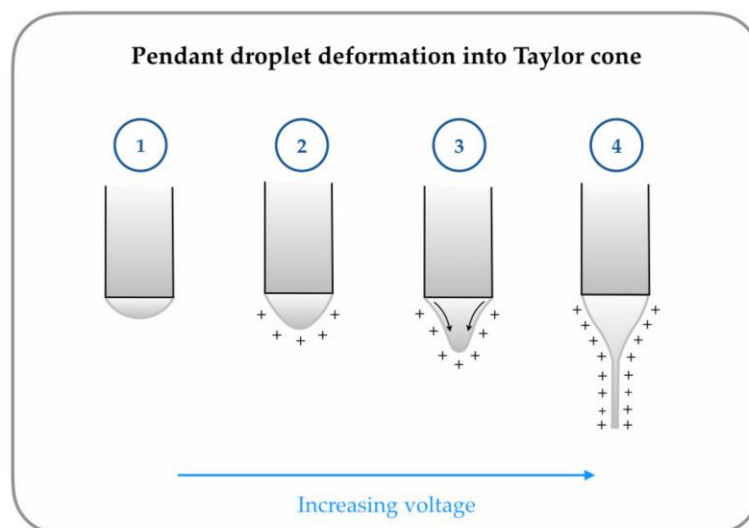
2 Elektrosztatikus szálképzés működési elve

Bár az elektrosztatikus szálképzés folyamata igencsak összetett, a szálképzést lehetővé tevő berendezés összeállítása viszonylag egyszerű és részei könnyen beszerezhetőek. Az elrendezés egy adagolóra csatlakoztatott tüelektródból, egy gyűjtő lapból és egy nagyfeszültségű, általában DC feszültségforrásból áll, ahogy az 1. ábra is szemlélteti.



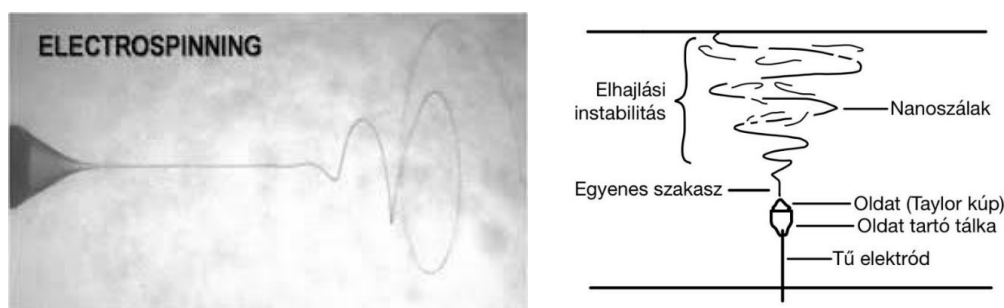
1. ábra: Tipikus elektrosztatikus szálképző elrendezés vázlata [3]

A szálképzési folyamat során az elrendezésre feszültséget kapcsolunk, aminek hatására töltések jelennek meg az oldatban. Ezek a töltések fontos szerepet játszanak a folyamatban, ugyanis a feszültség hatására létrejövő villamos térerősség befolyásolja ezek eloszlását és kölcsönhatását a rendszerben, ami a szálak és a szálképződési folyamat romlásához vezethet. Ez a probléma elkerülhető a megfelelő vezetőképességű és viszkozitású oldat alkalmazásával, a feszültség szint optimalizálásával, valamint a megfelelő geometria kialakításával [4]. A töltések a rendszerben a legnagyobb térerősségű hely felé indulnak, a szálképzési folyamat során a folyadék felszínével lépnek kölcsönhatásba, így a tű csúcsán lévő csepp felszíne alatt kialakul egy elektrosztatikus töltéshalmaz. Ahogy a töltéshalmaz növekszik, a gömbfelületen érintő irányú feszültséget keltenek, ami egy tölcser formává deformálja azt és kúp formát vesz fel, amit Taylor-kúpnek nevezünk [5]. Ennek csúcsából indul el a szál, egyenesen a gyűjtő felé. A kialakulás folyamatát a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A Taylor-kúp kialakulásának folyamata lépésről lépésre [6]

A térerősség gyorsító hatása miatt a sugárnyaláb nagy sebességgel „húzódik” ki az oldatból, aminek következtében megnyúlik és elvékonyodik, amit a sav intenzív párolgása is elősegít. Egy bizonyos ponton a vékonyodó szál az instabilitás szakaszába lép, ahol az egyenes mozgás helyett spirálisan, rendezőtlenül kezd el szóródni [7]. A szál ebben a szakaszban tovább vékonyodik, szétszakadozik és megkezdődik a szilárdulás folyamata. Az anyag a földelt gyűjtőre érve a maradék töltését levezeti, és a sav elpárolgásával kialakul a nanoszálakból álló réteg. A kiinduló szál útja látható a 3. ábra jobb oldali vázlatán, balra mellette egy kamera felvétel, ami vízszintes elrendezésen szemlélteti a folyamatot [8].

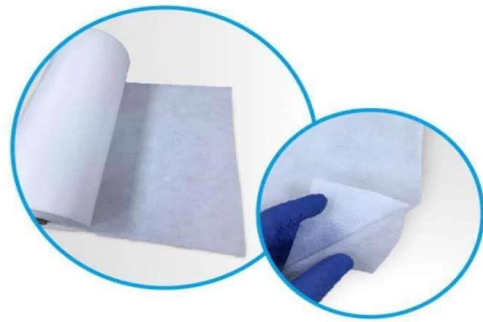
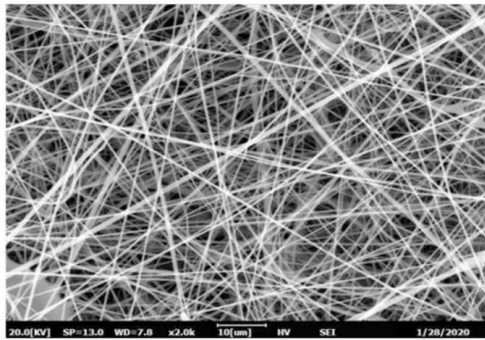


3. ábra: A szál szakaszai a tűelektródtól a gyűjtőig

Ez a létrejövő réteg a kis átmérőjű, rendezetlen szálaknak köszönhetően különleges tulajdonságokkal bír, mint például a kis terület-térfogat arány, nagy szakítószilárdság és a szerkezet porózussága, azaz a szálak közötti apró hézagok lehetővé teszik, hogy a gázok, folyadékok átáramoljanak az anyagon, azonban a nagyobb részecskék, szennyeződések, akár vírusok, baktériumok már fennakadnak a szálakban [9]. Ezek miatt a tulajdonságok miatt a szálképzett rétegek egyre növekvő

érdeklődést mutatnak a kutatásban és az iparban, és számos innovatív alkalmazásban játszanak fontos szerepet [10][11][12][13]. A 4. ábra bal oldalán egy elektronmikroszkóppal készült kép található a nanoszálak rétegről, ezen jól láthatóak a nagyságrendek, a szálak átmérői és a közöttük kialakult légrések. A jobb oldalon a használatra kész szűrőréteg látható.

SEM image of the Nanofiber membrane



Fiber Diameter (μm)		
	Std	
Average	Dev	Median
0,224 0	,106 0	,210 7

**4. ábra: Bal: SEM felvétel a nanoszálakból álló rétegről,
Jobb: Nanoszálakból készült szűrőréteg [14]**

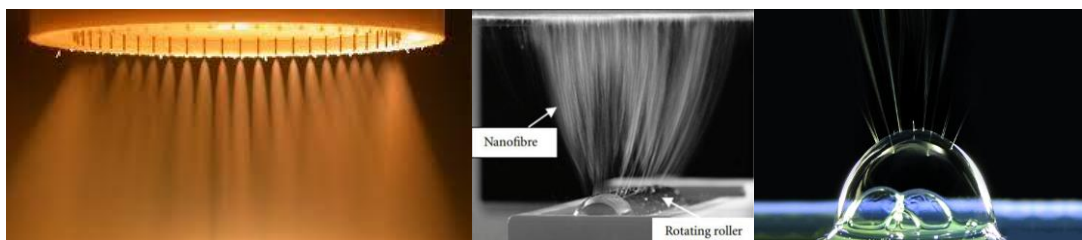
3 Termelékenység növelési lehetőségek

A bemutatott elrendezés egy egyszerű, egy tűt és adagolót tartalmazó megoldás, azonban ennek működtetése során a képződő szálak mennyisége adott idő alatt viszonylag kicsit [15]. A folyamat működőképességét és a létrejövő szálak minőségét nagy mértékben befolyásolják az elrendezésben alkalmazott paraméterek, többek között a tű és gyűjtő elektród közötti távolság, az alkalmazott feszültség, az oldat viszkozitása, vezetőképessége, koncentrációja, vagy éppen a környezeti tényezők, amelyeket korábbi munkám során vizsgáltam [16].

A jelenlegi cél a működési folyamat javítása, azaz a termelékenység növelése, amire számos megoldás született korábbi kutatások eredményeképpen. Ezek közül vizsgáltam meg a lehetőségeket és teszteltem új megoldást is a mérések alkalmával.

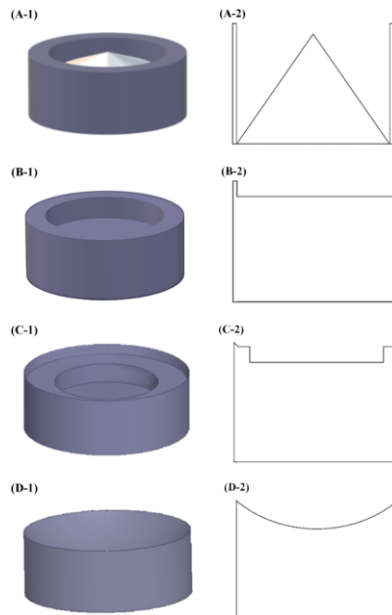
3.1 Szálak képződését növelő módszerek

Az itt felsorolt megoldások közös tulajdonsága, hogy az egy időben létrejövő szálak számát növelik meg különböző módszerekkel. Az egyik lehetséges megoldás a több tűs elrendezések alkalmazása [17], a másik pedig, hogy a tűk számának növelése helyett csupán a kiinduló szálak számát növeljük meg. Erre a célra már számtalan elrendezés minta áll rendelkezésünkre, ilyenek a szabad felszínes [18], a forgó elektródos [19], vagy gázbuborékos megoldások [20], amik a kiinduló szálak számát növekedését a geometria változtatásával érik el. Az 5. ábra képein ezek a megoldások láthatóak működés közben.



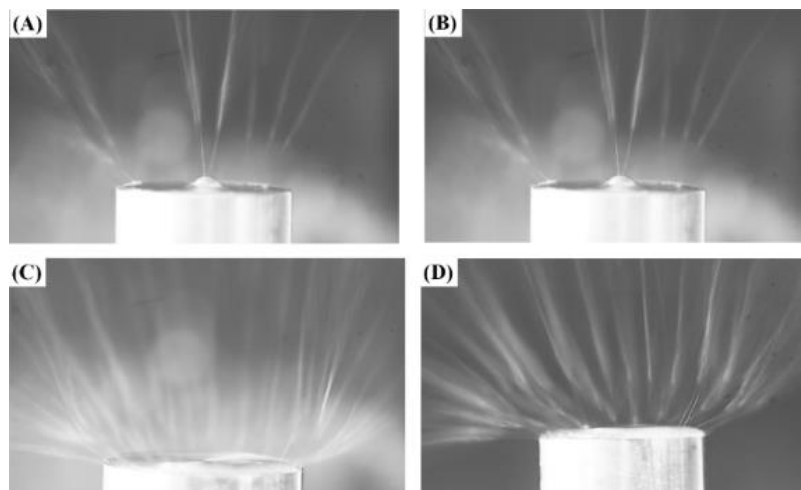
5. ábra: A: Több tűs elrendezés [21], B: Forgó elektródok elrendezés [22], C: Gázbuborékos elrendezés [23]

A 6. ábra egy szabad felszínes elrendezést vizsgáló kutatás különböző geometriával rendelkező oldat tartó mintáit ábrázolja [24]. A méréseket ezeken a mintákon elvégezve vizsgálták az oldat felszínéről kiinduló szálak számát.



6. ábra: Szabad felszínes megoldás oda tartó tálkái

A tapasztalat az volt, hogy a működés során mindegyik esetben egyszerre több szál képződik és a működés stabil, a geometria megváltoztatása azonban jelentős befolyással bír, az A és B esetben kevesebb szál képződött, mint a C és D esetben, ahogy a 7. ábra is szemlélteti.

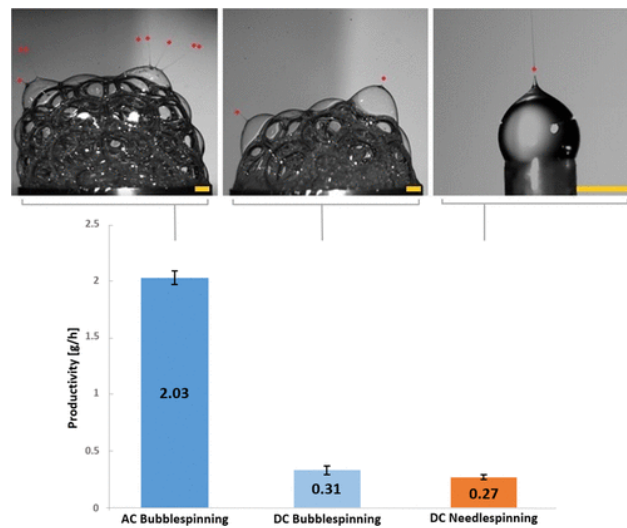


7. ábra: Szabad felszínes elrendezések működés közben

3.2 Váltakozó feszültség alkalmazása

Ezektől merőben eltérő és új keletű megoldás a váltakozó (AC) feszültség alkalmazása az eddigi egyenfeszültség (DC) helyett. Váltakozó feszültséget alkalmazva nagyobb az áramlási sebesség, egy időben nagyobb mennyiségű anyag képes elhagyni az oldat felszínét, mint egyenfeszültség esetében [25]. Egy cseh egyetemi kutatás

eredménye alapján AC feszültség alkalmazásával jobb hatékonyság érhető el, ezt szemlélteti a 8. ábra diagramja, amelyen három szálképzési mód van összehasonlítva az optimális szálképzéshez szükséges adagolási sebesség alapján [26].



8. ábra: Különböző elektrosztatikus szálképzési módszerek szálképzési sebessége

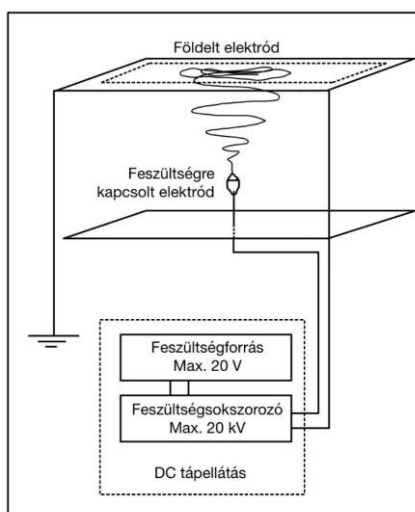
Az első eset egy AC „bubble”, gázbuborékos electrospinning, a második szintén, csak DC feszültséggel táplálva, a harmadik pedig az eredeti tűelektródos megoldás DC feszültséggel alkalmazva. Az AC feszültséggel táplált elrendezés láthatóan különbözik a többi esettől, a pirossal jelölt szálak száma jelentősen nagyobb, amiből következik, hogy a szükséges adagolási sebesség is többszöröse, mint a másik két esetben.

4 Több tűs elrendezés vizsgálata DC feszültséggel

A vizsgálat célja, hogy mérésekkel és térerősség elemzéssel teszteljem a több tűs elrendezések működését, hatékonyságát a termelékenység növelése érdekében.

4.1 Mérési elrendezés

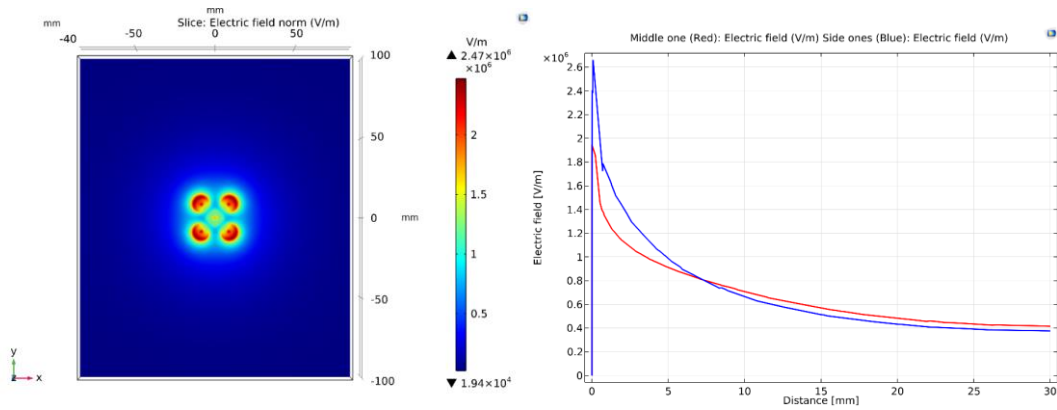
A mérésekhez használt berendezés az egy cseppes modell alapján készült, ami a szabad felszínes electrospinning előnyeit törekszik kihasználni a hátrányok kiküszöbölése mellett. A működéséhez nem szükséges adagoló, viszont nincs nagy felületen párolgó oldat sem. A szálak képzéséhez csupán egy-egy csepp szükséges egy vezetőképes elektródra csöppentve. A mérések során PA6 és hangyasav 13 tömegszázalékos oldatával dolgoztam. Az elrendezés vázlatát a 9. ábra szemlélteti [27].



9. ábra: Egy cseppes modell alapján készült szálképző berendezés vázlata

4.2 Tapasztalható jelenségek

Az első vizsgálatához egy öt tűs elrendezést alkalmaztam 20-29 milliméteres távolságokkal, a mérés során azonban azt tapasztaltam, hogy míg a négy szélső tű már szálakat képzett, a középső tű nagyobb feszültségen lépett működésbe. A 10. ábra modelljén látható a tűelektródok közötti térerősség eloszlás, a diagramon pedig a szélső és középső tű térerősség értéke közötti különbség [28].



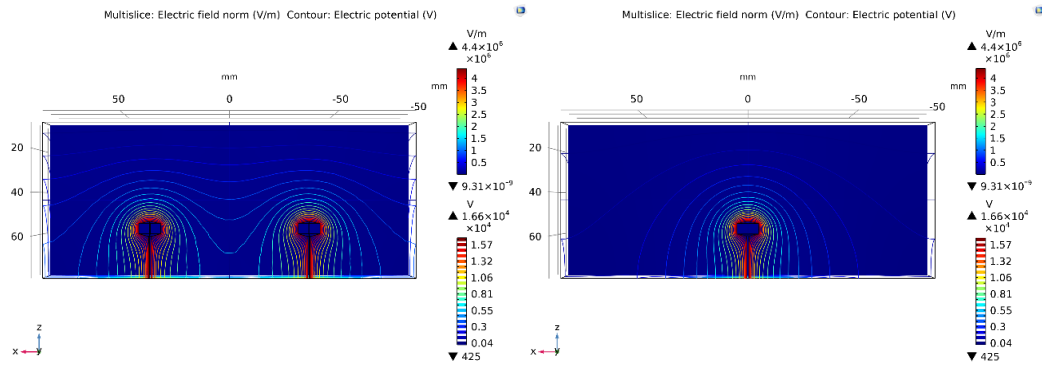
**10. ábra: Bal: Térerősség eloszlás az öt tűs elrendezésben felülnézetből
Jobb: Középső és szélső tűk vonalában mérhető térerősség**

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a tűelektródok és a sugárnyalábok zavarják egymás terét, így nem jön létre stabil szálképzés és egybefüggő, nagy területet lefedő réteg sem. A 11. ábra egy több tűs elrendezéssel készült mintát ábrázol, ezen megfigyelhető, hogy a szálképződés foltokban jelent meg a gyűjtő lapon.



11. ábra: Több tűs megoldással készült minta

A probléma megoldható a tűelektródok közötti távolság növelésével, aminek köszönhetően a térerősség zavarása már elhanyagolható mértékűre csökken. Modell segítségével vizsgáltam, hogy két tűt alkalmazva 72,5 milliméteres távolságon a zavarás milyen mértékben van jelen, ezt szemlélteti a 12. ábra [29].



12. ábra: Egy és két tűs elrendezés télerősségeloszlása

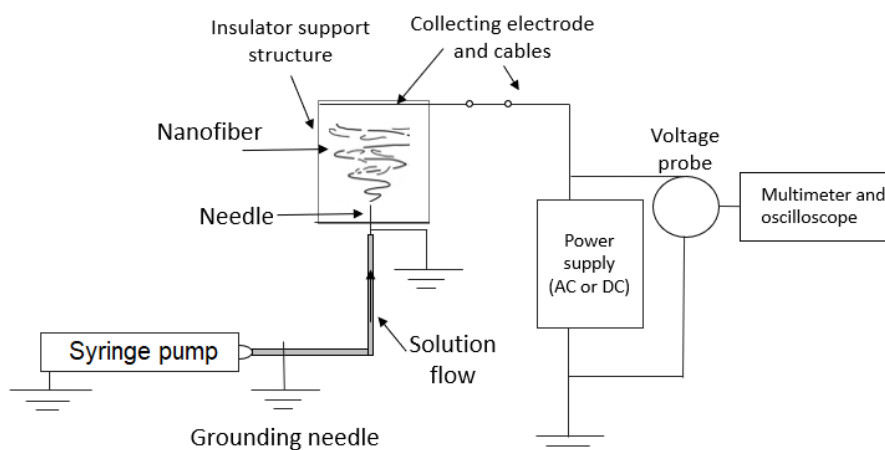
A modellek alapján a Taylor-kúpnál mérhető maximális feszültség értéke az egy tűs esetben 3,72 kV/mm, a két tűs esetben pedig 3,37 kV/mm, ami szálképzés szempontjából minimális télerősség csökkenést jelent.

5 Alkalmazott feszültség típusának vizsgálata

A mérések célja, hogy összehasonlítsam az alkalmazott feszültség típusának hatását a szálképzésre. A vizsgálat során kerestem azt a legkisebb feszültség értéket, ahol a szálképzés elindul abban az esetben, ha az elrendezést AC, DC vagy DC feszültséggel eltolt AC feszültséggel tápláltam. Ennek meghatározása után ugyan ezen beállítások mellett megmértem az adott paraméterek mellett létrejövő réteg átmérőjét.

5.1 Mérési elrendezés

A mérések elvégzéséhez egy adagolóra csatlakoztatott tű elektródot használtam, hogy az oldat adagolási sebessége is vizsgálható legyen. Annak érdekében, hogy az adagoló ne kerüljön potenciálra, a DC és AC feszültséggel történő mérések alatt az adagolóra csatlakoztatott tűelektród földpotenciálra volt csatlakoztatva, míg a fém gyűjtő lap DC vagy AC feszültségre. DC feszültséggel eltolt AC méréséhez azonban szükség volt arra, hogy a tűelektród is feszültségre legyen csatlakoztatva, így ebben az esetben az adagoló és a tű közötti szilikon csövet átszűrva egy földelővel, megoldható volt az adagoló biztonságos földelése. A mérési elrendezés vázlatát szemlélteti a 13. ábra [30][31].



13. ábra: Adagolós szálképző elrendezés vázlatja

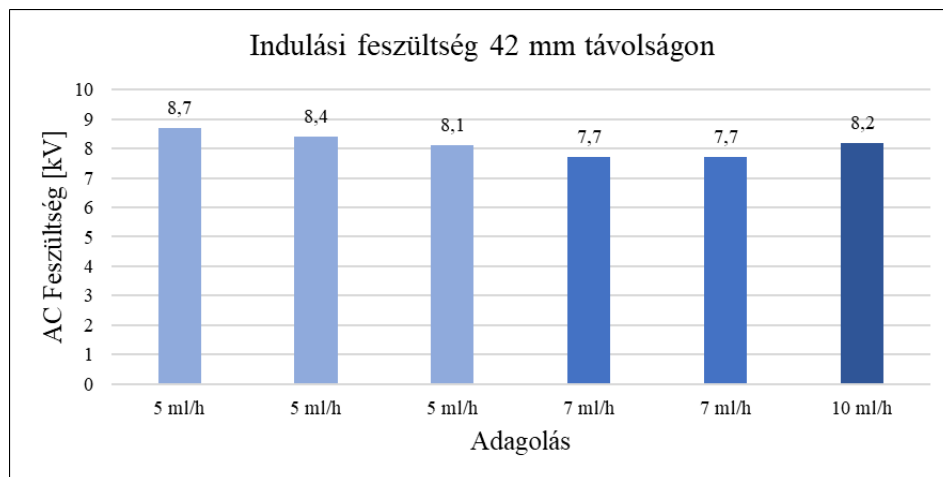
A DC feszültségforrás maximális kimenetele 12 kV, az AC forrásé pedig 20 kV. A kimenő feszültséget feszültségosztóval és digitális multiméterrel mértem, a méréseket pedig szintén PA6 és hangyasav 13 tömegszázalékos oldatával végeztem.

5.2 AC feszültség

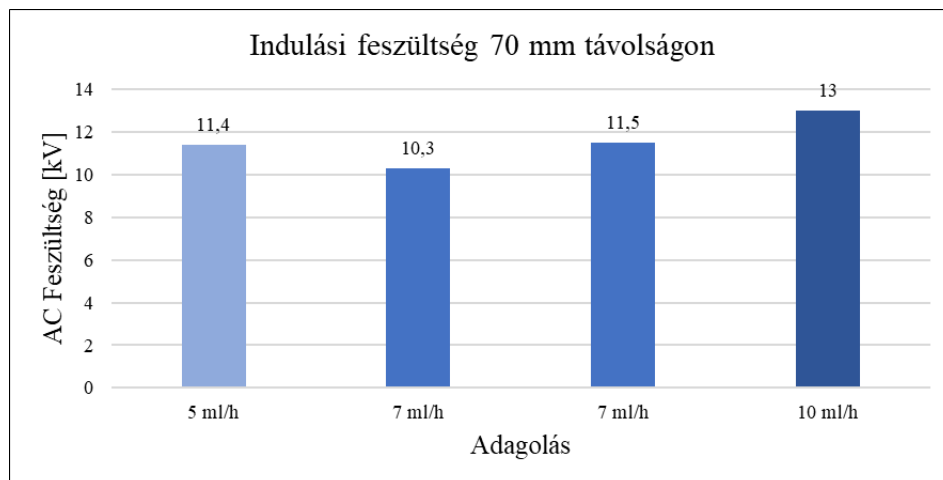
Váltakozó feszültséggel való mérés során a tüelektródot földpotenciálra, míg a gyűjtő lapot AC feszültségforrásra csatlakoztattam. Több esetet is vizsgáltam, két elektród távolságot és három adagolási sebességet alkalmazva.

5.2.1 Indulási feszültség

Az indulási feszültség mérését 42 és 70 milliméteres távolságokban végeztem el 5, 7 és 10 ml/h adagolási sebességek mellett. Az értékek között van egy kis mértékű szórás a pontos értékek nehéz meghatározása miatt, így egy beállítás mellett több mérést is végeztem, amelyek közül a legkisebb érték a mérvadó. A 14. ábra diagramján a 42, a 15. ábra diagramján pedig a 70 milliméterhez tartozó értékek szerepelnek.



14. ábra: Indulási feszültség az AC feszültség és adagolás függvényében 42 mm távolságon

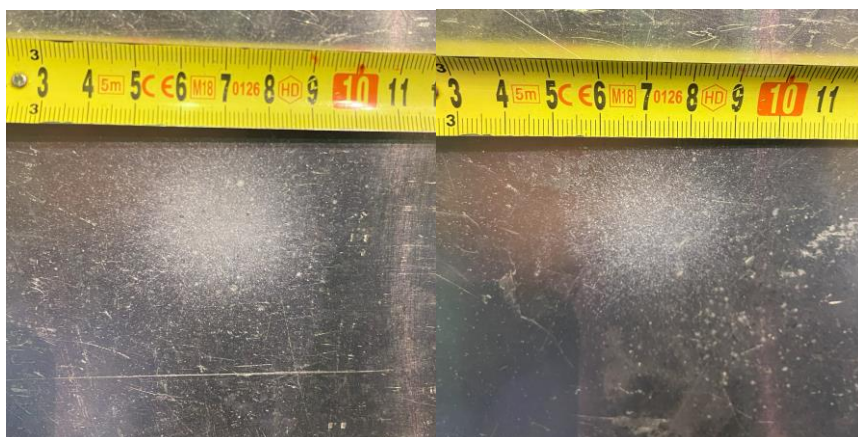


15. ábra: Indulási feszültség az AC feszültség és adagolás függvényében 70 mm távolságon

Az eredmények alapján az indulási feszültség nem mutat linearitást az adagolási sebességgel. Minkét távolság esetén a 7 ml/h adagolással tudtam elérni a legalacsonyabb értéket.

5.2.2 Szálképzett átmérő

A mérés célja, hogy adott beállítások mellett megmérjem a szálakkal lefedett terület átmérőjét. A méréseket szintén 42 és 70 milliméteres elektródtávolsággal kiviteleztem, azonban a 10 ml/h adagolás nem bizonyult optimálisnak, a cseppek a tű végén gyakran lefolytak, a szálképződés ennek következtében nem volt egyenletes, így 3, 5 és 7 ml/h adagolás mellett végeztem a vizsgálatot. A 16. ábra két váltakozó feszültséggel készült mintát tartalmaz.



16. ábra: AC feszültségen képzett rétegek

Az ábrán megfigyelhető az átmérő mérésének módszere is, amit mérőszalaggal kiviteleztem. Az összehasonlíthatóság érdekében a szálképzési idő minden mérés alkalmával két perc, esetenként öt perc volt.

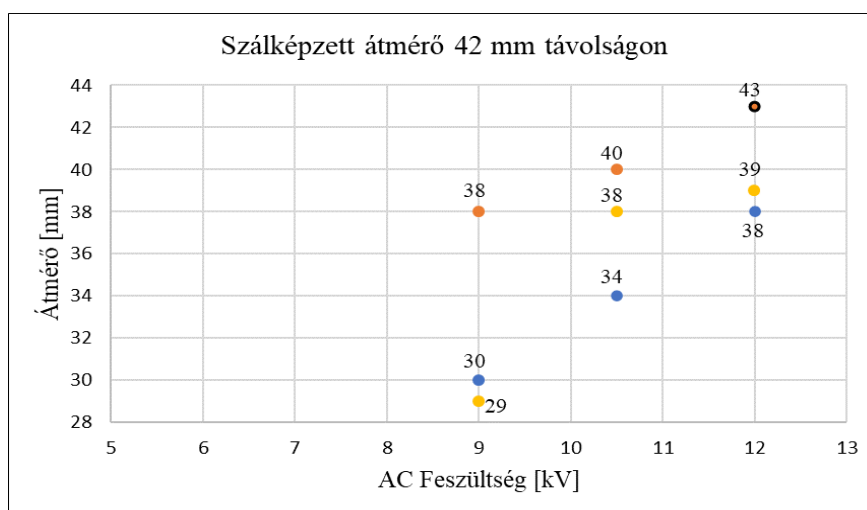
5.2.2.1 42 milliméteren képzett átmérő

A 42 milliméteres távolságon mért eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: AC feszültségen, 42 milliméteres távolságon képzett átmérők

Feszültség [kV]	Távolság [mm]	Szálképzési idő [mp]	Átmérő [mm]	Adagolás [ml/h]
9	42	120	38	3
10,5	42	120	40	3
12	42	120	43 cseppek	3
9	42	120	29	5
10,5	42	120	38	5
12	42	120	39	5
9	42	120	30	7
10,5	42	120	34	7
12	42	120	38	7

Az eredmények közül a 12 kV-on, 3 ml/h adagolási sebességgel készült minta érte el a legnagyobb átmérőt, azonban a rétegben cseppek jelentek meg, ami a szükségesnél nagyobb feszültségre utal. Ebből következtetve, ha növelnénk a feszültséget, nagyobb átmérő helyett valószínűleg a többi adagolási sebességnél is megjelentek volna a cseppek a gyűjtőn, tehát az adott elrendezésben a mért értékeknél nem érhető el nagyobb átmérő cseppek képződése nélkül. Az eredményeket a 17. ábra diagramján ábrázolva, láthatóak az adagolási sebességekből adódó különbségek.



17. ábra: 42 milliméteres távolságon képzett átmérő az AC feszültség és adagolási sebesség függvényében

A diagramon a narancssárga értékek a 3 ml/h, a citromsárga az 5 ml/h, a kék értékek pedig a 7 ml/h adagolási sebességet jelölik. Látható, hogy a legkisebb adagolási sebesség mellett készült minták rendelkeznek a legnagyobb rétegátmérővel, míg a 7 ml/h adagolási sebesség mellett készültek érték el a legkisebbet. A feszültséget másfél kV-onként emelve az átmérő minden esetben nőtt.

5.2.2.2 70 milliméteren képzett átmérő

A 70 milliméteren kapott eredményeket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: AC feszültségen, 70 milliméteres távolságon képzett átmérők

Feszültség [kV]	Távolság [mm]	Szálképzési idő [perc]	Átmérő	Adagolás [ml/h]
11,5	70	2	-	3
12,5	70	2	alig észrevehető	3
14	70	2	nagy területen szórt, halvány	3
15,5	70	5	nagy területen szórt, halvány	3
12,5	70	5	nagy területen szórt, halvány	5
15,5	70	5	nagy területen szórt, halvány	5
12,5	70	2	halvány folt	7

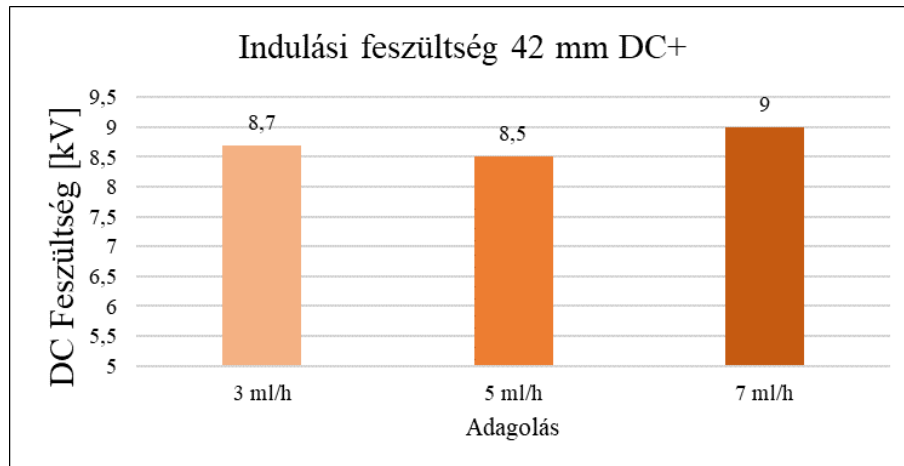
Mint ahogy az eredmények is mutatják, 70 milliméteres távolságon a mérés nem volt teljesen egzakt, a szálképzés bár sok esetben nagy területen megjelent, viszont alig észrevehető rétegvastagságban, még öt perces szálképzési idő mellett is. A távolság túl nagyra bizonyult az általam kihasználható maximális feszültséghez képest.

5.3 DC feszültség

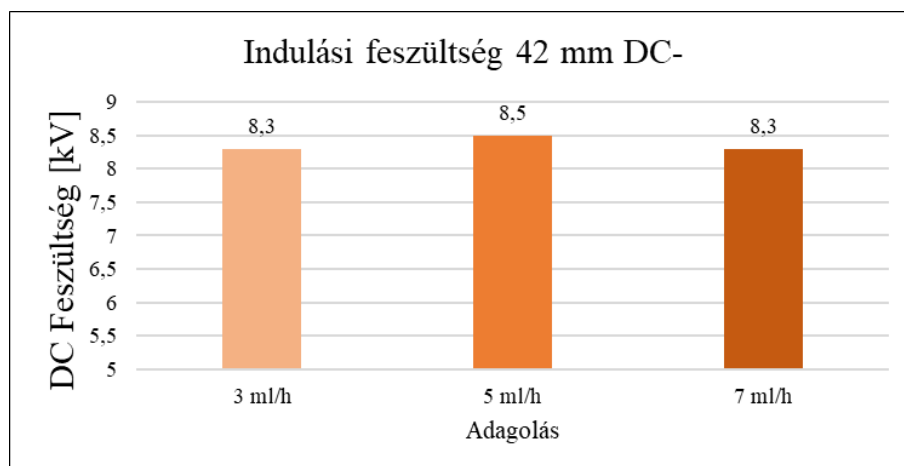
Egyenfeszültséggel végzett vizsgálat során a gyűjtő lapot DC feszültségre csatlakoztattam, míg a tüelektródot földeltem. A méréseket ebben az esetben már csak 42 milliméteres elektródtávolságban végeztem, ugyanis a maximális 12 kV mellett 70 milliméteres távolságon a szálképzés nem indult el. Az indulási feszültséget és a szálképzett átmérőt itt is 3, 5 és 7 ml/h adagolási sebességgel, pozitív és negatív polaritást is vizsgálva mértem.

5.3.1 Indulási feszültség

A méréseket az AC esethez hasonlóan végeztem el, a 18. ábra diagramja a pozitív póluson mért, míg a 19. ábra diagramja a negatív póluson kapott eredményeket ábrázolja.



18. ábra: Indulási feszültség a DC+ feszültség és adagolási sebesség függvényében



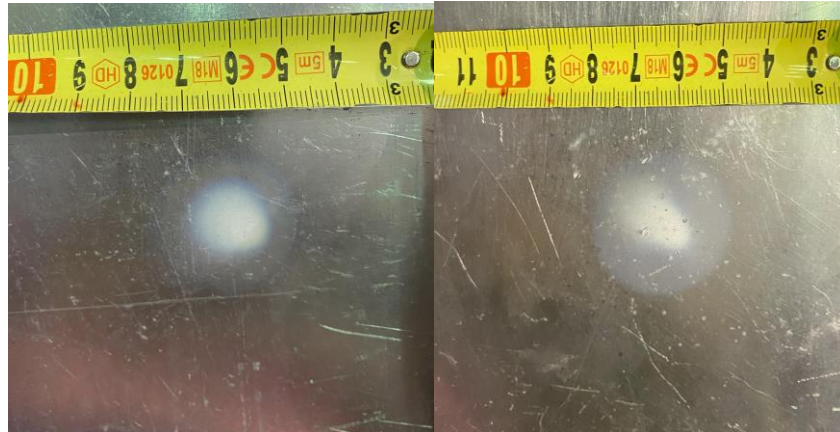
19. ábra: Indulási feszültség a DC- feszültség és adagolási sebesség függvényében

Az AC esethez hasonlóan az indulási feszültség nem mutat linearitást, azonban észrevehető, hogy míg váltakozó feszültség esetén a legalacsonyabb érték 7 ml/h adagolási sebességnél 7,7 kV volt, egyenfeszültséget alkalmazva egyik polaritás és adagolás esetén sem indult meg a szálképzés 8 kV alatt. A polaritások között szembevetendő különbség, hogy negatív esetben a szálképzés kisebb feszültségen indult el.

5.3.2 Szálképzett átmérő

A mérés célja, hogy az adott beállítások mellett pozitív és negatív póluson megmérjem a szálakkal lefedett terület átmérőjét és összehasonlítsam egymással,

valamint az AC esetén kapott eredményekkel. Az idő, a távolság és az adagolás változatlan a DC mérésekhez képest. A 20. ábra képein két egyenfeszültséggel képzett mintát láthatunk. A pontos átmérő meghatározása nem volt egyszerű feladat, ugyanis látható, hogy a gyűjtőn közepén koncentrálódik egy látványos folt és sok esetben egy halvány, nagyobb kör is megjelenik körülötte.



20. ábra: DC feszültségen képzett réteg

5.3.2.1 Pozitív póluson képzett átmérő

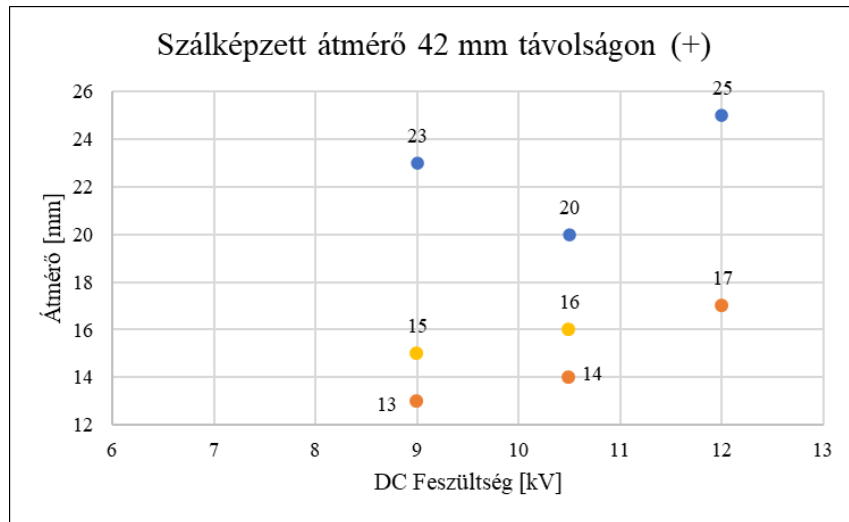
A pozitív póluson mért eredményeket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: DC feszültségen, pozitív polaritással képzett átmérők

Feszültség [kV]	Távolság [mm]	Szálképzési idő [perc]	Átmérő [mm]	Adagolás [ml/h]
9	42	2	13	3
10,5	42	2	14	3
12	42	2	17	3
9	42	2	15	5
10,5	42	2	16	5
12	42	2	cseppek	5
9	42	2	23	7
10,5	42	2	20	7
12	42	2	25 cseppek	7

Az AC mérésekkel ellentétben DC feszültséget alkalmazva a nagyobb adagolási sebességek mellett jelentkeztek a cseppek a gyűjtőn, ami ebben az esetben is a túl nagy alkalmazott feszültségnek tudható be. Összehasonlítva a korábbi eredményekkel, az

átmérő jelentősen kisebb minden esetben. A 21. ábra diagramján ábrázolva az eredményeket, további következtetések vonhatóak le.

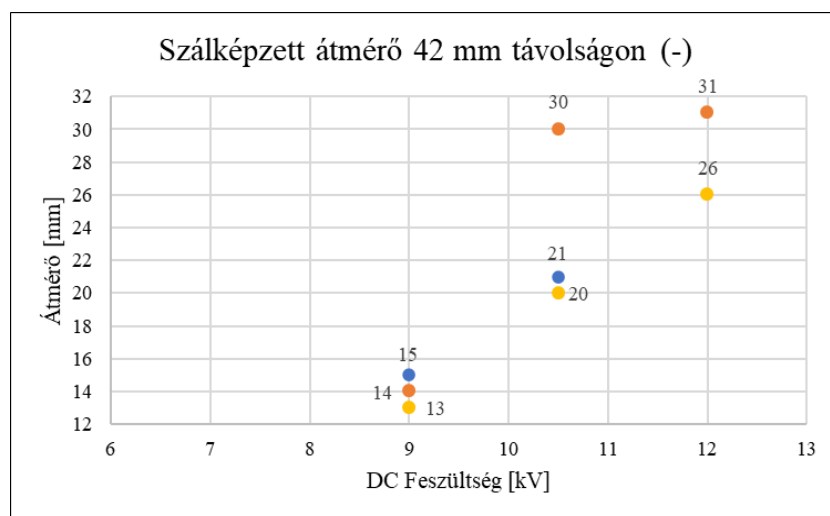


21. ábra: Képzett átmérő a pozitív DC feszültség és adagolási sebesség függvényében

Az előzőekhez hasonlóan a narancssárga jelölők a 3, a citromsárga az 5 és a kék a 7 ml/h adagolási sebességet jelöli. A diagramból látható, hogy az eredmények a szálképzési sebesség tekintetében is eltérnek a korábbi eredményektől, ugyanis pozitív polaritás mellett a legnagyobb átmérő 7 ml/h adagolási sebesség mellett voltak mérhetőek, míg a legkisebbek 3 ml/h adagolásnál.

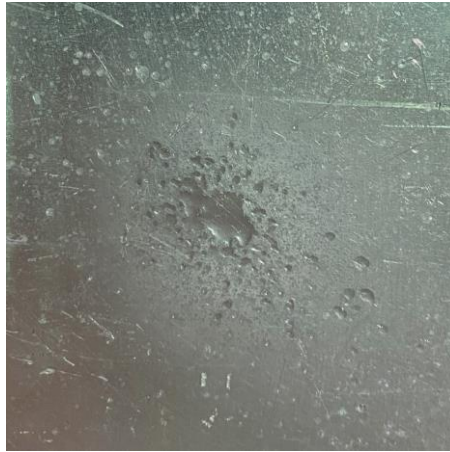
5.3.2.2 Negatív póluson képzett átmérő

A negatív pólussal mért eredményeket a 22. ábra diagramján ábrázoltam, ahol a színjelölések megegyeznek a korábbiakkal.



22. ábra: Képzett átmérő a negatív DC feszültség és adagolási sebesség függvényében

A cseppek megjelenése itt is a nagyobb adagolási sebességnél volt jellemző, 12 kV-on, 7 ml/h adagolás mellett a gyűjtőn szálképzett réteg helyett csupán oldat cseppek voltak láthatóak, ezt szemlélteti a 23. ábra. A feszültség másfél kV-al való növelése DC esetben is az átmérő növekedéséhez vezetett.



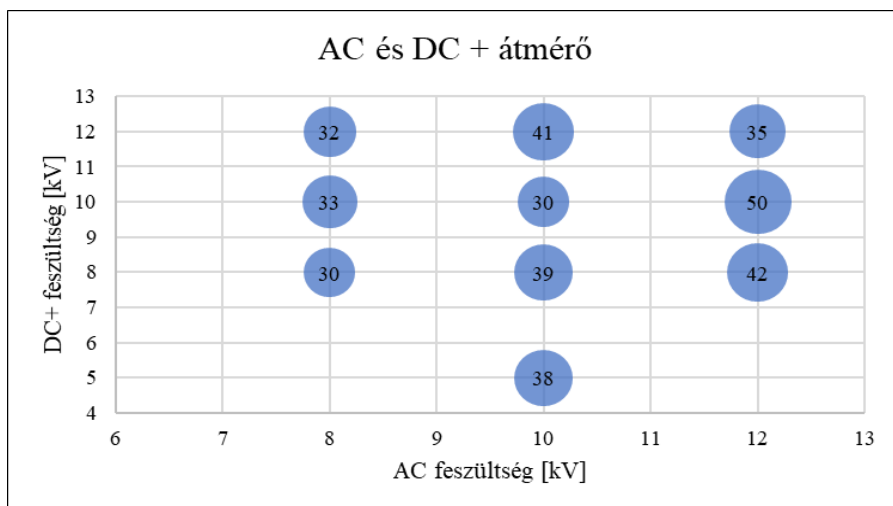
23. ábra: Csepplibák a gyűjtőn

5.4 DC feszültséggel eltolt AC feszültség

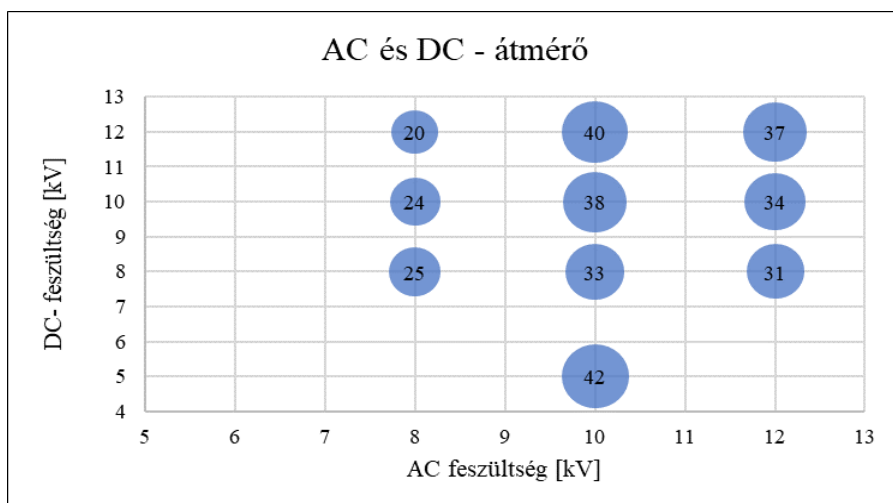
A korábbi fejezetekben láthattuk, hogy a tisztán egyen és váltakozó feszültség milyen hatással van a szálképzésre. A DC-vel eltolt AC esetében a mérés célja, hogy megvizsgáljam, milyen hatással van a feszültségek együttes alkalmazása a szálképzésre és a szálképzett átmérőre.

A mérés során a tüelektródot egyenfeszültséggel tápláltam, az adagolót a már korábban említett módszerrel, a csövet átszűrva földeltem, azonban ez a mérés kimenetére nem volt befolyással, csupán a berendezés védelme érdekében volt szükséges. A fém gyűjtő lapot váltakozófeszültségre csatlakoztattam. A vizsgálat egésze során két perces szálképzési idővel, 42 milliméteres elektródtávolsággal és 3 ml/h adagolási sebességgel dolgoztam, ugyanis ez bizonyult optimálisnak a korábbi eredmények alapján.

Első lépésként az AC feszültséget állandó szinten tartva növeltem a DC feszültséget, míg a szálképzés el nem indult. Legalacsonyabb 8 kV AC és 8 kV DC feszültség mellett működött a folyamat, így innen kezdődött a mérés, majd lépésenként növeltem a feszültséginteket. A vizsgálatot pozitív és negatív polaritás mellett is elvégeztem, az eredményeket diagramon ábrázoltam. A 24. ábra pozitív, a 25. ábra a negatív DC feszültséggel végzett mérések eredményeit tartalmazza.



24. ábra: Számképzett átmérő az AC és DC+ feszültség függvényében



25. ábra: Számképzett átmérő az AC és DC- feszültség függvényében

A tisztán AC és DC méréseknél láthattuk, hogy nagyjából 8 kV körül indult meg a számképzés, ez az érték a DC feszültséggel eltoltt AC esetén sem csökkent. Felmerülhet azonban, hogy a feszültségek arányát variálva melyik számképzési jelleg dominál, ugyanis láthattuk, hogy AC esetben a lefedett terület egyenletes, míg DC feszültséget alkalmazva a réteg közepre koncentrált. A két feszültség típusal való mérés a DC jelleget nem mutatta abban az esetben sem, amikor 8 kV AC és 12 kV DC feszültséggel végeztem el a mérést. A 26. ábra bal oldalán a 12 kV DC és 8 kV AC mérési eredménye látható, jobb oldalán pedig az 5 kV DC és 10 kV AC, a rétegek jellege a feszültségek arányától függetlenül hasonló.



26. ábra. DC feszültséggel eltolt AC feszültségen képzett réteg

6 Méretek és értékek növelése az elrendezésben

A DC feszültséggel eltolt AC feszültség alkalmazása esetén tapasztalt átmérő növekedés jelentős volt, így a további mérések során is ezt alkalmaztam. A vizsgálat célja az volt, hogy teszteljem, hogy az adagolós elrendezésben a távolság és feszültség növelésével mekkora átmérő növekedést lehet elérni.

Az korábbi méréseknél alkalmazott elrendezésben az elektródtávolságot 115 milliméterre növeltem és a feszültséget egy időben növeltem a két elektródon és kerestem azt az értéket, ahol a szálképzés már folyamatos. 24 kV AC és 24 kV DC feszültség esetén a legstabilabb szálképzést, így ezeken a feszültségértékeken tartva az elektródokat, változtattam az adagolás sebességét és mértem a képződött réteg átmérőjét. Az eredményeket a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat: Szálképzett átmérő megnövelt távolsággal és feszültséggel

AC - DC [kV]	Adagolás [ml/h]	Idő [mp]	Távolság [mm]	Átmérő [mm]
24-24	5	120	115	50
24-24	8	120	115	80
24-24	10	120	115	90

A szálképzési idő a korábbi mérésekhez hasonlóan 120 mp volt, az adagolási sebességet pedig 5 és 10 ml/h között változtattam. A szálképzett átmérő az adagolási sebesség növelésével nőtt, azonban míg 5 ml/h adagolásnál a működés stabil volt, 8 és 10 ml/h adagolási sebességnél már oldat cseppek is láthatóak voltak a működés közben és a keletkezett rétegen. A legnagyobb átmérő 90 milliméter volt, ami 10 ml/h adagolás mellett volt tapasztalható. A legnagyobb átmérő, amit még cseppmentesen, folyamatos szálképzéssel készült 50 milliméter volt, 5 ml/h adagolási sebesség mellett. A 27. ábra fotóján látható a mérés végeredménye.



27. ábra: DC feszültséggel eltolt AC feszültségen képzett minta növelt értékekkel

7 Konklúzió

A mérések során összeállított modellek a célnak megfelelően működtek, az oldatból gond nélkül képződtek szálak, azonban a vizsgált több tűs elrendezés esetében a legnagyobb hibaforrás a térerősség egyenetlen eloszlása volt. A túelektródok számának optimalizálásával és a megfelelő távolságok tartásával a probléma elkerülhető, azonban kis terület egyenletes lefedésére a módszer kevésbé alkalmas.

A feszültség típusának vizsgálata során az AC és DC feszültséggel képzett rétegek között jelentősen eltérések alakultak. Váltakozó feszültség alkalmazásával adott távolságon a szálképződés kisebb feszültségen indult meg, a keletkezett réteg eloszlása egyenetlesebb volt, valamint az átmérője is jelentősen nagyobb. AC esetben 30-40 milliméter közötti képzett átmérő volt a jellemző, míg DC esetén a maximális lefedett terület alig érte el a 30-31 millimétert. Az adagolási sebesség másként hatott a két mérés alkalmával, azonban a jelenség okának kiderítésére további, alaposabb vizsgálatok szükségesek. Az egyenfeszültség polaritás függése is tapasztalható, pozitív polaritást alkalmazva a szálakkal fedett réteg átmérője jellemzően nagyobb volt, mint negatív polaritás esetében.

DC feszültséggel eltolt AC feszültséget alkalmazva a szálképzés egyenletes volt, a képződött réteg is egyenletesen fedte le a területet, nem koncentrálódtak kis területre a szálak. A képzett réteg átmérője nagy szórást mutat, azonban az esetek nagy részében 30 milliméter feletti átmérő volt jellemző, bizonyos esetben pedig 40-50 milliméteres réteg is képződött cseppek megjelenése nélkül, ami felülmúlja mind az AC és DC esetben kapott eredményeket.

Növelve az elektródtávolságot és feszültséget, 24 kV AC és DC feszültségen, 10 ml/h adagolási sebesség mellett akár 80-90 milliméter átmérőjű réteg is mérhető volt, azonban a szálképzés ebben az esetben nem volt stabil, cseppesedés lépett fel. 5 ml/h adagolási sebességgel volt mérhető a legnagyobb, stabil működés mellett létrejövő átmérő, ami 50 milliméter.

Összegzés

A kutatás célja teljesült, mi szerint több módszert vizsgálva sikeresen növeltem az elektrosztatikus szálképzési technológia termelékenységét. Az egy cseppes modell alapján készült berendezés működőképessége a tervezettnél megfelelő, az oldat cseppekben a DC táplálás hatására kialakulnak a szükséges töltések és a szálak egyenletesen, hibamentesen képződnek akár több tű alkalmazása mellett is. Bár az általam vizsgált elrendezés a mérési céljaimnak nem felelt meg, a több tűs megoldás ideális lehet ipari környezetben, nagyobb terület egyidejű lefedésére, esetleg párhuzamosan, nagyobb távolsággal több réteg egy idegű lefedésére.

Azonos paraméterek mellett végeztem méréseket AC és DC feszültséggel táplált elrendezéseken, majd az eredményeket összehasonlítva következtetéseket vontam le. Sikeresen alkalmaztam DC feszültséggel eltolt AC feszültséget az elrendezésen és egyenletes szálképzés mellett vizsgáltam a folyamat végeredményét, ami rendkívül jó eredményekhez vezetett. A termelékenység növelése szempontjából a legjobb eredményt is ebben az esetben értem el, ami akár az 50 milliméteres átmérőjű lefedett terület 10 kV pozitív polaritású DC és 12 kV AC feszültség, 3 ml/h adagolási sebesség vagy megnövelt távolság, 24 kV AC és DC feszültség és 5 ml/h adagolási sebesség mellett.

Összességében a mérések alatt azt tapasztaltam, hogy a váltakozófeszültség pozitív hatással van a szálképződésre, egyenletesebb, nagyobb területet lefedő réteg érhető el vele végeredményként, ami számos alkalmazási terület hasznára válhat.

A kutatás folytatásaként érdemes lehet további méréseket végezni több tűs elrendezéssel AC vagy esetleg DC feszültséggel eltolt AC feszültséggel táplált elrendezésen is. A termelékenység további vizsgálatát az AC feszültség paramétereinek változtatásával folytatni, mint például a frekvencia vagy amplitúdó.

Köszönetnyilvánítás

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

Irodalomjegyzék

- [1] Wang, Y., Yokota, T., & Someya, T. (2021). *Electrospun nanofiber-based soft electronics*. *NPG Asia Materials*, 13(1), 22.
- [2] Gao, Y., Bach Truong, Y., Zhu, Y., & Louis Kyratzis, I. (2014). *Electrospun antibacterial nanofibers: Production, activity, and in vivo applications*. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(18).
- [3] *What is electrospinning?* (2023). Retrieved from <https://www.nanoscience.com/techniques/electrospinning/> (Felkeresve: 2023.11.01.)
- [4] Collins, G., Federici, J., Imura, Y., & Catalani, L. H. (2012). *Charge generation, charge transport, and residual charge in the electrospinning of polymers: A review of issues and complications*. *Journal of Applied Physics*, 111(4), 044701.
- [5] Park, S., Park, K., Yoon, H., Son, J., Min, T., & Kim, G. (2007). *Apparatus for preparing electrospun nanofibers: designing an electrospinning process for nanofiber fabrication*. *Polymer International*, 56(11), 1361-1366.
- [6] Suresh, S., Becker, A., & Glasmacher, B. (2020). *Impact of apparatus orientation and gravity in electrospinning—A review of empirical evidence*. *Polymers*, 12(11), 2448.
- [7] Sivan, M., Madheswaran, D., Valtera, J., Kostakova, E. K., & Lukas, D. (2022). *Alternating current electrospinning: The impacts of various high-voltage signal shapes and frequencies on the spinnability and productivity of polycaprolactone nanofibers*. *Materials & Design*, 213, 110308.
- [8] *Yflow® coaxial electrospinning & electrospraying tech.* (n.d.). <http://www.yflow.com/technology/coaxial-electrospinning/> (Felkeresve: 2023.11.01.)
- [9] Al-Abduljabbar, A., & Farooq, I. (2022). *Electrospun Polymer Nanofibers: Processing, Properties, and Applications*. *Polymers*, 15(1), 65.
- [10] Torres-Martínez, E. J., Cornejo Bravo, J. M., Serrano Medina, A., Pérez González, G. L., & Villarreal Gómez, L. J. (2018). *A summary of electrospun nanofibers as drug delivery system: Drugs loaded and biopolymers used as matrices*. *Current drug delivery*, 15(10), 1360-1374.
- [11] Kenawy, E. R., Bowlin, G. L., Mansfield, K., Layman, J., Simpson, D. G., Sanders, E. H., & Wnek, G. E. (2002). *Release of tetracycline hydrochloride from electrospun poly (ethylene-co-vinylacetate), poly (lactic acid), and a blend*. *Journal of controlled release*, 81(1-2), 57-64.
- [12] Vasita, R., & Katti, D. S. (2006). *Nanofibers and their applications in tissue engineering*. *International Journal of nanomedicine*, 1(1), 15-30.

- [13] Lu, T., Cui, J., Qu, Q., Wang, Y., Zhang, J., Xiong, R., ... & Huang, C. (2021). *Multistructured electrospun nanofibers for air filtration: a review*. ACS Applied Materials & Interfaces, 13(20), 23293-23313.
- [14] 2022, S. by I. 25. (2022, June 8). *Filtration applications of Electrospun nanofibers*. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5664> (Felkeresve: 2023.11.01.)
- [15] 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.
- [16] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. (2022) - *Maszkok szűrőképességének növelése és vizsgálata electrospinning technológia használatával*, BME-VIK Tudományos Diákköri Konferencia 2022
- [17] Beaudoin, É. J., Kubaski, M. M., Samara, M., Zednik, R. J., & Demarquette, N. R. (2022). *Scaled-up multi-needle electrospinning process using parallel plate auxiliary electrodes*. Nanomaterials, 12(8), 1356.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Li, Y., Dong, A., & He, J. (2020). *Innovation of critical bubble electrospinning and its mechanism*. Polymers, 12(2), 304.
- [21] *Custom Multi-Nozzle Devices*. Forrás: http://www.yflow.com/services/custom_devices/ (Felkeresve: 2023.11.01.)
- [22] 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.
- [23] *Commercial nanofibre production: Stellenbosch University*. (n.d.). Retrieved from <https://innovation.ox.ac.uk/success-stories/commercial-nanofibre-production-stellenbosch-university/> (Felkeresve: 2023.11.01.)
- [24] 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.
- [25] He, H., Wang, Y., Farkas, B., Nagy, Z. K., & Molnar, K. (2020). *Analysis and prediction of the diameter and orientation of AC electrospun nanofibers by response surface methodology*. Materials & Design, 194, 108902.

- [26] TEO, W.-E. (2023. 03 14). *Alternating Current (AC) Electrospinning*. Forrás: <http://electrospintech.com/acelectrospinning.html>
- [27] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. (2022) - *Maszkok szűrőképességének növelése electrospinning technológia használatával*, Mechwart András Ifjúsági Találkozó 2022
- [28] 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.
- [29] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. - *Elektrosztatikus szálképző berendezés készítése és a működést befolyásoló paraméterek vizsgálata*, Energiagazdálkodás folyóirat, 2023. 3-4.lapszám
- [30] Cselkó, R., Pózmán, R. A., & Székely, L. (2023, June). *Electrospinning with non-DC voltages*. In 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) (pp. 1-4). IEEE.
- [31] Pózmán, R. A., Székely, L., & Cselkó, R. (2023) - *Elektrosztatikus szálképzési technológia működési paramétereinek vizsgálata*, Mechwart András Ifjúsági Találkozó 2023 (publikálás folyamatban)