

Az elektromos szálhúzás technikájának bemutatása

An introduction to the electrospinning technique

Juhász Ákos György PhD hallgató

Semmelweis Egyetem, Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet, Nanokémiai Kutatócsoport

juhasz.akos@med.semmelweis-univ.hu

Initially submitted Sept 15, 2021; accepted for publication Sept.28, 2021

Abstract

The history of the electrospinning technique started couple of centuries ago. The technique has evolved continuously, and found more and more applications. As science has progressed, the physical phenomena involved in the formation of fibres have been more and more precisely defined, thus creating equipment to meet different needs. Nowadays, not only microfibres but also nanofibres can be created while using this method, making it possible to create materials suitable also for biomedical applications. The growing interest is reflected in the increasing number of publications too. This brief review concerns the main milestones of history of electrical fibre drawing and the various fibre formation methods used today.

Keywords: electrospinning, biopolymer, history

kulcsszavak

elektromos szálhúzás, biopolimer, történelem

keywords

electrospinning, biopolymer, history

Bevezetés

Rendkívül sok helyen találkozhatunk polimerekkel, gyakorlatilag körül ölelik a mindennapjainkat. A szemeteszsáktól kezdve, a szeretett mobiltelefonunkon át a szervezetünkben is megtalálható biopolimerekig mindenhol ott vannak. Nem is gondolnánk, mennyiféle polimert használnak a legkülönbözőbb felhasználási módokra az orvostudományban és a gyógyszer tudományban is – gondolok itt a sokakat érintő kontaktlencsére, a különféle protézisekre, illetve a gyógyszerhatóanyag vivő tablettákra. Hosszasan sorolhatnánk még, ráadásul a fejlődés folyamatos, újabb és újabb felhasználási módok reményében zajlik a folyamatos kutatás. Természetesen a szervezetben csak olyan polimereket használhatunk fel, melyek biokompatibilisek (azaz nem okoznak immunreakciót) és biodegradábilisak (szerepük betöltése után lebomolva beépülnek, vagy éppen kiürülnek a szervezetből).

A szövetmérnökség a regeneratív medicinán belül foglalkozik azzal, hogyan lehet mesterségesen szöveteket, a későbbiekben akár majd szerveket is létrehozni ilyen polimerekből. A minket is felépítő extracelluláris mátrix alakjához hasonló szálak struktúráját hoznak létre, és erre ültetik a páciensből korábban kinyert sejteket, majd vissza tudják ültetni a hiányzó terület pótlásaként.

Sokszor halljuk a nanotechnológia szót, és valamilyen tudományos fantasztikumra, elérhetetlen dologra gondolunk, miközben manapság a nanotechnológia az egyik legintenzívebben fejlődő tudományág. Amennyiben a már említett szálak struktúrákat szeretnénk létrehozni, a nanotechnológia lehet segítségünkre, azon belül is az ebben a cikkben bemutatni kívánt elektromos szálhúzás technikája, mellyel mikro- és nanoszálak rendszerek hozhatók létre. Bár a berendezés maga igen egyszerűnek tűnhet, a technológia háttere, illetve a különböző paraméterek hatásaival érdemes tisztában lennünk, mert csak ezeknek az ismereteknek a birtokában tudunk sikeresen szálak rendszereket létrehozni.

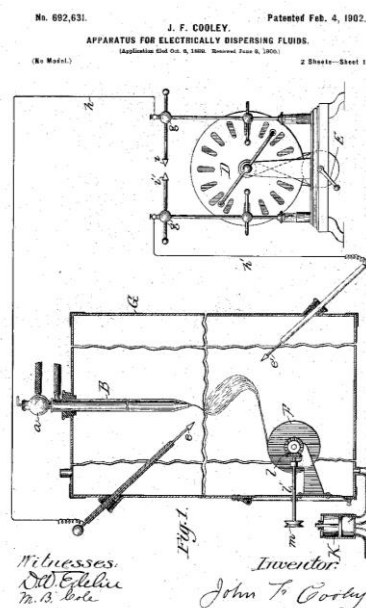
Bár egyre több szakcikk és könyv áll már rendelkezésre, ezek többsége kizárólag angolul érhető el, így ennek a cikknek a megírásával az volt a céлом, hogy minél több hazai ember ismerje meg ezt a nagyszerű technikát.

Az elektromos szálhúzás kialakulásának rövid története

Az elektromos szálhúzás története egészen az 1500-as évekig követhető vissza, amikor is William Gilbert (1544-1603) orvos, fizikus, természetfilozófus - aki I. Erzsébet orvosa is volt - elektromos és mágneses jelenségek vizsgálatával írta be nevét a tudományba. Először írta le a folyadékcseppek elektrosztatikus térben történő alakváltozását. Megfigyelte, hogy ha egy borostyán rudat megdörzsöl és közelít egy folyadék csepphez, a gömb alakú folyadék csepp kúp alakot vesz fel a borostyán rúd irányába nézve. Rájött arra, hogy az elektromos tér hatására a csepp felületén töltések indukálódnak, így a folyadék felületi feszültségével ellentétes elektrosztatikus erő hatására létrejöhet az említett alakváltozás. E felfedezés alapján hoztak létre először aeroszolt 1745-ben elektrosztatikus porlasztással módszerrel, ami pedig az elektromos szál előfutára volt. (Kny et al., 2018)

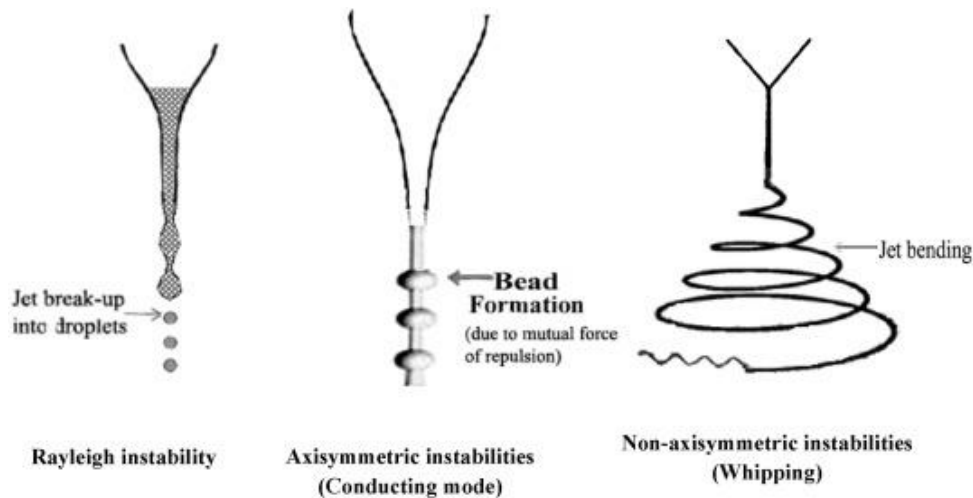
Giovanni Battista Beccaria (1716-1781) az 1753-as munkájában beszámol arról, hogy az elektromosan töltött folyadék hamarabb elpárolog, mint abban az esetben, ha nem alkalmazunk töltést. Ezután tagja lett a Royal Societynek. Louis Schwabe selyemgyártó hozott létre egy olyan extrudáló fűvókát, amivel már szálakat tudott létrehozni. Ezt követően főként különböző anyagok mesterséges előállítását helyezték előtérbe, a technológia nem fejlődött kellő ütemben. (Tucker et al., 2011) John William Strutt Rayleigh (Lord Rayleigh)(1842-1919) brit Nobel-díjas fizikus, Gilbert felfedezései után 300 évvel később számította ki a folyadékcsepp minimum töltését, ami szükséges ahhoz, hogy legyőzze a felületi feszültségét és létrehozzon egy folyadéksugarat. (Rayleigh, 1882)

Az első elektromos szálhúzásra alkalmazott készülék szabadalmát John Francis Cooley nyújtotta be 1899-ben az egész világra kiterjedően (US692631A) amit nagyfeszültséggel létrehozott fonál gyártásához alkotott meg. Már ebben a korai technológiai szakaszban felhívta a figyelmet arra, hogy az optimális szálképzéshez megfelelően viszkózus oldatra van szükség, az oldószernek elég volatilisnek kell lennie, hogy a végtermékben már ne legyen jelen, illetve a szükséges elektromos térnek egy megadott tartományban kell lennie. Négy különböző elektromos szálhúzásra alkalmas fejet javasolt, egy konvencionális fejet, egy koaxiális fejet, egy légbefúvásos illetve egy forgó fonófejet. Szabadalmaiban Wimshurst-féle generátorral állította elő a feszültséget és nitrocellulózt használt éterben a kísérleteihez. (Lin & Wang, 2013; Tucker et al., 2011)



1. ábra A Cooley által benyújtott szabadalomban található elektromos szálhúzó berendezés ábrája (<https://patents.google.com/patent/US692631A/en>) 2021.11.01

A huszadik század elején John Zeleny (1872-1951) amerikai fizikus, folyadékcseppek viselkedését vizsgálta fém kapillárisok végén, 1914-es munkájában. E munka nyomán indul meg a matematikai modell felállítása az elektrosztatikus tér és a folyadék kölcsönhatásának leírásának. Az elektromos szálhúzás valódi kezdete Anton Formhals (1887-1956) német mérnök nevéhez fűződik, aki összesen 22 szabadalmat adott be a témában, 1931 és 1944 között. Ezek a szabadalmak főleg textilipari felhasználást célozták meg. Folyamatosan finomította tapasztalatai alapján a szálképzésre használt eszköz komponenseinek elrendezését és egyre jobban kontrollálni tudta az elkészült szálak hosszát, átmérőjét. A Gilbert által már feljegyzett kúp jelenséget (De Magnete, 1600) az 1960-as években Sir Geoffrey Ingram Taylor (1886-1975) brit fizikus, matematikus kezdte el vizsgálni és ért el jelentős előrelépést az elektromos szálhúzás elméleti alapjaiban. Matematikai modellt állított fel az elektromos térben kialakuló kúp jelenségre, amit az ő tiszteletére ma Taylor kúpnek nevezünk. Arra is rájött, hogy a kialakuló folyadéksugár kétféle instabilitással rendelkezik, ami a Rayleigh a másik pedig az ostorozó mozgás. (Kny et al., 2018; Liu & Wang, 2019; Stranger et al., 2005; Tucker et al., 2011; Zeleny, 1914)

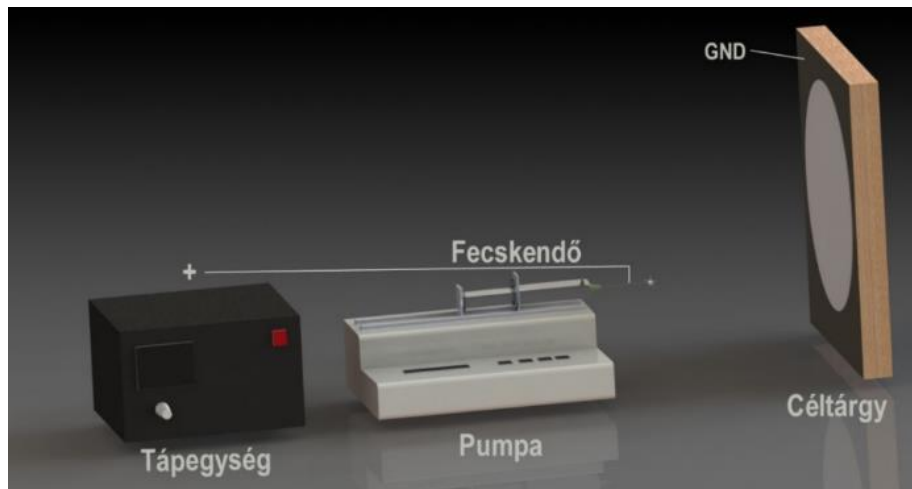


2. ábra Különböző instabilitások az elektromos szálhúzás során (Bagchi et al., 2015)

Az 1970-es években Peter K. Baumgarten (1926-2000) kitalált egy módszert arra, hogy az elektromos szálhúzás során létrejövő szálakat a levegőben történő repülésük során fényképezni lehessen, illetve vizsgálta a szálképzést befolyásoló paramétereket úgy, mint a viszkozitás, áramlási sebesség és feszültség. 1993-ig nem történt előrelépés, amikor is Jayesh Doshi és Darrel H. Reneker az elektrosztatikus porlasztás vizsgálatok során rájöttek arra, hogy nagyon könnyen lehet nanométer átmérőjű szálakat is létrehozni. Tőlük származik az electrospinning név, amit ebben a cikkben magyarul elektromos szálhúzásként hívok. Említésre méltó még Alexander L. Yarin munkája, aki kollégáival meghatározta az elektromos szálhúzás során kialakuló különböző instabilitási régiókat. Az elmúlt évtizedekben ugrásszerűen nő a kutatások száma mind a technikai, mind pedig az alkalmazhatóságuk terén, több mint 100 féle polimerből hoztak létre szálak struktúrákat szintetikus, természetes polimerekből, illetve keverékekből. (Kny et al., 2018; Liu & Wang, 2019; Stranger et al., 2005; Tucker et al., 2011; Yarin et al., 2001)

Az elektromos szálhúzás alapja

Az elektromos szálhúzás technikája segítségével nano- és mikroszálak hozhatók létre, melyhez szükség van egy viszkozus polimer oldatot tartalmazó tartályra (általában ez egy fecskendő), egy nagyfeszültségű tápegységre, egy szálképző fejre (ez általában egy fecskendő), illetve egy kollektorra, ahol összegyűjtjük a véletlenszerűen becsapódó szálakat, amit az ábrán is láthatunk.



3. ábra A konvencionális elektromos szálhúzás vázlatos ábrája

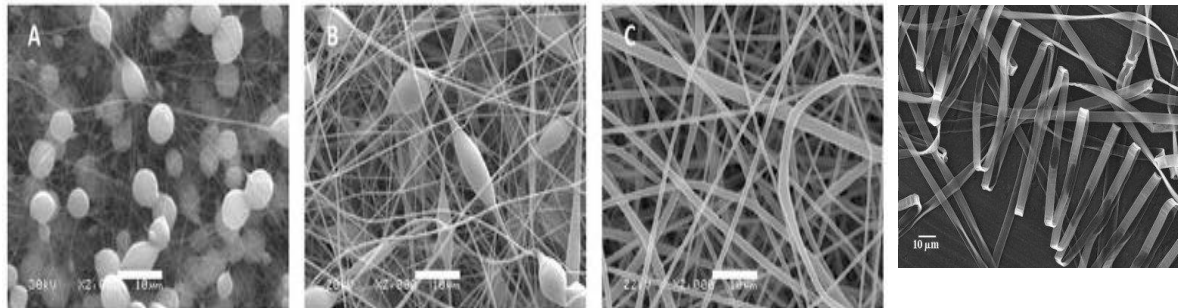
A nagyfeszültségű tápegység pozitív pólusát a fecskendőtüre kötjük, így a tű és a földelt céltárgy között kialakuló potenciálkülönbség fogja létrehozni számunkra a szükséges elektromos teret. A fecskendőből kiáramló viszkózus polimeroldatot egy fecskendőpumpával tudjuk szabályozni. A fecskendőtű végén megjelenő Taylor-kúpból elinduló vékony polimer szál ostorozó mozgást végezve a repül a céltárgy felé, ideális esetben útja során elpárolog az oldószer, és a céltárgyon már egy száraz, oldószermentes, szálás, pókhálószerű struktúrát kapunk. Ez az összeállítás véletlenszerű elrendezést tesz lehetővé, így az extracelluláris mátrixhoz hasonló komplex struktúrát tudunk létrehozni. (Agarwal et al. 2008; Samal et al. 2015)

A szálképzés befolyásoló paramétere

A sikeres szálképzést rendkívül sok paraméter befolyásolja, melyek egymásra is hatnak, így rendkívül időigényes folyamat lehet az optimalizálási folyamat. A következőkben ezeket a befolyásoló paramétereket mutatom be röviden.

A felhasznált oldat anyagi tulajdonságaiból adódó paramétereket említeném elsőként, és azon belül is az egyik legfontosabbat az oldat koncentrációját. Amennyiben az alkalmazott oldat koncentrációja alacsony, úgy szálképzés nem jön létre, a már említett elektrosztatikus porlasztás áll fenn és mikro vagy nano cseppeket, részecskéket tudunk előállítani. Ha növeljük a koncentrációt, megfigyelhetjük, hogy a cseppek mellett már szálak is megjelennek. Optimális koncentrációnál homogén szálás struktúrát kapunk. Ha ezt a koncentráció még tovább növeljük, akkor helikális szalagok alakulnak ki. Az oldat viszkozitása is beállítható a koncentráció változtatásával. (Li & Wang, 2013)

Egy másik kritikus paraméter a felhasznált oldat viszkozitása. Alacsony viszkozitásnál folyamatos, sima szálak nem hozhatóak létre, azonban a túl nagy viszkozitás sem ideális ugyanis ebben az esetben nagyon



4. ábra Az elektromos szálhúzás során létrejövő különböző formák a) gyöngyök b) a szálakon megjelenő gyöngyök c) szálak (Ruiter et al., 2017) d) szalagok (Yarin et al., 2001)

nehezen lehet „reptetni” a kialakuló szálakat a szálképző fej és a céltárgy között. A polimer molekulatömegének is fontos szerepe van, amely az oldat viszkozitását határozza meg. Ha a koncentrációt fixáljuk, egy bizonyos molekulatömeg alatt cseppképződés tapasztalható. A szálképzéshez szükséges érték felett pedig szalagok jönnek létre. Ha túl nagy a molekulatömeg, már alacsony koncentrációnál is szalagokat hozhatunk létre. A felületi feszültség a viszkozításra hat, valamint a szálak morfológiát is befolyásolhatja. (Mitchell, 2014; Stranger et al., 2005)

Az elektromos szálhúzás során a polimeroldat a nagy elektromos tér hatására polarizálódik, szabad elektronok, ionok vagy ionpárok töltéseket fognak hordozni a folyadékon belül és egy elektromos kettős réteg fog kialakulni az ionok mobilitása miatt. Az oldat vezetőképessége a polimertől, az oldószerrel és további adalékanyagoktól függ. Általában a természetes polimerek polielektrolitok, így az ionok növekedésével nő a polimer töltéshordozó képessége, magasabb alkalmazott feszültséget igényelve, ami pedig rosszabb szálképezhetőséget eredményez a szintetikus polimerekhez képest. A vezetőképesség beállítható különböző sók, másodlagos oldószer vagy akár nanorészecskék adagolásával. Általánosságban elmondható, hogy a vezetőképesség növelésével vékonyabb szálak eredményezhetők. (Li & Wang, 2013; Rutledge & Fridrikh, 2007)

Napjainkban egyre nagyobb figyelmet kap a nanorészecskékkel kombinált szálak struktúrák létrehozása. Ezüst nanorészecskék adagolásával olyan mesterséges hálós rendszert hozhatunk létre, mely antibakteriális hatást eredményez a létrejövő szálak struktúrájának, vagy akár mágneses tulajdonságot is kölcsönözhetünk magnetit adagolásával (An et al., 2009; Dubey & Gopinath, 2016; Jedlovszky-Hajdu et al., 2016; Rai et al., 2009; Zhuang et al., 2010).

Mint ahogyan már a korábbiakban említésre került, az alkalmazott elektromos térnek van egy kritikus potenciál értéke, ahol is az elektromosan vezető folyadékcsepp egy kúpszerű alakot ölt, (Taylor-kúp) és ennél az értéknél jöhet létre a szálképződés, így a megfelelő érték elérése kulcsfontosságú. Azonban a szálátmérőre gyakorolt hatása egyelőre eléggé vitatott, polimerektől és különböző koncentrációktól függ. A fecskendőből kiáramló polimeroldat áramlási sebességét is érdemes kellő gondossággal megválasztani, ugyanis ez határozza meg, hogy mennyi időt tud az oldat a fecskendőben tölteni ahhoz, hogy polarizálódni tudjon. Általánosságban elmondható, hogy alacsonyabb áramlási sebesség az ideális, ha túl nagy ez az érték akkor cseppképződés, illetve vastagabb szálak tapasztalhatóak. (Ding et al., 2019)

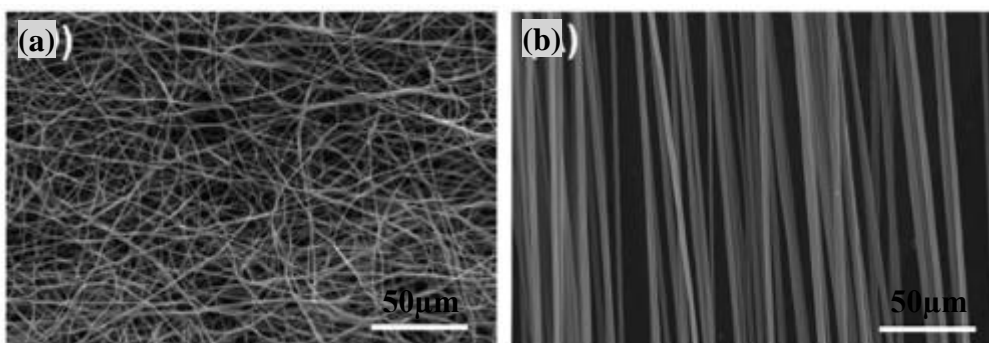
A kialakuló szálak átmérőjét a céltárgy és a szálképző fej közti távolsággal is szabályozhatjuk, de ezt is mint mindent egy megadott optimális tartományban. Ha a távolság nem elég nagy, nincs elég idő arra, hogy az oldószer elpárologjon, ha pedig túl nagy, akkor pedig gyöngyök alakulnak ki. Az oldószer kiválasztásnál annak illékonyására is figyelemmel kell lennünk, valamint ez is befolyásolja a választható távolság értékét. (Li & Wang, 2013)

Sokszor nem áll módunkban a környezeti körülményeket szabályozni, azonban ezek változásai is jelentősen befolyásolhatják a szálképzés eredményességét. Ezek a hatások lehetnek a hőmérséklet, a páratartalom, a nyomás, a légáramlás, illetve a levegő összetétele. A hőmérséklet főként a viszkozításra hat így pedig a szálátméret csökkenheti, de más paraméterekre is hatással lehet. A páratartalom főként az oldószer párolgására hat, így pedig a szálak porozitását befolyásolja. A magas páratartalom vastag szálakat eredményez, mivel a szálon lévő töltéseket kioltja és a húzóerő kisebb lesz. (Mitchell, 2014; Stranger et al., 2005)

A szálképzési paraméterek hatásának bemutatását még igen hosszasan lehetne taglalni, így csak a legalapvetőbbek kerültek röviden bemutatásra. Fontos kiemelni, hogy a technika alkalmazása, a paraméterek beállítása kellő körültekintést igényel, így biztosítható az, hogy a végtermék kívánt tulajdonságai minden esetben reprodukálható legyen.

Különböző szálképzési elrendezések

A korábban bemutatott egyszerűen megvalósítható konvencionális elektromos szálhúzási technika használatával sík céltárgyon összegyűjtve a szálakat, rendkívül vékony, filmszerű réteget alakíthatunk ki. Általában egyféle vagy kompozit polimer nanoszálak létrehozására használják. Lehetőség van úgynevezett mag-héj (core-shell) szálak létrehozására is, valamint hierarchikus struktúrák előállítására is. Ez az eljárás az egyik legelső és legelterjedtebb - főként kutatólaborokban - az egyszerűen beszerezhető és összeállítható berendezése miatt. Azonban a produktivitás rendkívül alacsony, nagy méretű gyártásra nem alkalmas. A kialakuló instabilitás teljesen kaotikus, így véletlenszerű szálakat hozhatunk létre, de lehetőség van orientált szálakat is létrehozni különböző céltárgyak használatával vagy segédelektrodokkal. Az egyirányban orientált nanoszálak általában nagyobb mechanikai terhelést bírnak ki, és egyedi optikai valamint elektromos tulajdonságokkal bírhatnak. (Liu & Wang, 2019)



5. ábra Pásztázó elektronmikroszkópiás felvételek a) véletlenszerű struktúra b) orientált struktúra (Batnyam et al., 2017)

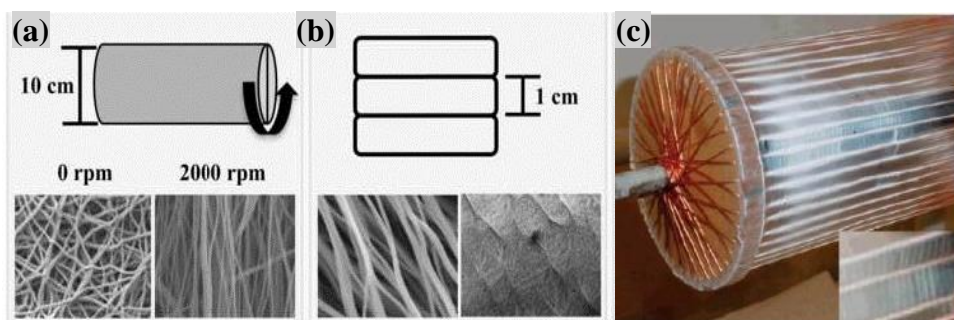
Több tű együttes használatával a termelékenység felgyorsítható, azonban még ez sem alkalmas ipari szintű előállításához. A tűk között kialakuló elektromos tér nem mindig egyenletes, bizonyos területeken ki is

olthatják egymást, ami egyenetlen szállerakódást eredményez. Gyakori jelenség még a fecskendőtü eldugulása, így különböző tű nélküli technikákat fejlesztettek ki. Az egyik ilyen technika a vattacukor készítésnél használt centrifugális szálképzés, ami kiegészíthető elektromos tér alkalmazásával, így alacsony feszültség és alacsony sebesség mellett is néhány száz nanométeres szálat lehet előállítani, valamint igény esetén orientált szálat is. (Li & Wang, 2013)

Már Cooley is adott be szabadalmat a polimeroldatban forgó fűrészfogazott tárcsáról. Ebben az esetben nincs szükség fecskendőre és adagolásra, a fűrészfogakra folyamatosan rátapadó polimer cseppekről indul a szálképzés. Természetesen más geometriájú forgó szálképző fej is alkalmazható, úgy mint gömb, henger, spirál stb. Előnye ezeknek az eljárásoknak, hogy a tű nem tud eldugulni, illetve nő a termelékenység, mivel több helyen megjelenő Taylor-kúpokból indul meg a szálképzés, azonban a szálok morfológiáját nehezen lehet szabályozni, és a gyakran létrejövő gyöngyök tönkreteszik a végterméket. (Lin & Wang, 2013)

Láthattuk, hogy a szálok ostorozó mozgással haladnak majd véletlenszerűen csapódnak a céltárgyba. Az olvadék alapú elektromos szálhúzás során az oldószer mennyisége csökkenthető, valamint az olvadék egyenes sugárban halad, így alkalmas 2D struktúrák létrehozására is. Még finomabb szákkal hozhatunk létre ilyen struktúrákat a rövidtávú elektromos szálhúzás használatával. Ebben az esetben a tű és a céltárgy távolsága 5mm-nél kisebb, így az ostorozó mozgás nem tud létrejönni. Mivel ezek a technikák nem alkalmazhatóak a konvencionális elektromos szálhúzás sikeresen használható polimerek mindegyikére, így használatuk sem elterjedt. (Mitchell, 2014)

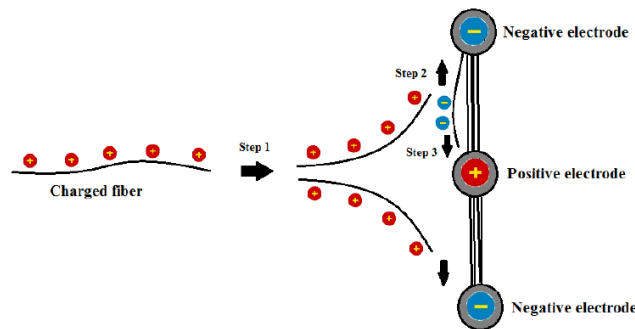
A céltárgy geometriájának megválasztásával létre tudunk hozni orientált szálat. Egyre inkább elterjedt a forgódob használata, amellyel adott esetben nem csak orientálni tudjuk a szálat, de sokkal homogénebb lesz a szálok eloszlása, mint a sík kollektor esetében. Amennyiben a forgódobot elég nagy sebességgel forgatjuk, a szálok egymáshoz képest párhuzamosan fognak a céltárgyon rendeződni. Néhány polimer esetében még ez sem okozott orientációt, úgyhogy egy henger formába párhuzamosan elhelyezkedő drótokból felépülő céltárgyat hoztak létre, így már a drótok között kifeszült szálok orientációját sikerült elérni. Sok esetben a céltárgy önmagában még nem fog orientáltsághoz vezetni, a polimer tulajdonságai, a koncentráció, hőmérséklet, páratartalom, áramlási sebesség stb. együttes optimális értékei kelljenek hozzá. (Alfaro De Prá et al., 2017; Katta et al., 2004; Neves, 2012)



6. ábra Különböző forgódob típusok a) forgódob mint céltárgy b) párhuzamosan elhelyezkedő drótok (Alfaro De Prá et al., 2017) c) párhuzamos drótok alkotta forgódob (Katta et al., 2004)

Orientációt létre tudunk hozni ellentétes pólusú elektródák alkalmazásával, így a képen látható módon a két elektróda között fognak kifeszülni az érkező szálok. Sokszor az is problémát okoz, hogy túl nagy felületen terül szét a kapott szálak struktúra, azonban a céltárgyat már nem tehetjük közelebb a

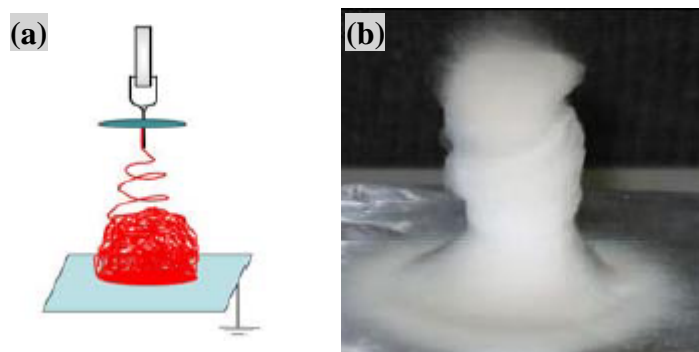
szálképzés helyéhez, így úgynevezett elektrosztatikus lencse használatával az elektromos tér méretét csökkenthetjük, így kisebb felületen fognak a szálak becsapódni a céltárgyba. (Buttafoco et al., 2006; Haseeb, 2011)



7. ábra Ellentétes pólusú elektródok alkalmazása orientált szálak létrehozása céljából (Haseeb, 2011)

A létrejövő szálak struktúra funkcionálizálható nanorészecskékkel például antibakteriális hatás céljából vagy karbon nanocsövek adagolásával a mechanikai tulajdonságot lehet növelni, illetve elektromosan vezető szálakat lehet létrehozni. Különböző sók hozzáadásával a vezetőképességet, illetve a viszkozitást szabályozhatjuk, így a szálképezhetőséget növelhetjük, valamint a kialakuló szálátmérőre is hatással lehetünk. Sók adagolásával orientációt is tapasztaltak, illetve a kialakuló szálak között pókhálószerű nanostruktúrát. (Barakat et al., 2009; Gao et al., 2014; Pant et al., 2011)

Különböző adalékanyagok jelenlétében érdekes vattacukorszerű háromdimenziós kiterjedéseket tapasztaltak. (Jedlovsky-Hajdu et al., 2016; Juhasz et al., 2020; Sun et al., 2012; Yousefzadeh et al., 2012) Egyre nagyobb figyelem kíséri az ilyen struktúrákat, azonban jelen pillanatban még nem tárták fel a kialakulás pontos okát. Valószínűsíthető, hogy a töltések felhalmozódása, az oldat alkotóelemeinek kölcsönhatása vagy az elektromos térre gyakorolt hatás okozza ezt a jelenséget. Az eddigi tapasztalatok alapján úgy gondolják, hogy a szálakon töltések halmozódnak fel, a kollektorral való érintkezés során ellentétes töltések váltják a korábbi töltéseket, így a kollektor taszítani fogja őket, illetve taszítják egymást. Ennek eredményeképp nem simulnak rá a kollektorra, hanem az idő múlásával egyre nagyobb, a képen is látható struktúra jön létre. A már említett elektrosztatikus lencse alkalmazásával kisebb területen gyűlnek fel a szálak, így a kialakulási folyamat meggyorsítható. Az utóbbi időben a 3D nyomtatás is megjelent a különféle kutatásokban és segítségével például a kialakuló 3D struktúrának tudtak adni különböző alakot. (Cai et al., 2013; Sun et al., 2012; Vong et al., 2018; Yousefzadeh et al., 2012)



8. ábra Elektrosztatikus lencse használata 3D struktúra létrehozása céljából, a) sematikus ábra, b) végtermék (Yousefzadeh et al., 2012)

Összegzés

Az előbbieken megismerkedtünk az elektromos szálhúzás kialakulásával, illetve összetevőivel. Láthattuk, hogy mennyi paraméter optimális beállítása szükséges ahhoz, hogy sikeresen állíthassunk elő mikro- vagy nanoszálal rendszereket. A technológia folyamatosan fejlődik, és manapság már nemcsak a kutatást segíti, hanem konkrét termékek előállítását is elérhetővé teszi. Mérlegelni kell az előnyöket és a hátrányokat a különböző technikák alkalmazásánál, de mára már nagyon sok hatékony eljárás áll rendelkezésünkre. Érdeklődési hátterem miatt főleg az orvosi biológiai alkalmazás kutatásához köthető szempontokat emeltem ki, de természetesen máshol - például a textiliparban - is alkalmazzák ezt a technológiát. Az alkalmazási területek részletes bemutatását sajnos nem tették lehetővé a terjedelmi keretek, de a jövőben számtalan újdonságot tartogat számunkra a víz és légszűrés, a szenzorika, a sejttenyésztés, az energiagyűjtés és tárolás, a sebfezők, a gyógyszerhatóanyagot vivő rendszerek, valamint a mesterséges erek létrehozása.

Irodalom

- ALFARO DE PRÁ, M. A., RIBEIRO-DO-VALLE, R. M., MARASCHIN, M., & VELEIRINHO, B. (2017). Effect of collector design on the morphological properties of polycaprolactone electrospun fibers. *Materials Letters*, 193, 154–157. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.01.102>
- AN, J., ZHANG, H., ZHANG, J., ZHAO, Y., & YUAN, X. (2009). Preparation and antibacterial activity of electrospun chitosan/poly(ethylene oxide) membranes containing silver nanoparticles. *Colloid and Polymer Science*, 287(12), 1425–1434. <https://doi.org/10.1007/s00396-009-2108-y>
- BAGCHI, S., BRAR, R., SINGH, B., & GHANSHYAM, C. (2015). Instability controlled synthesis of tin oxide nanofibers and their gas sensing properties. *Journal of Electrostatics*, 78, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2015.11.001>
- BARAKAT, N. A. M., KANJWAL, M. A., SHEIKH, F. A., & KIM, H. Y. (2009). Spider-net within the N6, PVA and PU electrospun nanofiber mats using salt addition: Novel strategy in the electrospinning process. *Polymer*, 50(18), 4389–4396. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.07.005>
- BATNYAM, O., SUYE, S. I., & FUJITA, S. (2017). Direct cryopreservation of adherent cells on an elastic nanofiber sheet featuring a low glass-transition temperature. *RSC Advances*, 7(81), 51264–51271. <https://doi.org/10.1039/c7ra10604a>
- BUTTAFOCO, L., KOLKMAN, N. G., ENGBERS-BUIJTENHUIJS, P., POOT, A. A., DIJKSTRA, P. J., VERMES, I., & FEIJEN, J. (2006). Electrospinning of collagen and elastin for tissue engineering applications. *Biomaterials*, 27(5), 724–734. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.06.024>
- CAI, S., XU, H., JIANG, Q., & YANG, Y. (2013). *Novel 3D Electrospun Scaffolds with Fibers Oriented*

Randomly and.pdf.

DING, B., WANG, X., & YU, J. (2019). Electrospinning: Nanofabrication and applications. In *Elsevier Inc.*

DUBEY, P., & GOPINATH, P. (2016). Fabrication of electrospun poly(ethylene oxide)–poly(capro lactone) composite nanofibers for co-delivery of niclosamide and silver nanoparticles exhibits enhanced anti-cancer effects in vitro. *J. Mater. Chem. B*, 4(4), 726–742. <https://doi.org/10.1039/C5TB02351C>

GAO, Y., TRUONG, Y. B., ZHU, Y., & LOUIS KYRATZIS, I. (2014). Electrospun antibacterial nanofibers: Production, activity, and in vivo applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(18), 9041–9053. <https://doi.org/10.1002/app.40797>

HASEEB, B. (2011). *Controlled deposition and alignment of electrospun PMMA-g-PDMS nanofibers by novel electrospinning setups - MSc thesis.*

JEDLOVSZKY-HAJDU, A., MOLNAR, K., NAGY, P. M., SINKO, K., & ZRINYI, M. (2016). Preparation and properties of a magnetic field responsive three-dimensional electrospun polymer scaffold. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 503, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.036>

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.036>

JUHASZ, A. G., MOLNAR, K., IDRISSE, A., & JEDLOVSZKY-HAJDU, A. (2020). Salt induced fluffy structured electrospun fibrous matrix. *Journal of Molecular Liquids*, 312, 113478.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113478>

KATTA, P., ALESSANDRO, M., RAMSIEER, R. D., & CHASE, G. G. (2004). Continuous electrospinning of aligned polymer nanofibers onto a wire drum collector. *Nano Letters*, 4(11), 2215–2218.

<https://doi.org/10.1021/nl0486158>

KNY, E., GHOSAL, K., & THOMAS, S. (2018). Electrospinning: From Basic Research to Commercialization. In *The Royal Society of Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/9781788010580-FP007>

LI, Z., & WANG, C. (2013). *One-Dimensional Nanostructures Electrospinning Technique and Unique Nanofiber*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36427-3>

LIN, T., & WANG, X. (2013). *Needleless Electrospinning of NanoFibers, Technology And Applications*. In *Pan Stanford Publishing*. CRC Press.

LIU, Y., & WANG, C. (2019). Advanced Nanofibrous Materials Manufacture Technology Based on Electrospinning. In *Advanced Nanofibrous Materials Manufacture Technology Based on Electrospinning*.

<https://doi.org/10.1201/9780429085765>

MITCHELL, G. R. (2014). *Electrospinning Principles, Practice and Possibilities*.

<https://doi.org/10.1039/9781849735575>

NEVES, N. M. (2012). Electrospinning for Advanced Biomedical Applications and Therapies. In *Electrospinning for Advanced Biomedical Applications and Therapies*. <https://doi.org/10.1085/jgp.9.6.835>

PANT, H. R., BAJGAI, M. P., NAM, K. T., SEO, Y. A., PANDEYA, D. R., HONG, S. T., & KIM, H. Y. (2011).

Electrospun nylon-6 spider-net like nanofiber mat containing TiO₂nanoparticles: A multifunctional nanocomposite textile material. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1), 124–130.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.006>

RAI, M., YADAV, A., & GADE, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials.

Biotechnology Advances, 27(1), 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>

RAYLEIGH, LORD. (1882). On the Equilibrium of Liquid Conducting Masses charged with Electricity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 14(87), 184–186.

<https://doi.org/10.1080/14786448208628425>

RUITER, F. A. A., ALEXANDER, C., ROSE, F. R. A. J., & SEGAL, J. I. (2017). A design of experiments approach to identify the influencing parameters that determine poly-D,L-lactic acid (PDLLA) electrospun scaffold morphologies. *Biomedical Materials (Bristol)*, 12(5). <https://doi.org/10.1088/1748-605X/aa7b54>

<http://www.kaleidoscopehistory.hu>

Juhász Ákos György

- RUTLEDGE, G. C., & FRIDRIKH, S. V. (2007). Formation of fibers by electrospinning. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 59(14), 1384–1391. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2007.04.020>
- STRANGER, J., TUCKER, N., & STAIGER, M. (2005). *Electrospinning - Rapra Review Report*. 16(10).
- SUN, B., LONG, Y. Z., YU, F., LI, M. M., ZHANG, H. DI, LI, W. J., & XU, T. X. (2012). Self-assembly of a three-dimensional fibrous polymer sponge by electrospinning. *Nanoscale*, 4(6), 2134–2137. <https://doi.org/10.1039/c2nr11782g>
- TUCKER, N., HOFMAN, K., STANGER, J., STAIGER, M., HAMID, N. A., & TORRES, P. L. (2011). The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995. *International Symposium on New Frontiers in Fiber Materials Science, Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1177/155892501200702S10>
- VONG, M., SPEIRS, E., KLOMKLIANG, C., AKINWUMI, I., NUANSING, W., & RADACSI, N. (2018). Controlled three-dimensional polystyrene micro- and nano-structures fabricated by three-dimensional electrospinning. *RSC Advances*, 8(28), 15501–15512. <https://doi.org/10.1039/c7ra13278f>
- YARIN, A. L., KOOMBHONGSE, S., & RENEKER, D. H. (2001). Taylor cone and jetting from liquid droplets in electrospinning of nanofibers. *Journal of Applied Physics*, 90(9), 4836–4846. <https://doi.org/10.1063/1.1408260>
- YOUSEFZADEH, M., LATIFI, M., AMANI-TEHRAN, M., TEO, W., RAMAKRISHNA, S., LATIF, M., AMANI-TEHRAN, M., TEO, W., & RAMAKRISHNA, S. (2012). A Note on the 3D Structural Design of Electrospun Nanofibers. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7(2), 17–23. <https://doi.org/10.1177/155892501200700204>
- ZELNY, J. (1914). The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces. *Physical Review*, 3(2), 69–91. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.3.69>
- ZHUANG, X., CHENG, B., KANG, W., & XU, X. (2010). Electrospun chitosan / gelatin nanofibers containing silver nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 82(2), 524–527. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.085>
- <https://patents.google.com/patent/US692631A/en> link ellenőrizve: 2021/11/01