

EZÜST NANORÉSZECSKÉKKEL BORÍTOTT INTELLIGENS TEXTÍLIÁK ANTIBAKTERIÁLIS HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Kis-Csitári Judit¹

*A HM Fejlesztési és Logisztikai
Ügynökség Tudományos Tanácsa által
meghirdetett Pályázat díjazott
tanulmányának szerkesztett változata.*

1. Ezüst felhasználása napjainkig

Az ezüst, latin neve Argentum, vegyjele Ag, rendszáma 47. Szürkés színű, moltömege 107,87 g, sűrűsége 10,5 g/cm³, nehézfémek közé sorolandó. A tiszta ezüst ideálisan alakítható, a hőt és elektromosságot nagyon jól vezeti.

A történelem során, hasonlóan az aranyhoz, az ezüstöt is széles körben hasznosították, többek között ékszerek, szerszámok, pénz előállítására, valamint fogászati ötvözetekhez, fényképezéshez vagy épp robbanóanyagok gyártásához alkalmazták. Az ezüst további felhasználása, fertőtlenítő hatása miatt, főként orvosi és higiénias célokból történt. *Az ókorban ezüst edényeket használtak a víz és a bor tartósításához, Hippocrates, a modern orvostudomány atyja, pedig bízott az ezüst betegségmegelőző hatásában, és azon anyagok közé sorolta, melyekkel kezelni lehet a fekélyeket. Az I. Világháborúban az ezüst vegyületeket, mint fő fegyvereket használtak sebfertőzés ellen mind addig, míg meg nem jelentek az antibiotikumok.* 1884-ben egy német szülészorvos **C.S.F. Crede** bemutatta az **1%-os ezüst-nitrátot, mint szemcseppet**, a Gonococcal ophthalmia neonatorum megelőzésére, talán ez volt az **első tudományos dokumentáció** az ezüst orvosi felhasználására.¹ További alkalmazása az ezüst szulfadiazin krém volt, melyet súlyos égési sérüléseknél használtak és használnak antibakteriális kezelésként.

Ha hosszú időn keresztül ezüstnek vagy ezüst vegyületnek van kitéve a szervezet, az ezüst felhalmozódhat, lerakódhat, mely a szem és

¹ Kis-Csitári Judit PhD hallgató, Szegedi Tudomány Egyetem.

bőr maradandó elszíneződését válthatja ki, ill. allergia és ezüstmérgezés is kialakulhat.^{ii,iii,iv} Ezen probléma következtében valamint az antibiotikumok megjelenésével, mint pl. a **Penicillin** vagy **Cephalosporin**, az ezüst hírneve, mint a fertőzések elleni hatóanyag, teljesen elhalványult. Ám a modern tudomány előrehaladása segített az ezüst elvesztett hírnevének megújulásában. A fém ezüstöt korszerűbb technológiáknak vetették alá, melynek köszönhetően új alakokkal és tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezen részecskék, ha legalább egy dimenziójukban kisebbek, mint **100 nanométer (nm)**, akkor a nevük nanorészecskék (**nanoparticles, NPs**).^v Az extrém kis méret következtében, az ezüst részecskék rendkívül szokatlan fizikai-kémiai tulajdonságokat rendelkeznek és biológiai aktivitást mutatnak. Óriási vizsgálódás indult el, melyek nagyobb részét főként az egészségmegővés terén folytatott kutatások teszik ki, melyek a mai napig is folyamatban vannak.^{vi,vii,viii,ix,x} ***Az ezüst nanorészecskék, mint az egyik leggyorsabban fejlődő ágazat a nanotechnológiai iparban, főként erős antimikrobiális hatásának köszönhető.*** Az előállított termékek a fogyasztók számára már elérhetőek, pl. gyógyászati terén kötszerek, sebészeti műszerek, csont protézisek, melyek be vannak vonva nanoezüsttel.^{xi,xii} A mindennapi életben is használhatunk nanoezüstöt tartalmazó termékeket, mint pl. mosóporok, víztisztítók, falfestékek.^{11,xiii} Az ezüst nanorészecskéket textilekre is felviszik, így készítenek alsóneműket és zoknikat.^{xiv,xv} Mosógépekben és csővezetékben is található nanoezüstöt. Ha az összes gyógyászati és egészségmegőrzés szektort nézzük, akkor megfigyelhetjük, hogy ***az ezüst nanorészecskék felhasználása a legnagyobb mértékben elüzletiesedett.*** Emiatt, a nanoezüstnek kitett szervezet fokozatosan a középpontba kerül. Az ezüst nanorészecske méretéből és formájából adódóan könnyen hozzáfér a biológiai szövetekhez, sejtekhez és molekulákhoz. A tradicionális hiedelem az, hogy allergiát okoz, és néhány főbb probléma forrása is lehet, de az ezüst viszonylag nem toxikus az emlős sejtekre. ***Ezüstmérgezés akkor következhet be, ha valaki tartósan van kitéve ezüstnek vagy ezüst vegyületeknek. Fém ezüstnek minimális kockázata van az egészségre.***^{xvi} Habár, mikor elérjük a nanoskálát, akkor lényeges toxicitás mutatható ki ezen anyagoknál az emlős sejtekre nézve még akkor is, ha azok biokémiaileg inerte és biokompatibilisek tömb méretben, mint például a szén.^{xvii} ***Ha visszakanyarodunk az ezüst nanorészecskékhez, akkor csak néhány tanulmány szolgáltat bepillantást az olyan nézőpontokba, melyek kölcsönhatást tárnak fel a nanoezüst és a szövetek, sejtek és molekulák között. Számptalan kérdés vetődik fel, melyekre a kutatások adhatnak kielégítő választ.***

2. Ezüst nanorészecskékkel bevont textilek előállítása

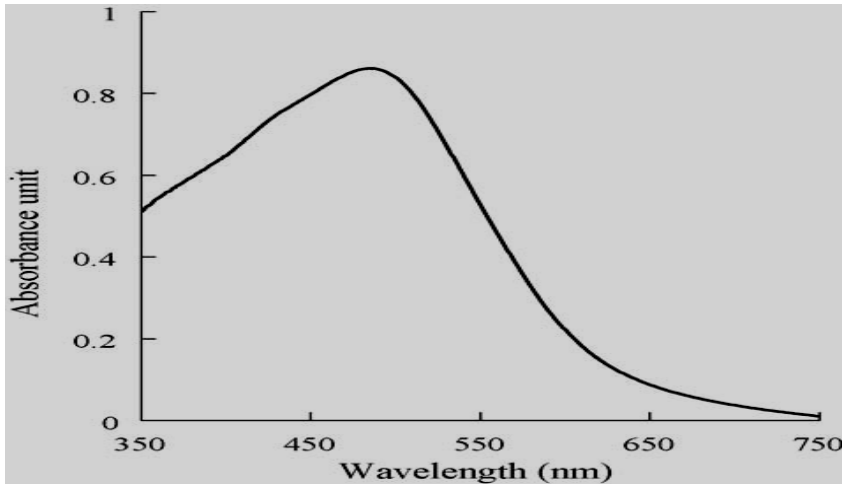
Az ezüst nanorészecskékkel borított textil szálakból készített ruhák előállítása az utóbbi időben egyre elterjedtebb mind a tudományos mind az ipari szektorokban. A nanorészecskék és nano-szerkezetek széles skáláját rögzítik fonalszálakon, melyek új tulajdonságokat biztosítanak az elkészített ruhaneműknek. Ezek a textilek egyre nagyobb figyelmet kapnak, ellentétben a sima szövetekkel, mivel a ruha szálainak felületét szennyeződés elleni vagy öntisztuló bevonattal módosítják.

2.1. Layer-by-layer eljárás

Számtalan eljárást alkalmaznak a szálak felszínének nanorészecskékkel történő módosítására, beleszámítva azt is, mikor a nanorészecskéket egy polimer mátrixba keverik bele mielőtt a kívánt funkciós csoportot kémiaiilag rákötnék a szálakra. Egy új eljárást dolgozott ki *Hinestroza és csapata*, ahol egy vékony polimer film réteget ágyaznak be a textil szövetébe. A *layer-by-layer* beágyazási eljárással alakítják ki a *polyelectrolyte multilayers (PEM)*.^{xviii} A filmek úgy készülnek, hogy egy szubsztrátot folyamatosan mártanak bele ellentétesen töltött polielektrolit tartalmazó hígított oldatba, melyet vízzel való öblítés követ. A beágyazott elektrolitok okozzák az elektrosztatikus és/vagy hidrofób kölcsönhatást a filmben, mely vastagsága és tulajdonsága végül összehangolható. Ezekbe számtalan szerves és szervetlen molekulát lehet beágyazni, melyek újabb tulajdonságokat adnak az elkészült filmnek. Az eljárás során anionos polimetakrilát savba ágyazott ezüst nanorészecskéket (*PMAcapAg*) állítanak elő selyem és nylon szálakon kationos polidialildimetilammonium-kloriddal (*PDADMAC*).

Az ezüst nanorészecskéket tartalmazó oldatot úgy állítják elő, hogy a **PMA** vizes oldatában ezüst-nitrátot oldanak fel és **UV** lámpával világítanak meg. A **PMA** ebben az esetben a redukáló és beágyazó ágens is egyben. A megvilágítás során az oldat színe rózsaszínből pirosra változik. **UV-VIS** spektrofotométerrel vizsgálják, hogy befejeződött-e a redukció.

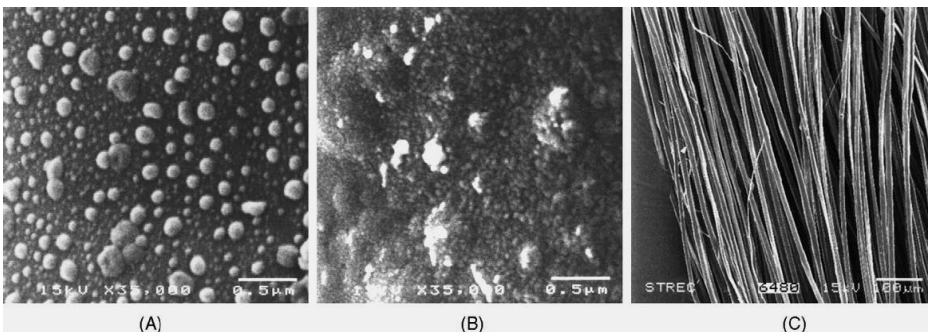
1. ábra



1. ábra UV-VIS spektrofotométerrel mért eredmény

Ezután a textil szálakat mind a polielektrolit, mind az ezüst nanorészecskét tartalmazó oldatba mártották. Az eljárás végén szárítják. A szálakon található nanorészecskéket pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgálták meg (*Scanning electron microscope, SEM*).

2. ábra.



Pásztázó elektronmikroszkópos felvételek A) nylon, B) és C) selyem

Az UV-VIS spektrofotométerrel mért eredmény látható az 1. ábrán. Az előállított ezüst nanorészecskének abszorbanciájának maximuma 480 nm-en van, mely nagyobb méretre enged következtetni. A ***SEM*** felvételekkel alátámasztható, hogy a részecskék mérete kisebb, mint 100 nm.

A ***2. ábrán*** látható mindkét szövet típus 20 rétegű ***PDADMAC/PMAcapAg*** tartalmazott. A nylon mintán kis aggregátumok láthatók, melyek a rétegek növekedéséből képződtek. Ezzel ellentétben a selyem mintákon egyenletes bevonat képződött.

A bevont szálakat, antimikrobiális tesztnek is alávetették. Mind a két típusú textil szálát olyan edénybe tették, melyben baktérium kultúra (***Staphylococcus aureus***) és tápoldat is volt. Egy órás ráztatás után ezekből a baktérium/táptalaj elegyekből mintát vettek, desztillált vízzel felhígítottak és szilárd táptalajra szélesztettek. 24 órás inkubációs idő után a táptalajon kinőtt baktérium telepeket megszámozták.

A selyemszálak mutatták a legnagyobb antibakteriális hatást, 10 réteg esetén 50%-os, 20 réteg esetén 80%-os gátlást észleltek. A nylon szálak esetében 0% és 50%-os gátlás figyeltek meg 10 és 20 réteg esetén.

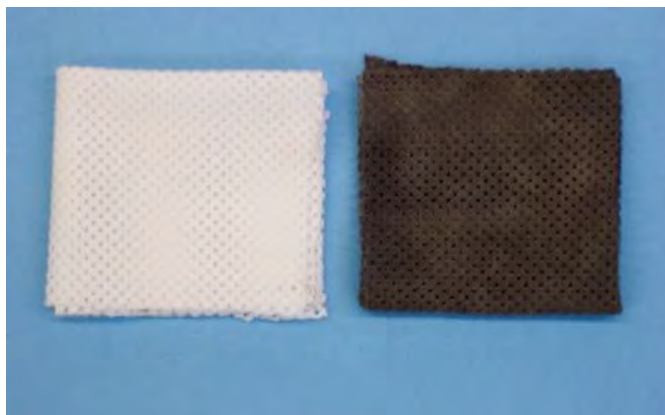
A ***SEM*** felvételek és az antimikrobiális teszt eredményei azt bizonyítják, hogy magasabb ezüst nanorészecske koncentráció magasabb antibakteriális aktivitást eredményez. A selyem egy természetes protein alapú szál, karboxil csoportokkal ellátva, melyek kölcsönhatásba léptek ***PDADMAC***-dal. A nylon szálaknak viszont alacsony felületi töltöttsége van, mely nem teszi lehetővé teljes mértékben a rétegek kialakulását. Viszont az 50%-os antibakteriális hatás a 20 rétegnél kielégítő eredménynek tekinthető a nylon szálak esetében.^{xix}

2.2. Szonokémiai módszer

A szonokémia hatásos módszer nanoméretű anyagok előállítására, melynek alapja az, hogy ultrahanggal sugározzák be az adott oldatot. Ez az eljárás újnak bizonyul az antibakteriális tulajdonságokkal rendelkező nylon, poliészter és pamutszövetek előállítására, melyek ezüst nanorészecskékkel vannak beborítva.

A reakció úgy történik, hogy ezüst-nitrát desztillált víz és etilén-glikol elegyéből készített oldatát argon gázzal tisztítják egy órán keresztül, hogy eltávolítsák a maradék O_2 /levegőt. A szövet darabot behelyezik az oldatba és következő lépésként egy órán keresztül ultrahanggal sugározzák be. 25%-os ammónium oldatot adnak hozzá a szonikálás első 10 percében. Az etilén-glikol a redukáló ágens, mely az ezüst ionokat fém ezüstre redukálja. **Az ammónium hozzáadásával $[Ag(NH_3)_2]^+$ komplex képződik. A reakció végén a szövet színe szürkére változik**

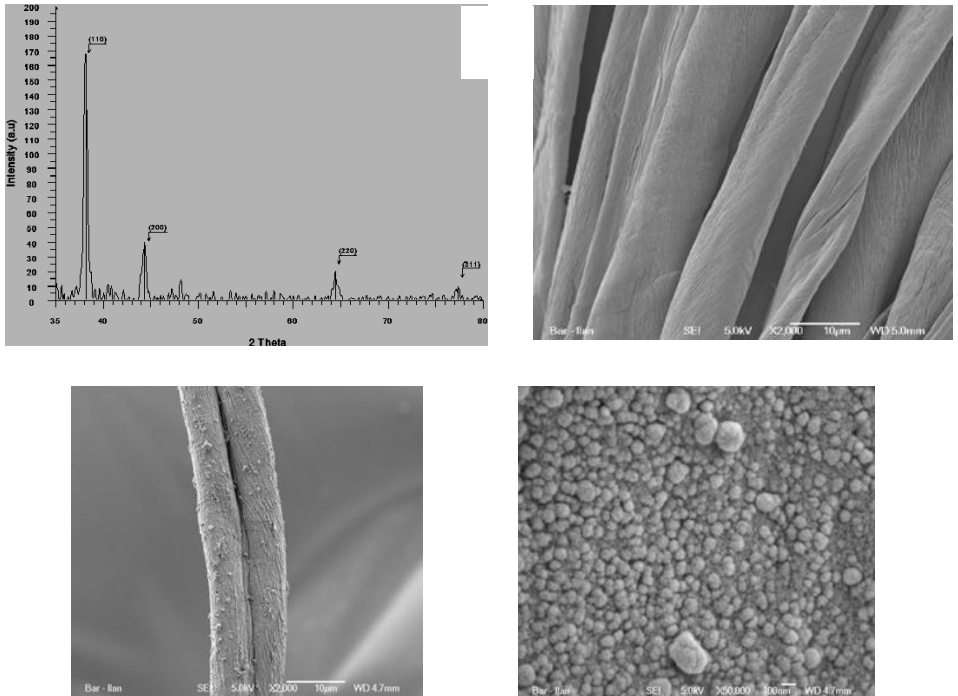
3. ábra.



Szonokémiai módszerrel előállított ezüst nanorészecskét tartalmazó textil

A részecskék alakját és méretét nagy felbontású pásztázó elektronmikroszkóppal (***High resolution scanning electron microscope, HR-SEM***) vizsgálták. Összehasonlításként felvételt készítettek a sima szálról és az ezüst nanorészecskével borított mintáról is. Az eljárás sikeres, a pamutszál felszíne ezüst nanorészecskével borított. A felvételek alapján a részecskeméret 80 nm-nek bizonyult, melyet további vizsgálatok, a Röntgendiffrakciós mérések (***X-ray diffraction, XRD***) ***alá is támasztották***

4. ábra.



4. ábra a) Ag nanorészecskékről készített röntgen diffraktogram, HR-SEM felvételek: b) tiszta pamutszálak c) ezüst nanorészecskével borított pamutszálak d) a pamutszálakon elhelyezkedő Ag nanorészecskék.

A szövetmintákat baktériumölő tesztnek is alávetették. **Gram- (*Escherichia. coli*) és Gram+ (*Staphylococcus aureus*) baktériumokat használtak.** Mindkét baktérium telepeket táptalajon növesztettek egy éjszakán keresztül. A telepeket táptalajba oltották át, melynek optikai sűrűsége 0,1 volt 660 nm hullámhosszon. 37 °C-on növesztették őket, míg az optikai sűrűség 0,3 nem lett 660 nm-en. Majd lecentrifugálták és sóoldattal mosták míg a pH 6.5 lett, a baktérium koncentráció pedig 10^8 kontrol élőcsíra-szám/ml (**CFU/ml**). 1 és 6 tömeg%-os (az ezüstre nézve) szövetmintát üvegcsébe tettek, melybe baktérium sejteket is pipettáztak (**kb. 10^7 CUF/ml a koncentráció**). Az összehasonlítás érdekében két fajta „vak” mintát is készítettek, az egyik csak a sóoldat volt, a másik pedig tiszta textil sóoldatba áztatva. A baktérium szuszpenziót 37 °C-on 4 órán keresztül rázták. Meghatározott időben mintát vettek a szuszpenzióból,

melyet 10-szeresére sóoldattal hígítottak és szilárd táptalajra szélesztettek. 24 órán keresztül 37 °C-on inkubáltak. Végül a kinőtt baktérium-telepeket számolták meg.^{xx}

A beburkolt pamutszövet antibakteriális hatása már nagyon alacsony koncentrációnál megmutatkozik. A baktérium kultúra teljes egészét gátolta már egy óra letelte után a 6 t%-os minta, és kb. 1,5 óra után az 1 t%-os textil is.

A sóoldatban található ezüst koncentrációja megegyezik az ezüsttel bevont pamutszövet ezüst tartalmával, 1 t% esetén 0,13, 6 t% esetén 0,78 mg/ml. Az ezüst ionok diffúziója a beágyazott ezüst nanorészecskékről a sóoldat felé nagyon lassú, és az ezüst csak egy kis része tud részt venni az antibakteriális hatásban. Mindamellett, az ezüst tartalom az oldatban sokkal kevesebb, mint a minimum gátló hatást kifejtő koncentráció (**MIC**), melyet szokás szerint használni szoktak (10 mg/ml). Az ezüst ionok, melyek az antibakteriális hatásért felelősek, sebességének köszönhetően, már 1,5 óra eltelte után a kiindulási élőcsíra-számot sikerült zéróra csökkenteni.

Így elmondható, hogy a szonokémiai módszerrel előállított ezüsttel beborított pamut textilek kitűnő antibakteriális tulajdonságokkal rendelkeznek, valószínűleg az ezüst nanorészecskék és a sejtmembrán szoros kapcsolata miatt.

2.3. RF-plazmával és vákuum-UV-val funkcionizált textilek előállítása

Ebben az esetben poliamin-polisztirol textileket állítottak elő, melyekbe ezüstöt ágyaztak be. A szövetek felszínének aktiválásához az RF-plazma és vákuum-UV bizonyultak. Miután az ezüst kémiai beágyazását elvégezték az aktivált felszínen, megfigyelték az ezüst antibakteriális hatását.

2.3.1.1. Szövetanyag funkcionizálása RF-plazmával

A polimer anyag felszínén különböző oxigén tartalmú funkciós csoportokat hoztak létre a reakció alatt, $>C-O$, $>C=O$, $-O-C=O$, $-COH$, $-COOH$. Gáz fázisban a plazma indukálta az aktív helyeket és a C atomok felszínét. Ezekon a funkciós csoportokon kívül a szintetikus

textilen jelentős számú karboxilát, perkarboxilát, epoxid és peroxid csoportok is kialakultak.

2.3.1.2. Vákuum-UV-val történő funkcionizálás

Ennél az eljárásnál alacsony nyomású higanylámpát alkalmaztak, a hullámhossz 185 nm volt. A lámpa cső szintetikus szilika cső volt. Alacsonyabb energiát tudtak így előállítani mint a **RF**-plazma esetében.

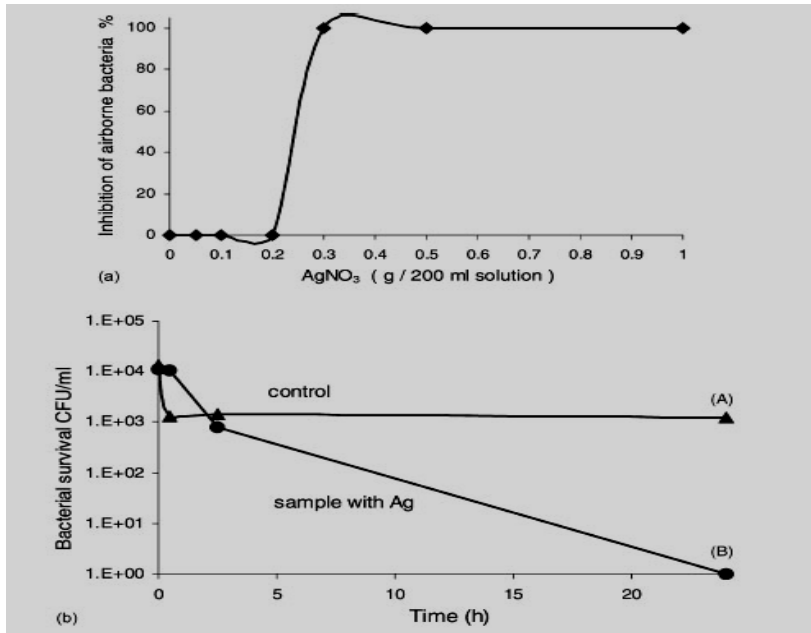
2.3.2. Ezüst hozzáadása az aktivált textilekhez

Miután a textilek felszínét funkcionizálták, különböző koncentrációjú ezüst-nitrát oldatba merítették őket. Ezek után az ezüst redukálódott a megfelelő pH-n és közepes erősségű redukáló ágens hatására, végeredményként sötét sárga színt adva. A textileket levegőn és szobahőmérsékleten szárították meg.

2.3.3. Bakteriológiai vizsgálatok

Két tesztet végeztek el a textilekkel. Az első esetében nem történt sterilizálás, mind az ezüstöt tartalmazó, mind az ezüst nélküli mintákat 24 órán keresztül 37 °C-on tartották.

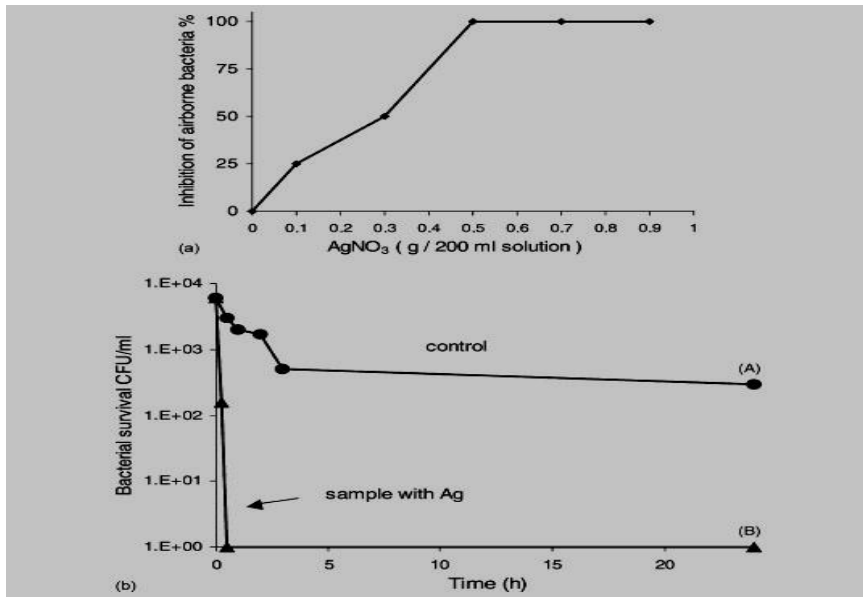
A másik bakteriológiai teszthez *Escherichia coli*-t használtak. A baktérium kultúráját 37 °C-on növesztették egy éjszakán keresztül, majd lecentrifugálták és tryptone oldatban újra felszuszpendálták a sejteket. Végül MilliQ vízzel felhígították. Az ezüstöt tartalmazó és nem tartalmazó textilekhez is hozzáadták a baktérium szuszpenziót, és táptalajon növesztették 24 órán keresztül, szintén 37 °C-on.



RF-plazmával funkcionlizált textilek bakteriológiai vizsgálatainak eredménye, a) sterilizálás nélküli minta, b) *E. colival* oltott minták A) kontrol textil, B) ezüstöt tartalmazó textil

A **5. ábrán** RF-plazmával funkcionlizált textilek bakteriológiai vizsgálatának eredményei láthatóak. Az **a) esetben** csak ezüstöt tartalmazó minta antibakteriális hatása látható. A funkcionlizált textilt különböző koncentrációjú ezüst-nitrát oldatba mártották. Az ábrán látható, hogy már a 0,3 g / 200 ml-es oldat a baktériumok növekedését 100 %-ban gátolta. **A b) esetben** látható egy kontrol (nincs ezüst tartalma) és egy ezüstöt tartalmazó minta (1 g / 200 ml oldatba mártott textil) eredménye is. A kontrolnál is láthatunk gátló hatást az első pár órában, de ez nem számottevő, a 24 órás kísérlet alatt a baktérium kultúra fenn maradt. Az ezüstöt tartalmazó minta esetében viszont jelentős változást láthatunk. A kísérlet idejének felénél a kiindulási baktériumsejtek több mint 50 %-a gátlódott, a kísérlet végére a 10^4 /ml élőcsíra-számmal rendelkező baktérium kultúra (**CFU/ml**) a nem detektálható szint alá csökkent, **10 CFU/ml** értéket adta.

6. ábra



Vákuum-UV-val funkcionizált textilek bakteriológiai vizsgálatainak eredménye, a) sterilizálás nélküli minta, b) E. colival oltott minták A) kontrol textil, B) ezüstöt tartalmazó textil

A 6. ábra a) grafikonján látható, hogy nagyobb ezüst koncentráció (0,5 g / 200 ml) szükséges a baktériumok növekedésének gátlásához, mint az RF-plazma esetében. A b) grafikonon pedig azt olvashatjuk le, hogy az ezüstöt tartalmazó minta esetén (1 g / 200 ml) már az első órában teljessé vált az antibakteriális hatás. A kontrol esetében is megfigyelhető a sejtek inaktiválása, de a baktérium kultúra nagy hányada fennmaradt.^{xxi}

2.4. Ezüst nanorészecskék bioszintézise eukarióta szervezetekkel

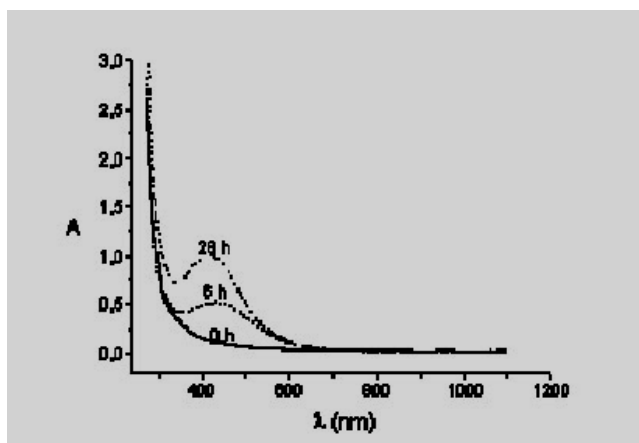
A mikroorganizmusok, úgy mint baktériumok, élesztőgombák és manapság a gombák is, igen fontos szerepet játszanak a toxikus fémek remediációjában, a fém ionok redukálása által. A szervesetlen nanoanyagok bioszintéziséhez eukarióta szervezeteket is fel lehet

használni, mint pl. a gombákat, melyeket arany és ezüst nanorészecskék növesztésére lehetne készíteni intracellulárisan, mint például a *Verticillium* gomba sejtjeiben. Az utóbbi időben, vizes $[AuCl_4]^-$ ionok exrtacellulárisan történő redukálására inspirálják a *Fusarium oxysporum* gombát, hogy extrém stabil arany és ezüst nanorészecskéket állítson elő vizes közegben.

Első lépésként biomasszát készítettek a *Fusarium oxysporum*ból, melyet leszűrtek, és steril vízzel felszuszpendáltak. Kb. 10 g biomasszát 100 ml desztillált vízzel elegyítettek, és 72 órán keresztül 28 °C-on tartottak, majd a folyékony részt szűréssel különítették el. Ehhez az oldathoz, mely folyékony gombás szuszpenzió, ezüst-nitrátot adagoltak, és néhány órára ismét 28 °C-on tartottak. Időközönként az oldat abszorpcióját *UV-VIS* spektrofotométerrel megmérték.

A textilt, ebbe az ezüstös-gombás szuszpenzióba merítették és 15 percen keresztül 3500 rpm fordulaton centrifugálták, majd ezek után megszáritották.

7. ábra.

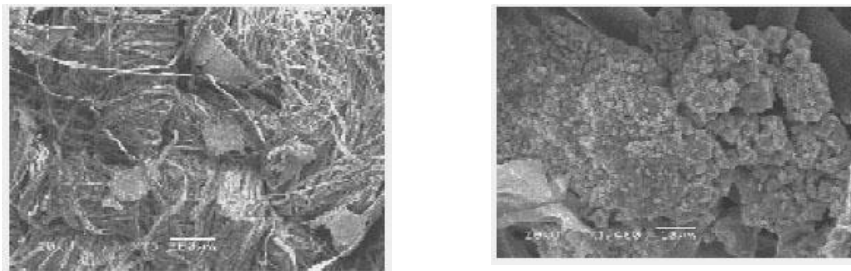


UV-VIS spektrum, a reakcióidő során vett oldatminták abszorpciója

A textil antibakteriális hatását *Staphylococcus aureus*, Gram+ baktériummal szemben tesztelték. Agar táptalajra helyezték a vizsgálandó textilt, *S. aureus*-szal oltották be és inkubálták. Az szövetre oltott gomba $1,3-1,6 \cdot 10^5$ kontrol élőcsíra-számmal rendelkezett milliliterenként. Az

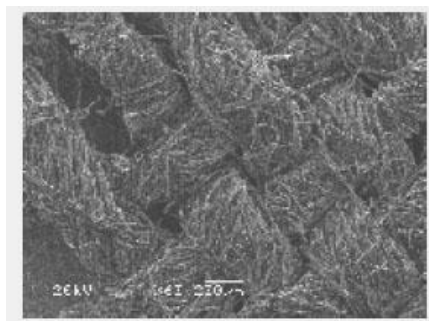
előállított textilt Pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgálták meg (*Scanning electron microscopy, SEM*).

8. ábra.



SEM felvételek a pamutszálakról, melyek nem tartalmaznak ezüstöt (kontrol)

9. ábra.



SEM felvétel az ezüst nanorészecskéket tartalmazó pamutszálról

A 28 órás reakcióidő alatt az ezüstös-gombás szuszpenzió színe halvány sárgából barnás színűre változott. Ez a színváltozás egy biztató jelzés, hogy az ezüst nanorészecskék képződése elindult a reakció elegyben. **A 7. ábrán UV-VIS spektrofotométerrel készült mérési eredmény látható**, a különböző reakcióidőben vett minták abszorpcióját mutatja. Látható, hogy már a 6. óránál elkezdődött az ezüst nanorészecskék kialakulása.

Az antibakteriális teszt eredményeit a 8. és 9. ábrán láthatjuk. A 8. ábrán kontrol minták SEM felvételei vannak, melyek nem tartalmaznak ezüst nanorészecskéket. Megfigyelhető, hogy a *Staphylococcus aureus* gombafaj telepeket képzett, a kontrol mintánál semmilyen antibakteriális hatás nem tapasztalható. Ezzel ellentétben, a *9. ábrán*, ahol a pamutszálak ezüst nanorészecskékkal vannak beborítva, a gomba nem volt képes elszaporodni, a *SEM* felvételen csak a szövetre jellemző mintázat látható.^{xiii}

3. Az ezüst nanorészecskék baktériumölő hatása

Egyre súlyosabb és égetőbb problémákat jelent a jelenlegi antibiotikumokra rezisztens baktérium törzsek fejlődése; ennek következtében egyre sürgetőbb a helyzet új baktériumölő anyagok kifejlesztése.

A baktériumoknak különböző membrán struktúrájuk van, amely megszokott és megbíható osztályozást biztosít, úgymint **Gram-** vagy **Gram+** baktériumok. A strukturális különbségek az organizmusok membránjának kulcsfontosságú komponensében rejlik, ez a **peptidoglikán**. Gram- baktériumoknál csak egy vékony peptidoglikán réteg (~2-3 nm) van a citoplazma membránja és a külső membrán között; ezzel ellentétben a Gram+ baktériumoknál a külső membrán hiányzik, viszont a peptidoglikán réteg szinte tízszeres vastagságban jelenik meg a Gram-baktériumokéhoz képest, kb. 30 nm vastag.

Az ezüst ionok baktériumölő hatása közismert a mikroorganizmusokra nézve; ennek ellenére az antibakteriális mechanizmus csak részben ismeretes. *Az ionos ezüst erős kölcsönhatásba lép az alapvető enzimek tiol csoportjával és inaktíválja azokat.* Kutatások azt bizonyítják, hogy a DNS elveszti replikációs képességét mikor ezüst ionokkal kezelték a baktérium sejteket. Egy másik tanulmány pedig arról számolt be, hogy a baktérium sejt membránjában strukturális változások léptek fel, mikor kölcsönhatásba hozták a nanoezüsttel. *Az ezüst ionokról tehát bebizonyosodott, hogy hasznos és hatásos anyag baktériumölő alkalmazásokban,* így a nanorészecskék kivételes tulajdonságainak köszönhetően a nanotechnológia új kapukat nyithat meg a baktériumölő anyagok kifejlesztésében.

A következőkben egy olyan kísérletsorozatokat mutatok be, melyben az ezüst nanorészecskék kölcsönhatását vizsgálták különböző

Gram- baktériumokkal (*Escherichia coli*, *Vibrio cholera*, *Pseudomonas aeruginosa* és *S. typhus*).

A kísérletek során használt ezüst nanorészecskéket a **Nanotechnologies Inc.** állította elő. A végső termék szén mátrixba ágyazott ezüst nanorészecskék. A részecskéket vízben szuszpendálták fel annak érdekében, hogy könnyebben kölcsönhatásba tudjanak lépni a baktériumokkal. A részecskéket transzmissziós elektronmikroszkóppal vizsgálták (*Transmission electron microscope, TEM*).

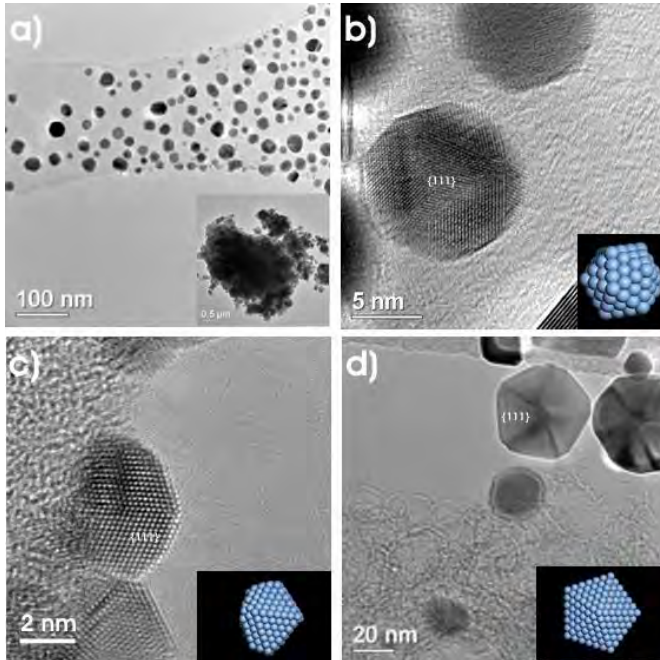
Első lépésként különböző koncentrációjú ezüst nanorészecskéket tartalmazó szuszpenziót készítettek (0, 25, 50, 75 és 100 µl/ml) és mind a négy baktérium fajjal tesztelték. Agar táptalajt készítettek, melynek komponensei agar, tápoldat és a különböző koncentrációjú Ag nanorészecskék. Erre a szilárd táptalajra szélesztették fel a baktérium kultúrákat, melynek optikai sűrűsége 0,5 volt 595 nm-em és 37 °C. A kölcsönhatást, a baktériumok és a különböző koncentrációjú ezüst nanorészecskék között, a táptalajon kinőtt telepek nagysága mutatta meg.

Egy másik eljárás során, homogén baktérium kultúrákat tartalmazó szuszpenzióhoz adták hozzá a különböző koncentrációjú Ag nanorészecskéket, és fél órán keresztül növesztették őket. Az idő letelte után a sejteket centrifugálással összegyűjtötték, majd mosták és PBS pufferrel felsuszpendálták. Egy cseppnyi mintát gridre helyeztek a mikroszkópiás vizsgálatokhoz, hogy az ezüst nanorészecskék eloszlását és helyzetét, valamint a baktériumok morfológiáját megállapítsák, miután ezüst nanorészecskékkel kezelve lettek.

Annak érdekében, hogy még alaposabb értelmezést kaphassanak az ezüst nanorészecskék baktériumölő mechanizmusáról, különböző minta előkészítési technikákat alkalmaztak.

Először is az ezüst nanorészecskék **TEM** analízise történt meg (**10. a) ábra**). A részecskék mérete 16 nm, 8 nm standard deviációval. Miután a nanorészecskék kiszabadultak a mátrixból, már szabad felülettel rendelkeztek, és reakcióképességük is fokozódott.

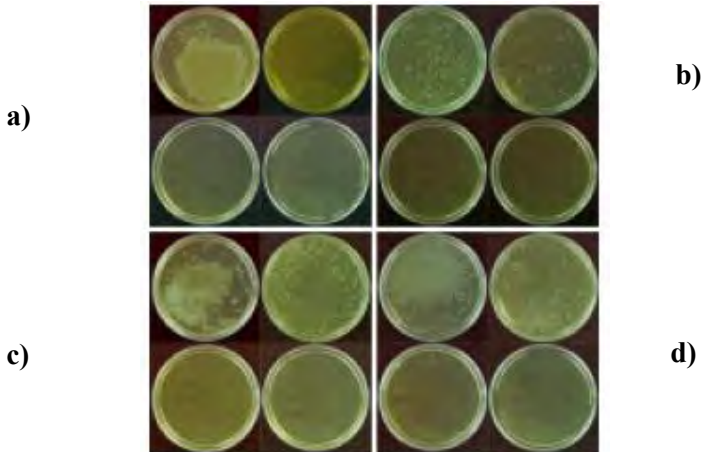
10. ábra.



Ezüst nanorészecskék TEM felvételei a) szén mátrixból kiszabadulva, a kis képen még összetapadva a mátrixban b)-d) a kísérletek során használt részecskék morfológiája, a kristálylapok meg vannak jelölve {111}, modelljük a kis képen láthatók: b) ikozaéder részecske c) iker részecske d) tízlapú részecske látható.

Egy érdekes jelenséget tapasztaltak a vizsgálat során, mikor a **TEM** elektron nyálábát összeszűkítették a nanorészecskék összetapadásánál; ez elegendő energiát adott a részecskéknél ahhoz, hogy a maradék mátrixból kiszabaduljanak, és az átlagos méret eloszlás úgy alakult, hogy az átlagos méret 21 nm és a standard deviáció 18 nm lett. Nagyfelbontású transzmissziós elektronmikroszkóppal (**HRTEM**) megállapították, hogy a részecskék 95 %-a kuboktaéder, iker ikozaéder és tízlapú részecskék (**10. ábra**).

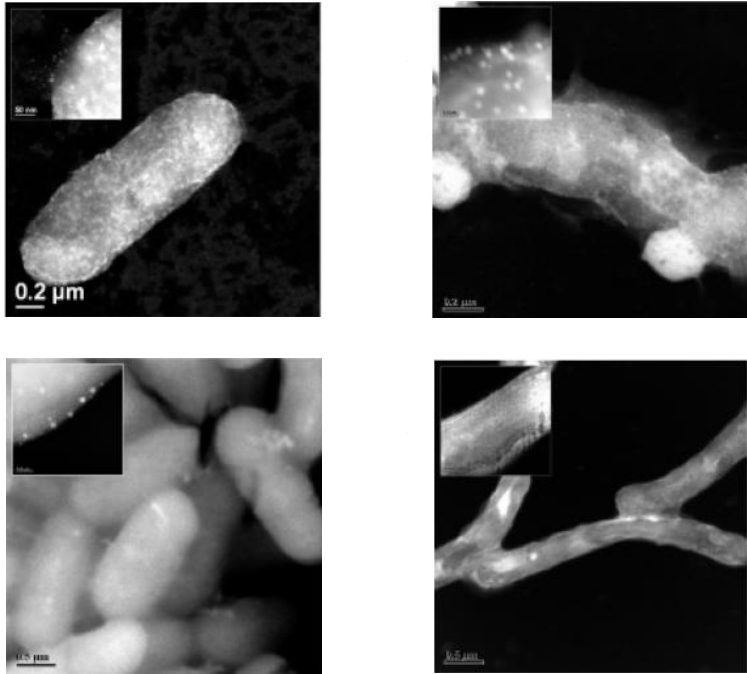
11. ábra .



Agaron növesztett baktérium telepek különböző Ag nanorészecske koncentráció mellett a) *E. coli* b) *S. typhus* c) *P. aeruginosa* d) *V. cholerae*. 0 µg/ml balra fenn, 25 µg/ml jobbra fenn, 50 µg/ml balra lenn és 75 µg/ml jobbra lenn.

Minden baktérium fajt kölcsönhatásba hoztak a különböző koncentrációjú Ag nanorészecskékkel, hogy megfigyeljék a baktériumok növekedésére kifejtett hatásukat. Minden esetben tapasztalható volt a gátló hatás, viszont mind a négy fajnál más eredmény született. A *P. aeruginosa* és *V. cholerae* ellenállóbbnak bizonyultak az *E. coli*-val és az *S. typhus*-szal szemben. Ennek ellenére a 75 µg/ml feletti koncentrációnál már nem volt számottevő növekedés (11.ábra).

A 12. ábrán HAADF STEM (High angle annular dark field detector, Scanning transmission electron microscopy) felvételek láthatók. Hasznos vizsgálati módszer, mert általában a nagyon kicsi (~1 nm) ezüst nanorészecske is megfigyelhető a baktériumon.

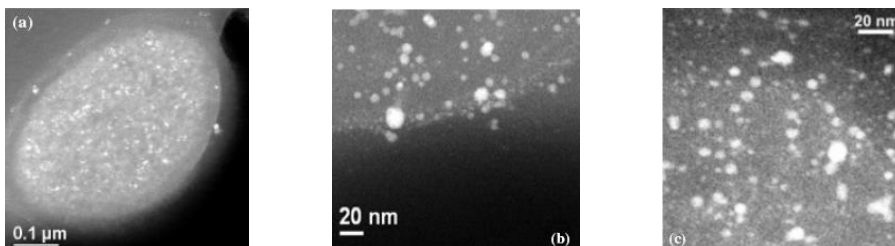


12. ábra HAADF STEM felvételek, melyek az ezüst nanorészecskék és a baktériumok közötti interakciókat mutatják: a) *E. coli* b) *S. typhus* c) *P. aeruginosa* d) *V. cholerae*

A baktériumok és az ezüst nanorészecskék kölcsönhatásáról készített STEM felvételek a **13. ábrán** láthatók. Megfigyelhető, hogy a részecskék nem csak a baktérium felszínén, hanem a belsejében is megtalálhatók. Az ezüst nanorészecskék hozzátapadtak a sejtek membránjához és behatoltak a baktériumba, ahol teljesen szétszóródtak.

A membrán felszínéhez csak különálló részecskék voltak képesek hozzátapadni. Ez elegendő bizonyítékot adhat ahhoz, hogy megállapítsuk, csak azok a részecskék, melyek képesek voltak a szén mátrixból kijutni, kölcsönhatásba léptek a baktériumokkal. Meg kell jegyezni azt is, hogy azok a részecskék, melyek bejutottak a sejtbe, azonos mérettel rendelkeztek, mint azok, melyek interakcióba léptek a membránnal; ebből az adódik, hogy azok a részecskék, melyek kölcsönhatásba léptek a membránnal, csak azok képesek bejutni a baktériumba.

13. ábra .



STEM felvételek *E. coli* mintáról: a) az ezüst nanorészecskék a membrán felszínén és a sejtben is megfigyelhetők b) a membránon található részecskék c) a részecskék szétszóródva a sejtben.

A részecskék méreteloszlását, melyek kölcsönhatásba léptek mind a négy baktériummal, a **HAADF** felvételeken megfigyelhetjük. Az ezüst nanorészecskék átlagos mérete ~5 nm volt 2 nm-es standard deviációval. Ez az eloszlás megegyezik a mátrixból kiszabadult méreteloszlás legkisebb határával (átlagos méret 16 nm 8 nm-es standard deviációval). **Tehát az ezüst nanorészecskék baktériumölő hatása méret függő.**

Az a mechanizmus, amely során a részecskék képesek behatolni a baktériumba, még nem teljesen ismert, viszont egy tanulmány szerint, amelyben *E. coli*-t ezüst nanorészecskével kezeltek, változást okozott a membrán morfológiájában, így jelentősen csökkenthette permeabilitását és hatással lehetett a saját transzportjaira a plazma membránon keresztül. Ez megmagyarázhatja a számottevő ezüst nanorészecskék jelenlétét a baktérium sejtben belül.

A baktériumölő mechanizmus megértésében lényeges lehet az ezüst nanorészecskék membránhoz való kapcsolódása és bekerülése a sejtbe. Az ezüst nagy affinitást mutat foszfor és kén vegyületekkel való reakcióra. Köztudott, hogy a baktérium membránja sok kén tartalmú proteint tartalmaz; ezek kedvező helyek lehetnek az ezüst nanorészecskék kapcsolódásához. Másfelől, a sejtben belül is találhatunk kén tartalmú proteineket, valamint foszfor tartalmú vegyületeket is, mint pl. a **DNS**. Végezetül, a baktérium membránjának morfológiájában történő változás, valamint lehetséges sérülése okozhatta azt, hogy az ezüst nanorészecskék reakcióba léptek a **DNS**-sel. Ez hatással lehetett a baktérium

folyamataira, mint pl. a légző folyamat, vagy a sejt osztódás, végül a sejt halálához vezetett.^{xxiii}

4. Az ezüst nanorészecskék alakja befolyásolhatja az antibakteriális hatást?

*Az előző fejezetben bemutatott tanulmány arról számolt be, hogy az ezüst nanorészecskék bizonyos méret alatt képesek kölcsönhatásba lépni a Gram- baktérium sejtekkel, tehát a baktériumölő hatásért felelős Ag nanorészecskék méretfüggőek.*²³

Ezekből az eredményekből kiindulva, kísérletsorozatot végeztek annak érdekében, hogy tanulmányozzák a különböző alakú ezüst nanorészecskék baktériumölő hatását is.

A kísérlethez különböző alakú ezüst nanorészecskéket állították elő, melyeknél két különböző eljárást alkalmaztak. Mindkét eset „*seed*”-ek előállításán és növesztésén alapult.

Első lépésként az ezüst „*seed*”-eket állították elő, és a kész oldatot 1,5 órán keresztül állni hagyták. Az első eljárás során a gömb alakú, a második módszer során pedig rúd és tetraéder alakú ezüst nanorészecskéket szintetizáltak úgy, hogy a már kész ezüst ezüst kristálymagokat növesztették.

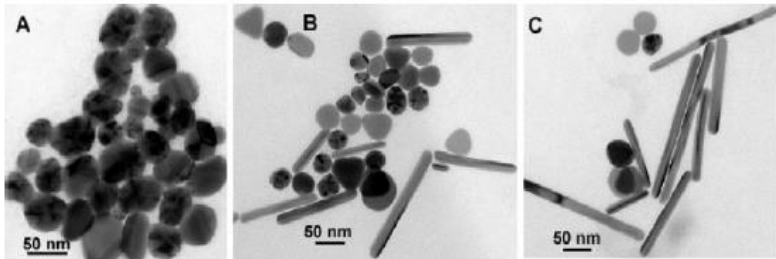
Második lépésként az *E. coli* baktériumtelepet növesztették fel 37 °C-on. Az optikai sűrűsége 0,1 volt 600 nm-en, mely 10^8 élőcsíraszámra felelt meg milliliterenként.

A baktérium növesztő vagy ölő hatás vizsgálata úgy történt, hogy a baktérium sejtek szuszpenzójához különböző tömegű nanoezüstöt (1, 6, 12, 12,5, 50, 100 µg) adtak és 37 °C-on növesztettek folyamatos agitálás mellett. A hatás eredményét 600 nm-en az optikai sűrűség alapján határozták meg (**14. ábra**).

Az *Escherichia coli* a különböző nanoezüstöre való fogékonyságát úgy vizsgálták, hogy különböző tömegű (1-100 µg) ezüst nanorészecskét keverték az agar táptalajba és erre vitték fel a baktériumsejteket (10^5 vagy 10^7 kontrol élőcsíra-szám/ml). A táptalajokat 37 °C-on inkubálták 24 órán keresztül. Készítettek „*vak*” táptalajokat is, melyek nem tartalmaztak nanoetüstöt és az összehasonlítás érdekében kontrollként alkalmazták. Ugyanazon körülmények között inkubálták őket. Az ezüst ionok vizsgálata érdekében olyan táptalajokat is csináltak, melyekbe ezüst-nitrátot adtak ugyanolyan mennyiségben (1-100 µg).

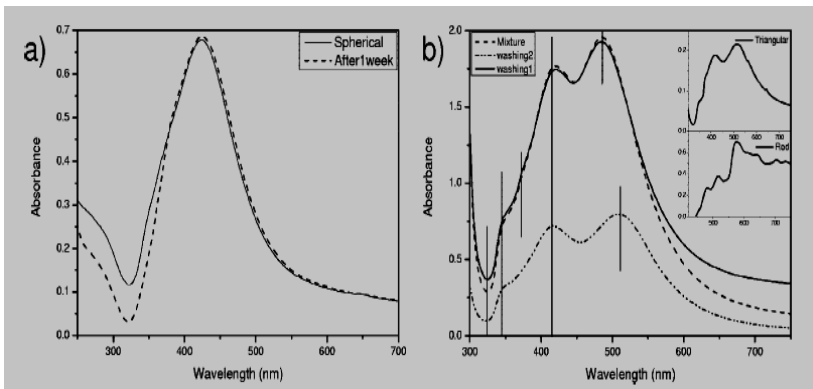
Mind a nanoezüstöt, mind a kezelt baktériumokat *UV-VIS* spektrofotométerrel és energiaszűréses transzmissziós mikroszkóppal (Energy filter transmission electron microscope, *EFTEM*) vizsgálták meg.

14. ábra.



Az ezüst nanorészecskék EFTEM felvételei: a) gömb alak b) második eljárás során előállított különböző alakok c) megtisztított rúd alak

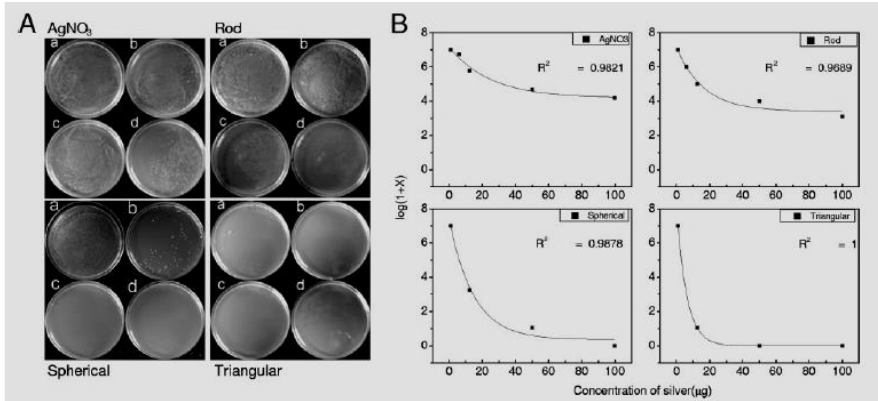
Az ezüst nanorészecskék vizsgálatához jól bevált módszer az *UV-VIS* spektrofotométer használata. A *15. a) ábrán* látható az ezüst kolloid abszorpciós spektruma, melynek maximuma ~ 420 nm-nél van, mely a gömb alakú Ag nanorészecskék jelenlétét bizonyítja. Ezt alátámasztja a *TEM* felvétel is (*14. a) ábra*). Egy hét eltelté után is felvették ezen minta abszorpciós spektrumát. Látható, hogy az ezüst hidrozsol megőrizte stabilitását.



Különböző alakú Ag nanorészecskék UV-VIS spektrumai: a) gömb alakú nanoezüst, B) rúd alakú háromszög alakú nanorészecskék

A második eljárás alkalmával előállított nanoezüstök spektrofotometriás vizsgálata során három jellemző csúcs mutatkozik, 348, 420 és 485 nm-eknél, ill. egy kis „váll” 373 nm-nél. A mintát több alkalommal is centrifugálták és újból felvették abszorpciós spektrumát. Az abszorpciós maximumok ugyanott jelentkeztek, mint az eredeti oldatnál (15. b) ábra).

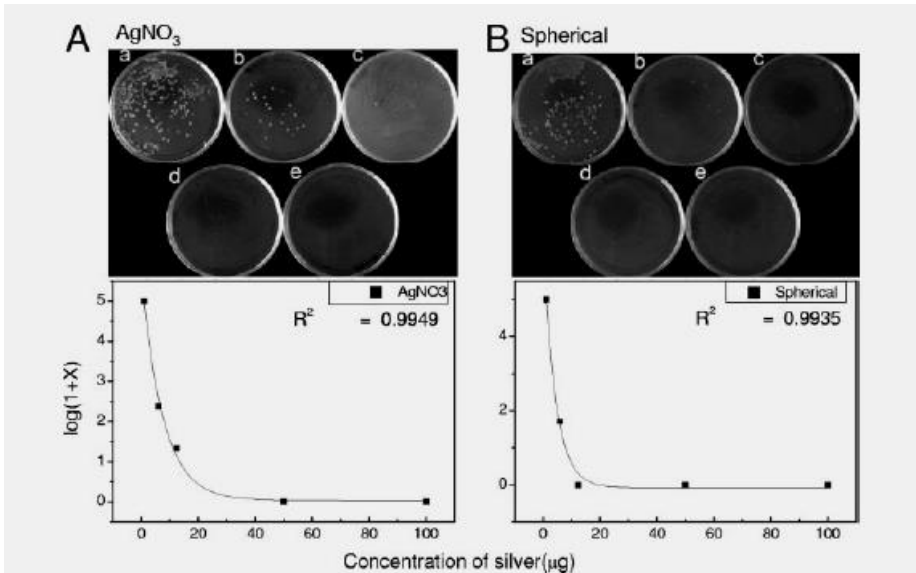
Az agar táptalajon növesztett baktériumok eredményei a 16. A ábrán láthatóak, ahol a kiindulási baktérium kontrol csíra-száma 10^7 /ml volt. Az adott tömegű nanorészecskék jelenlétében a baktériumok növekedése különböző mértékben gátlódott. Érdekes módon, a baktériumölő hatás a különböző alakú nanorészecskék esetében eltérő eredményt mutat. A háromszög alakú nanoezüst esetében már az 1 μg tömeg elég volt ahhoz, hogy a baktériumok növekedését gátolja. A gömb alakú nanorészecskék esetében, a 12,5 μg ezüsttartalommal a baktérium kolónia nagy része már nem nőtt ki, az 50 és 100 μg esetében lett teljes a gátló hatás. A rúd alakú nanorészecskéket és az ezüst nitrátot tartalmazó táptalajon növesztett baktériumok nagy része viszont telepeket képzett, a baktériumölő hatásuk elmarad az előző két mintához képest. A 100 μg rúd alakú nanoezüstöt tartalmazó táptalajon is kinőtt néhány telep, bár kevesebb, mint az azonos tömegű AgNO_3 -ot tartalmazó táptalajon (16.a) ábra).



A Különböző alakú nanoezüstöt tartalmazó táptalajos kísérlet 10^7 kontrol élőcsíra-számmal: a) 1 b) 12,5 c) 50 d) 100 µg. B E. coli kinőtt telepeinek száma adott tömegű nanoezüst esetén ($AgNO_3$ esetében Ag^+ értendő).

A táptalajba kevert ezüst tömegének függvényében ábrázolták a kinőtt baktérium sejtek számát (az x a baktérium sejtek száma). Amit vizuálisan tapasztaltak a táptalajok esetében, azokat az ábrákon nyomon tudjuk követni (**16. B ábra**). A háromszög alakú nanoezüst kiemelkedően jó eredményt adott a baktériumölő hatás tekintetében. A 6 µg nanoezüst tömegnél már a baktérium kolónia kb. fele gátlódott, az 50 µg tömegnél pedig teljessé vált a baktériumölő hatás. Ezzel ellentétben a 100 µg tömegű ezüst-nitrátot tartalmazó táptalaj esetén még a baktérium telep felénél sem következett be a gátló hatás.

Ugyanilyen, táptalajba kevert, különböző tömegű és alakú nanoezüst kísérletsorozatot végeztek el, viszont a baktériumok kontrol élőcsíra-száma ebben az esetben 10^5 /ml volt. Az eredmények egyértelművé teszik azt, hogy az adott tömegű ezüst alkalmazásánál a baktériumok gátló hatása nagyban függ a kiindulási élőcsíra-számtól.



A Különböző alakú nanoezüstöt tartalmazó táptalajos kísérlet 10^5 kontrol élőcsíra-számmal: a) 1 b) 6 c) 12,5 d) 50 e) 100 µg. B E. coli kinőtt telepeinek száma adott tömegű nanoezüst esetén. (AgNO₃ esetében Ag⁺ értendő.)

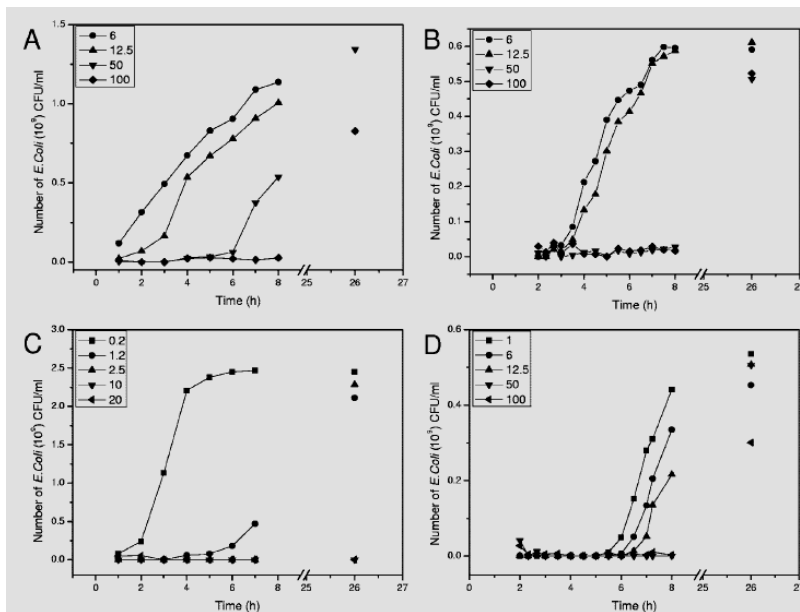
A gömb alakú nanoezüstöt és az ezüst-nitrátot tartalmazó táptalajos kísérletek eredményeit összehasonlítva elmondható, hogy 100%-os baktériumölő hatást értek el. Már a 6 µg tömegű gömb alakú ezüst nanorészecske teljes mértékben gátolta a baktériumsejtek növekedését, ezt az eredményt az AgNO₃ esetében a 12,5 µg-nál nagyobb tömeggel érték el. Ez a végeredmény határozottan különbözik a 10^7 kontrol élőcsíra-számmal végzett kísérletek eredményeitől (17. ábra).

A baktériumok növekedését is nyomon követték a szuszpenzióhoz adott különböző tömegű és alakú ezüst nanorészecskék mellett. A 18. ábrán minden tömeg esetében megfigyelhető a baktériumok növekedésének késleltetése; egyre nagyobb nanoezüst tömeget alkalmazva egyre késleltetve indul el a sejtszaporodás. Az itt kapott eredmények hasonlóságot mutatnak az agar táptalajos kísérletekhez

képest. A háromszög alakú ezüst nanorészecske sokkal jobb eredményeket mutatott, mint a gömb alakú nanoezüst, mely ismét jobb antibakteriális hatást mutatott, mint az ezüst-nitrát. A 10 µg tömegű háromszög alakú nanorészecskét tartalmazó minta teljesen gátolta a baktériumok növekedését még 24 óra eltelte után is, amíg a 100 µg ezüst-nitrátot és gömb alakú nanoezüstöt tartalmazó szuszpenziók csak ~8-10 óráig voltak képesek késleltetni a növekedést.

Ennél a kísérletsorozatnál is készítettek olyan mintát, mely csak 10^5 konrtol élőcsíra-számot tartalmazott milliliterenként. Mint ahogy az agar táptalajos kísérletnél, itt is megfigyelhető, hogy a baktériumok növekedése függ a kiindulási élőcsíra-számtól. A **18. D ábrán** látható a gömb alakú nanoezüst baktériumokra kifejtett hatása 10^5 baktérium kontrol élőcsíra-szám/ml mellett. Minden ezüst koncentráció esetében erőteljes volt az antibakteriális hatás, a bemért tömegektől függően ~5-8 óráig késleltették a növekedést.

18. ábra.



Az *E. coli* növekedési görbéi: A Ezüst-nitrát, B gömb alakú nanorészecske, C háromszög alakú nanorészecske, D gömb alakú nanorészecske (10^5 kontrol élőcsíra-szám/ml esetén).

Összegezve elmondható, hogy az ezüst nanorészecskék méretén kívül az alakjuk is befolyással van a baktérium sejtekre.

Az előzőekben bemutatott kísérletsorozatok viszont nem adnak választ arra, hogy a különböző ezüst nanorészecskék felszíne hogyan fejtik ki baktériumölő hatásukat vagy hogyan lehet összefüggésbe hozni a nanoezüst antibakteriális aktivitását a tényleges felületükkel. Az eredmények csak alapul szolgálhatnak az alak-függő ezüst nanorészecskék baktériumölő hatásának további vizsgálataihoz.^{xxiv}

5. Nanoezüst hatása a bőrre

Különbőle technikák alkalmazásával a textil szálakat be lehet vonni nanoezüsttel. Ezeket a textileket „smart textileknek” nevezik, melyek előnyben vannak a normál anyagszövetekkel szemben a baktériumok növekedését gátló tulajdonságuk miatt. Ezeket az antimikrobiális aktivitást mutató textileket használják fel az alsóneműk, fehérneműk, zoknik, valamint kórházi és laboratóriumi köpenyek és ruhák ipari előállítására. ***Különböző szövetek gyártásánál egyre kedveltebb a nanoezüst alkalmazása, és ezáltal egyre fokozódik az érdeklődés, hogy milyen hatással van az emberi bőrre ezen ruhaneműk viselése.***

A bőr egyik legfontosabb tulajdonsága az, hogy védelmet biztosít a belső szervek károsodása ellen. A bőr egy külső ***epidermis*** rétegből a hámból, a ***dermis*** rétegből az irhából és a ***subcutis*** rétegből a bőraljából épül fel. Az ***epidermis stratum corneum*** rétege egy erős gát, melyen a szemcsés anyagok csak limitáltan juthatnak át. Kis részecskék bőrön keresztül történő behatolását már dokumentálták, pl. TiO_2 részecskék (mikron méterűek) napellenzők fő alkotóeleme, melyek behatoltak az emberi ***stratum corneumtól*** az ***epidermisig***, és elérték a ***dermis*** réteget is. Minden nanoezüstöt tartalmazó textilnél, különböző körülmények között, a textil szálai közül nanorészecskék szabadulnak ki, például izzadásnál, ismétlődő súrolás és mosás során. Modellezni kéne az ezüst nanorészecskék lehetséges bejutását, hiszen számos dokumentáció van már más nano méretű anyagok bőrbe jutásáról, pl. quantum dotok. Azok a nanorészecskék, melyek elérték a bőr mélyebb rétegeit, eljuthatnak a bőr alatti nyirokedényekig is. A sérült bőrön keresztül pedig szabad az út a ***dermisig*** és a regionális nyirokcsomóig. A bőrben lévő részecskéket a ***makrofágok*** és a ***Langerhans*** sejtek fagocitálni képesek és lehetséges, hogy ez az immunrendszer felborulásához fog vezetni. Egy beteg esetében az ezüst nanorészecskék aktiválták a hízósejteket, helyi ezüstmérgezés alakult ki. Epidermális keratinociták is képesek fagocitálni

a réceszkéket mely gyulladásoz reakciót indít el. A nanoezüstöt tartalmazó szálakkal történő irritáció és beavatkozás a bőr ellenálló mikroflórájába, szintén problémákat vethet fel.

A bőrbe jutott nanorészecskék hatása még nem teljesen tisztázott. Az már evidens, hogy intradermális nanorészecskék képesek hozzáférni a központi szervekhez a subcutisban található nyirokcsomókban keresztül. Miközben az egészséges bőr átveszi a nanorészecskéket, a bőr sérülései fokozzák a könnyebb transzlokációt. ***Ezüst nanorészecskékkel beágyazott vagy bevont kötszereket használnak a bőr sérüléseinek elfertőződése ellen, mint pl. égések vagy fekélyek.*** Ez a szoros kapcsolat nagyobb esélyt ad a részecskék bőrbe jutásához és a kapillárisokig való eljutásához. Egy klinikai beszámoló arról szól, hogy egy páciens vérében abnormálisan magas ezüst szintet mértek és ezüstmérgezésre jellemző szimptómák jelentkeztek, miután nanoezüsttel borított kötszerrel volt bekötve égési sérülése. A nanoezüst a vérkeringésbe jutott.

Bár a nanoezüst alapú kötszerek és sebészeti varratok elfogadottak klinikai alkalmazásokhoz és jól bevált sebfertőzések ellen, bőrre gyakorolt toxicitása még vitatott.

Annak dacára, hogy laboratóriumi és klinikai tanulmányok alátámasztják a ***bőr biokompatibilitását*** a nanoezüst alapú kötszerekre nézve, néhány kutató megmagyarázta ezen anyagok sejtekre történő toxicitását. Eredményeik azt bizonyítják, hogy a keratinocita sejtek szaporodását gátolják ezen anyagok és a sejtek alakjára is hatással vannak. In vitro, a keratinociták életképessége drasztikusan csökken, miután kölcsönhatásba lépett bármilyen típusú nanoezüst anyaggal. Egy másik tanulmány pedig arról szól, hogy kereskedelembe kapható nanoezüstre toxicitást mutatnak nem csak a keratinociták, hanem a fibroblasztok is, melyek még nagyobb érzékenységet mutatnak az ezüstre nézve. ***Ezen szembetűnő ellentmondások talán a laboratóriumi körülmények és a technikai alkalmazások közötti különbségeknek köszönhetőek.*** Így, standardizált értékelési protokollra van szükség. Továbbá, meg kell jegyezni, hogy a legtöbb kísérletet in vitro végezték el, ahol a sejtek másképp viselkedhetnek, mint in vivo körülmények között. Klinikai esetekben, a seb gyógyulásánál maga a seb szivárgása/váladékozása biztosíthat egy „***gátat***” a nanoezüsttel szemben. A magas protein tartalmú váladék semlegesítheti a nanoezüst szövet toxicitását. ***Végül, szakértői megfigyeléseken keresztül, pontosan megtervezett klinikai tanulmányok adhatnak valódi és tárgyilagos, átfogó toxikológiai értékelést.***^{xv}

6. Az ezüst nanorészecskéket tartalmazó textíliák honvédségi hasznosítási lehetőségei

Induljunk ki abból az alapvetésből, hogy az ezüst antibakteriális hatása és ez a tulajdonsága független a mikroorganizmus minőségétől, azaz minden baktériumot elpusztít alkalmas koncentrációban használva. Tehát általában védekezési eszköz a bakteriális fertőzéssel szemben.

Alkalmazhatóak sebkötözőszerként, hiszen a gézbe épített nanorészecskék megakadályozzák a sebek elfertőződését. Ehhez még hozzáadódik, hogy segít a bekötözött seb gyógyulásában. Egy bármely testrészen bármely nem steril tárgyjal ejtett seb eleve fertőzött terület. *Fegyveres testületeknél, különösen speciális alakulatoknál lehetnek ilyen ellátásra szoruló sérülések.*

Alkalmazhatóak alsóruházatban. Az alsónemük cseréje a honvédségnél békeidőben rendszeres. A katonáknak nem kell hosszú ideig ugyanazokat az alsónemüket használni. Konfliktus vagy természeti katasztrófa esetén azonban nem ez a helyzet. A hosszabb ideig viselt alsóneműben ezüst nanorészecskék nélkül elszaporodhatnak a mikroorganizmusok, amelyek bőrirritációt, rosszabb esetben bőrgyulladást okozhatnak. Ezt megelőzendő, javasolt az alsóneműt ilyen, ezüst nanorészecskéket tartalmazó textíliából készíteni.

A zoknikban való alkalmazásuk jelentőségét külön is ki kell emelni, hiszen a katonák nem csak a bevetések alkalmával hanem bizonyos gyakorlatok alkalmával is felszíni vizekben kell hogy mozogjanak. Ilyenkor óhatatlanul behatol pl. a pocsolya vize lábbelijükbe. Az így bejutó baktériumok hatástalanítása miatt javasolható az ezüst tartalmú zoknik használata.

Különleges körülmények között, amikor a szolgálatot teljesítők extrém körülmények között (nagy meleg, nagy portartalom) dolgoznak, különösen ha tisztálkodásukra nincs lehetőség, vagy/ez korlátozott, a törülközők, zsebkendők (akár papír, akár textil) vagy törülközők esetén szintén javasolható az ezüsttartalmú anyagok használata. *Ekkor külsőleg lehet védekezni a kórokozók ellen.*

További lehetőségeket lehet felsorolni, amelyben nem a textília, hanem a nanoezüst részecskék a főszereplők. *Ilyenek lehetnek az antibakteriális krémek, felületi dezinficiáló szerek.*

7. Összegzés

Az intelligens textilek mint kifejezés kezd beépülni a köztudatba, csak úgy, mint a régóta felhasznált pamut vagy len. Míg régen természetes szálak anyagokból készítették a textileket, ma már mesterségesen állítanak elő nagyon sok kelmét, és a speciális felhasználási célnak megfelelő tulajdonságokkal ruházzák fel őket. A mai technika és a különböző új eljárások lehetővé teszik modern, mesterséges anyagok használatát, így lehetséges, hogy ma már vannak hőszabályozó kelmék, elektromosságot vezető textilek, emlékező textíliák – melyek bizonyos hatásokra visszanyerik eredeti állapotukat –, és vannak antibakteriális tulajdonságot mutató szövetek is.

Az intelligens textilek korai fajtáit a nyolcvanas években a *NASA*-nál és a katonaságnál kezdték el kikísérletezni, a nagy összegű befektetés ezen a területen érte meg a legjobban, innen kerültek át szépen lassan a hétköznapi életbe, mint oly sok, ma már hétköznapi tárgyunk. *Gondoljunk csak a sűrűre vagy a hegymászáshoz kifejlesztett túraruhákra, amelyek teljesen vízhatlanok, de mégis kiengedik a test páráját, szellőzést biztosítva ezzel.* Hatalmas technikai fejlődés kellett egy olyan anyag kifejlesztéséhez, amely az egyik oldalon teljesen vízhatlan, a másiktól viszont szellőzést enged a bőrnek.

Az intelligens textileket számos más területen is használják a hétköznapi életben a ruházatkodáson kívül, de úgy tűnik, felhasználásuk ezen a területen lesz a legjelentősebb.

A pályázat során bemutatásra került néhány figyelemre méltó eljárás, melyekkel olyan szövetet lehet előállítani, melyek antibakteriális hatással rendelkeznek. *Minden módszer esetében ezüst nanorészecskéket alkalmaztak, melyeknek kiváló antimikrobiális tulajdonsága közismert.* A részecskéket vagy utólag vitték fel az előkezelt textilekre, vagy a szövetek jelenlétében állították elő. Az ezüst nanorészecskével borított szövetanyagokat különböző baktériumölő teszteknek vetették alá. Biztató eredmények születtek, viszont néhány kérdés felvetődött. *Az ezüst nanorészecskék hogyan tudnak kölcsönhatásba lépni a baktérium sejtekkel?* A nanoezüst mérete és alakja befolyásolja-e az antibakteriális hatást? Az ezüst nanorészecskével borított textíliák ártalmasak-e az emberi bőrre? A tanulmány során a felvetődött problémákra próbáltam megoldást találni. *A feldolgozott szakirodalmak alapján bebizonyosodott, hogy az intenzívebb antibakteriális hatás függ az ezüst nanorészecskék méretétől és alakjától is.* A baktériumölő mechanizmus

még nem teljesen ismert, számos kísérletre és vizsgálatra lesz még szükség ennek megértéséhez. Ugyan ez a helyzet a nanoezüst bőrre gyakorolt hatásával. Néhány tanulmány beszámol súlyosabb esetekről, ahol ezüstmérgezés alakult ki, de nem jelenthetjük ki teljes bizonyossággal, hogy az ezüst nanorészecskék ártalmasak az emberi bőrre, szervezetre.

A legtöbb eljárás során természetes anyagokból, például pamutból, készített textíliákat vontak be nanoezüsttel. A pamutból készült ruhák közkedveltek, mert a bőrt nem irritálják, kellő szellőzést biztosítanak, strapabíróak és hideg ellen kiválóan védenek. ***Ha a pamutszálak felületét ezüst nanorészecskékkel borítjuk be, akkor több szempontból is előnyös textíliát kaphatunk.*** A felsorolt tulajdonságok mellé párosulni fog az antibakteriális hatás is, így nanoezüsttel borított szövetekből készített ruhák alkalmasak lehetnek katonai ruhák előállítására.

Az ezüst nanorészecskék a baktériumok növekedésének késleltetésére kifejtett hatását kísérletsorozatok bizonyítják. Az eredmények nagyon jónak bizonyultak. Ha a katonák ruháját ilyen intelligens textilekből készítik, akkor akár több napon keresztül is viselhetik azokat, hiszen a mikroorganizmusok az ezüst miatt nem lesznek képesek elszaporodni. ***Esős, nyirkos időben, mikor az átázott ruházat nem tud megszáradni, a nanoezüst szintén kifejtheti jótékony hatását, a penészgombák elszaporodása gátlás alatt lesz.*** Megfelelően bevont textil szálakból készült ruháról a nanorészecskék nem távolíthatók el, így, a már említett esős időben nem mosódnak le, még a ruha mosásakor sem.

Kísérletsorozatok támasztják alá a baktériumölő hatás részecske függését is. A megfelelő méret kikísérletezése lenne az egyik kulcs ahhoz, hogy olyan textileket lehessen előállítani, melyek ezüst nanorészecskéi a megengedett legkisebb mérettel rendelkezzenek és még ne lépjenek kölcsönhatásba az emberi bőrrel, viszont az antibakteriális hatásuk kielégítő legyen.

A tanulmány során bemutatásra került eljárások, kísérletsorozatok és antibakteriális teszt eredmények biztos alappal szolgálhatnak az intelligens textíliák előállítására és felhasználásra.

Felhasznált irodalom:

-
1. ⁱ.Russel, A.D., Hugo, W.B., *Prog. Med. Chem.* 31, 351-370, 1994.
 2. ⁱⁱ.Van de Voorde, K., Nijsten, T., Schelfhout, K., Moorkens, G., Lambert, J., *Acta Clin. Belg.* 60, 33-35, 2005.
 3. ⁱⁱⁱ.Eturska, M., Obreshkova, E., *Vutr. Boles.* 18, 121-123, 1979.
 4. ^{iv}.Spencer, W.H., Garron, L.K., Contrearas, F., Hayes, T.L., Lai, C., *Trans. Ophthalmol. Soc. U.K.* 100, 171-178, 1980.
 5. ^v.Oberdorster, G., Maynard, A., Donaldson, K., Castranova, V., Fitzpatrick, J., Ausman, K., Carter, J., Kern, B., Kreylig, W., Lai, D., Olin, S., Monteiro-Riviere, N., Warheit, D., Yang, H., *Part Fibre Toxicol.* 2, 8-43, 2005.
 6. ^{vi}.Lee, K.S., El-Sayed, M.A., *J. Phys. Chem.* 110, 19220-19225, 2006.
 7. ^{vii}.Evanoff Jr., D.D., Chumanov, G., *Chemphyschem* 6, 1221-1231, 2005.
 8. ^{viii}.Elechiguerra, J.L., Burt, J.L., Morones, J.R., Camacho-Bragado, A., Gao, X., Lara, H.H., Yacaman, M.J., *J. Nanobiotechnol.* 3, 6, 2005.
 9. ^{ix}.Liu, H.H., Cao, X., Yang, Y., Liu, M.G., Wang, Y.F., *J. Biochem. Mol. Biol.* 39, 247-252, 2006.
 10. ^x.Makarava, N., Parfenov, A., Baskakov, I.V., *Biophys. J.* 89, 572-580, 2005.
 11. ^{xi}.Cheng, D., Yang, J., Zhao, Y., *Chin. Med. Equip. J.* 4, 26-32, 2004.
 12. ^{xii}.Chen, J., Han, C.M., Lin, X.W., Tang, Z.J., Su, S.J., *Zhonghua Wai Ke Za Zhi* 44, 50-54, 2004.
 13. ^{xiii}.Zhang, Y., Sun, J., *Chin. J. Med. Instrumen.* 31, 35-38, 2007.
 14. ^{xiv}.Lee, H.Y., Park, H.K., Lee, Y.M., Kim, K., Park, S.B., *Chem. Commun. (Camb.)* 28, 2959-2961, 2007.

-
15. ^{xv} **Vigneshwaran, N., Kathe, A.A., Varadarajan, P.V., Nachane, R.P., Balasubramanya, R.H.J.,** *Nanosci. Nanotechnol.* 7, 1893-1897, 2007.
 16. ^{xvi} **Drake, P.L., Hazelwood, K.L.,** *Ann. Occup. Hyg.* 49, 575-585, 2005.
 17. ^{xvii} **Magrez, A., Kasas, S., Salicio, V., Pasquier, N., Seo, J. W., Celio, M., Catsicas, S., Schwaller, B., Forro, L.,** *Nano. Lett.* 6, 1121-1125, 2006.
 18. ^{xviii} **Hyde, K., Rusa, M., Hinestroza, J.,** *Nanotechnol.* 6, 422-428, 2005.
 19. ^{xix} **Dubas, S.T., Kumlangdudsana, P., Potiyaraj, P.** *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 289, 105-109, 2006.
 20. ^{xx} **Perelshtein, I., Applerot, G., Perkas, N., Guibert, G., Mikhailov, S., Gedanken, A.,** *Nanotechnology* 19, 245705 (6pp) 2008.
 21. ^{xxi} **Yuranova, T., Rincon, A.G., Bozzi, A., Parra, S., Pulgarin, C., Albers, P., Kiwi, J.,** *J. Photochem. Photobiol. A* 161, 27-34, 2003.
 22. ^{xxii} **Duran, N., Marcato, P.D., De Souza, G.I.H., Alves, O.L., Esposito, E.,** *J. Biomed. Nanotechnol.* 3, 203-208, 2007.
 23. ^{xxiii} **Morones. J.R., Elechiguerra, J.L., Camacho, A., Holt, K., B Kouri, J., Ramirez, J.T., Yacaman, M.J.,** *Nanotechnology* 16 2346-2353, 2005.
 24. ^{xxiv} **Pal, S., Tak, Y.K., Song, J.M.,** *Appl. Environ. Microbiol.* 73, 1712-1720, 2007.
 25. ^{xxv} **Chen, X., Schluesener, H.J.,** *Toxicology Letters* 176, 1-12, 2008.