



Sveučilište u Zagrebu
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
Kemijski odsjek

Tea Juračić

NANOČESTICE SREBRA – SINTEZA, KARAKTERIZACIJA I PRIMJENA

Kemijski seminar I

Doktorski studij Kemija, smjer: Fizikalna kemija

Prema radu: O. Pryshchepa, P. Pomastowski, B. Buszewski, *Adv. Colloid Interface Sci.* **284**
(2020) 102246–102277.

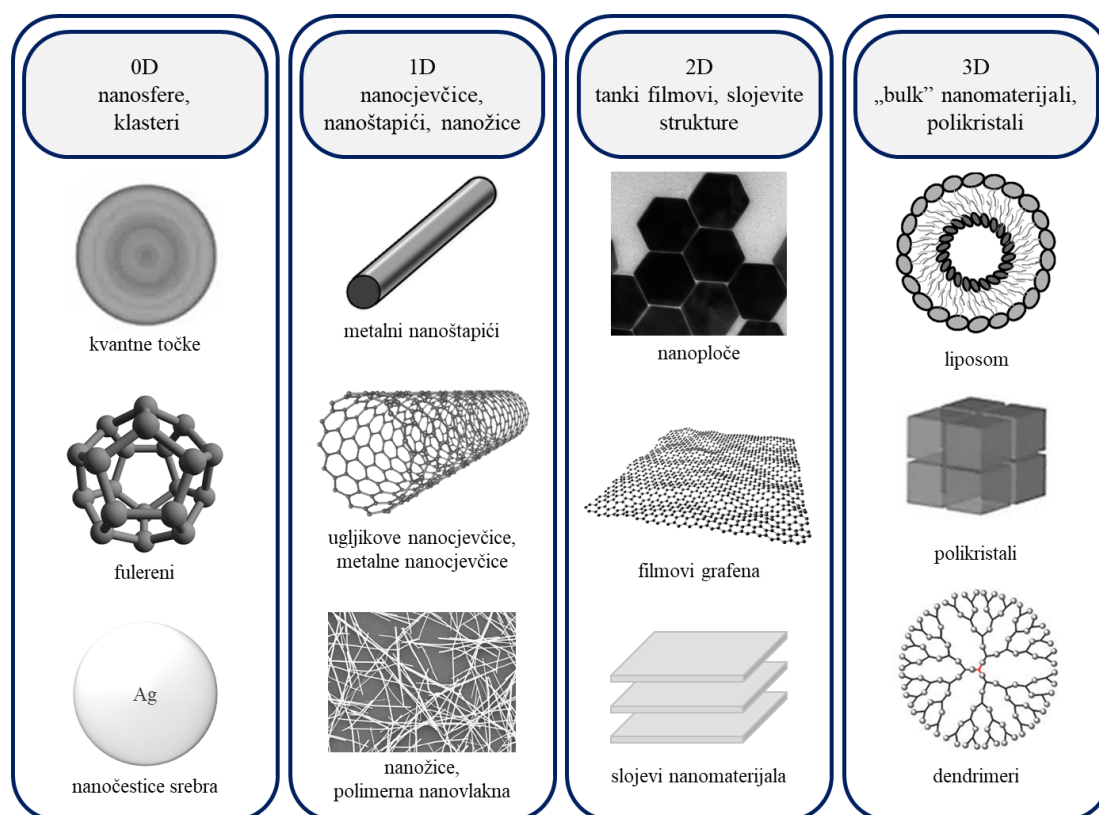
Zagreb, 2025.

Sadržaj

§ 1. UVOD.....	1
§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME	3
2.1. Sinteza nanočestica srebra	3
2.1.1. <i>Fizikalne metode sinteze nanočestica srebra.....</i>	<i>4</i>
2.1.2. <i>Kemijske metode sinteze nanočestica srebra</i>	<i>5</i>
2.1.3. <i>Biološke metode sinteze nanočestica srebra</i>	<i>7</i>
2.2. Karakterizacija nanočestica srebra.....	7
2.2.1. <i>Elektronska mikroskopija.....</i>	<i>8</i>
2.2.2. <i>Dinamičko i elektroforetsko raspršenje svjetlosti</i>	<i>9</i>
2.2.3. <i>UV-Vis spektrofotometrija</i>	<i>10</i>
2.2.4. <i>Infracrvena i Ramanova spektroskopija</i>	<i>11</i>
2.2.5. <i>Termalna analiza</i>	<i>12</i>
2.3. Fizikalno-kemijska svojstva i primjena nanočestica srebra	12
2.4. Zaključak	13
§ 3. LITERATURNI IZVORI.....	XV

§ 1. UVOD

Nanotehnologija je područje znanosti i tehnologije uključeno u inženjerstvo, proizvodnju i upotrebu nanomaterijala. Nanomaterijali su kemijske tvari ili materijali čija je barem jedna dimenzija u rasponu između 1 i 100 nm, a mogu biti u obliku čestica, cjevčica, vlakana i ploča što je prikazano na slici 1. Nanočestice imaju sve dimenzije u navedenom rasponu. S obzirom na njihovu veličinu i svojstva pripadaju području koloidne kemije zbog čega se vrlo često nanočestice nazivaju i koloidima.¹ Nanočestice mogu biti klasificirane na različite načine pa se najčešće dijele prema svojoj veličini, obliku i svojstvima materijala. One mogu biti organske (dendrimeri, liposomi, polimerne nanočestice) ili anorganske (kvantne točke, zlato), tvrde (titanijev dioksid, silicijev dioksid) ili meke (vezikule, nanokapljice).² Zbog svoje velike površine s obzirom na masu imaju specifična svojstva te im je primjena raznovrsna. Najčešće se koriste u medicini, kao antimikrobna sredstva, katalizatori, funkcionalni dodaci hrani, u pročišćavanju voda i praćenju okoliša.³



Slika 1. Podjela nanomaterijala prema njihovim dimenzijama.⁴

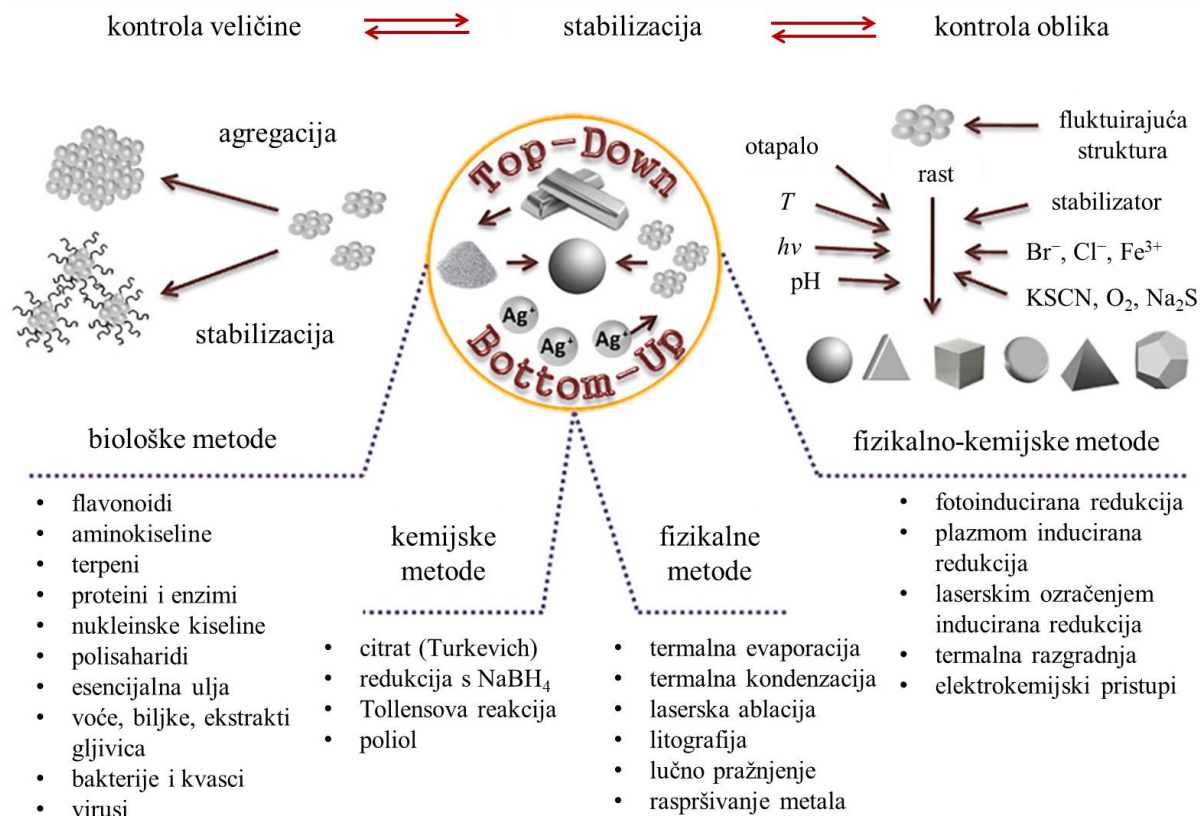
Među raznim metalima, nanočestice srebra od posebnog su interesa zbog svojih fizikalno-kemijskih i bioloških svojstava poput električne i toplinske vodljivosti, reaktivnosti, antimikrobnih svojstava te svojstava lokalizirane površinske plazmonske rezonancije (engl. *Localized Surface Plasmon Resonance*, LSPR). LSPR je kolektivno oscilirajuće gibanje vodljivih elektrona u blizini površine plemenitih metala kada je površina osvijetljena svjetlom što dovodi do stvaranja lokaliziranog elektromagnetskog polja s različitim optičkim svojstvima.⁵ Kao rezultat navedenih svojstava nanočestica srebra koriste se kao biomedicinski materijal, biomarkeri, kao kemijski i biološki senzori.⁶

§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME

Posljednjih se desetljeća nanotehnologija vrlo brzo razvija s dalekosežnom primjenom u znanosti i industriji. Središnji dio napretka u nanotehnologiji je sinteza i primjena nanočestica željenih svojstava. Nanočestice srebra privukle su pozornost znanstvenicima zbog svojih svojstava kao što su reaktivnost, toplinska i električna vodljivost te antimikrobna svojstva stoga im je upotreba široka. Unatoč tome, nije u potpunosti poznato ponašanje i biološki utjecaj nanočestica srebra, njihova sinteza je vrlo složen proces, a metode karakterizacije ne daju sveobuhvatne podatke o odnosu strukture i njihove funkcije.

2.1. Sinteza nanočestica srebra

Sinteza nanočestica srebra glavna je tema od pojave nanotehnologije što je dovelo do razvoja širokog spektra metoda pripreme. Ovisno o metodi sinteze nanočestica srebra mogu se dobiti čestice različitih svojstava kao što su veličina, oblik i površinski sastav. Sinteza nanočestica dijeli se na dva osnovna principa. Prvi pristup temelji se na razbijanju većih nakupina srebra u nanočestice (engl. *top-down*), a drugi na povezivanju pojedinačnih atoma, molekula ili iona u veće sustave (engl. *bottom-up*). Navedeni načini sinteze shematski su prikazani na slici 2. Također, metode sinteze nanočestica srebra mogu se podijeliti na fizikalne, kemijske i biološke. Svaka od metoda ima specifične prednosti i ograničenja koja utječu na konačna svojstva nanočestica srebra, njihovu funkcionalnost i potencijalnu primjenu.



Slika 2. Metode sinteze nanočestica.

2.1.1. Fizikalne metode sinteze nanočestica srebra

Fizikalne metode sinteze nanočestica srebra temelje se na korištenju fizikalnih agensa kao što su plazma, elektromagnetsko zračenje, toplina i električno pražnjenje. Prednosti ovog pristupa sintezi je brzina i minimalna potrošnja kemikalija. Unatoč tome, fizikalne metode sinteze nanočestica srebra imaju i svoje mane. Neke od njih su široka distribucija u veličini čestica, niski prinosi i visoka energija potrebna za sintezu.

Fizikalna metoda koja se najčešće koristi za sintezu nanočestica srebra je električno (lučno) pražnjenje (engl. *arc discharge*) jer je vrlo brza i jednostavna metoda. Važan utjecaj na fizikalno-kemijska svojstva tako dobivenih čestica, poput veličine, morfologije, stabilnosti i čistoće, ima izbor medija za sintezu.

Laserska ablacija široko je korištena metoda za sintezu nanočestica srebra. Ključnu ulogu u dobivanju čestica karakterističnih svojstava imaju medij u kojem se sinteza odvija i laserski parametri. Za sintezu monodisperznih, ultračistih i nanorazmjernih čestica srebra

koristi se vodeni medij.⁷ Poznata je i sinteza na zraku, no prisustvo kisika može uzrokovati nastajanje srebrovog oksida čak i uz korištenje inertnog plina.⁸

Litografija je tehnika kojom se vrlo precizno mogu kontrolirati veličina, oblik i položaj sintetiziranih nanostruktura. Unatoč tome, litografija je vrlo složena tehnika s visokim operativnim troškovima što ograničava primjenu ove tehnike na maloj skali.⁹

Osim navedenih tehnika, postoje i mnoge druge fizikalne metode kojima se sintetiziraju nanočestice srebra poput raspršivanja metala, termalnog isparavanja i kondenzacije kojima se mogu dobiti različiti oblici, veličine i hibridne strukture nanočestica srebra.

2.1.2. *Kemijske metode sinteze nanočestica srebra*

Kemijske metode sinteze nanočestica srebra temelje se na kemijskoj transformaciji početnog materijala. Proces zahtijeva četiri ključne komponente, a to su metalni prekursor (najčešće srebrov nitrat), redukcijsko sredstvo, stabilizator i otapalo. Većina kemijskih i bioloških metoda sinteze nanočestica srebra su sinteze u otopini, ali postoje i sintetski putovi u čvrstom stanju. Primjer takve sinteze je mehaničko mljevenje srebrovog nitrata s prahom đumbira (*Zingiber officinale*).¹⁰ Među najčešće korištenim metodama sinteze nanočestica srebra su redukcija s citratima (Turkevicheva metoda), redukcija borhidridom, Tollensova reakcija te poliolni proces. Osim navedenih metoda sinteze nanočestica srebra, postoje i mnoge druge, a svaka od tih metoda omogućuje različite stupnjeve kontrole nad veličinom, distribucijom i morfologijom čestica.

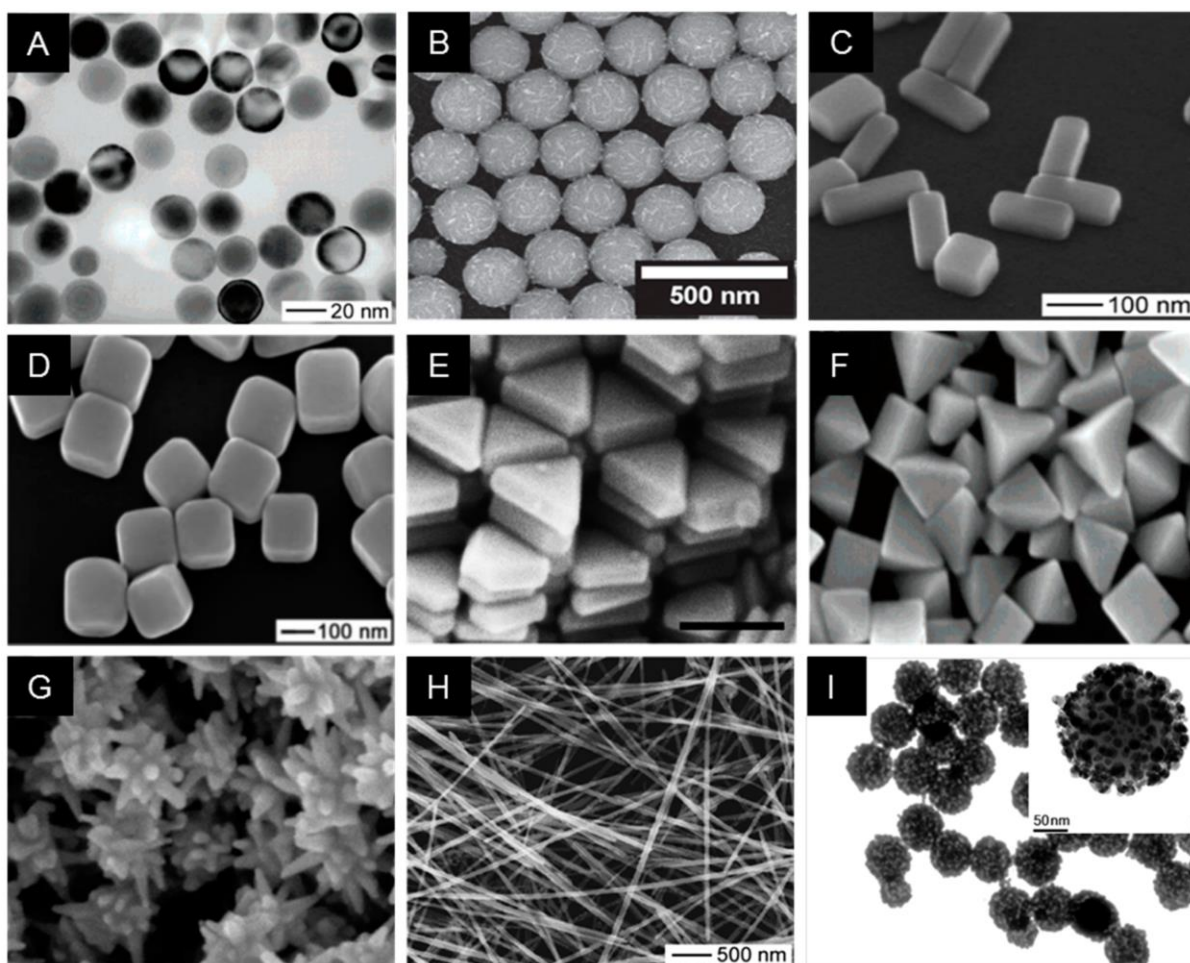
Turkevicheva metoda sinteze nanočestica srebra koristi srebrov nitrat kao prekursor, a trinitrijev citrat kao redukcijsko i stabilizirajuće sredstvo. Ova metoda vrlo je često korištena zbog svoje jednostavnosti i isplativosti.¹¹

Redukcija srebrova nitrata s natrijevim borhidridom koristi se kada je potrebna veća preciznost u dobivanju čestica srebra određene veličine i oblika jer je natrijev borhidrid jači reducens od citratnog aniona. Ovim načinom sinteze mogu se dobiti oblici kao što su nanočestice, porozne nanočestice, nanotrokuti, nanošipke te oblici nalik na kolačiće.¹²

Tollensova reakcija temelji se na redukciji amino-kompleksa srebra $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ s aldehydima, najčešće šećerima. Korištenjem Tollensovog reagensa za sintezu nanočestica srebra omogućuje sintezu različitih oblika nanočestica poput struktura jezgra-ljuska i inverznih struktura jezgra-ljuska. Također, kao prekursor moguće je koristiti i teško topljivi srebrov klorid koji se prevodi u Tollensov reagens što čini ovu metodu izuzetno korisnom.¹³

U poliolnoj metodi sinteze nanočestica srebra koriste se poliolne vrste poput etilen glikola koje služe kao reducens, ali i kao otapalo. Promjenom reakcijskih uvjeta poput temperature, koncentracije reagensa, promjenom poliolne vrste i vrstom pozadinskog elektrolita postiže se visoki stupanj kontrole nad oblikom i veličinom sintetiziranih nanočestica.¹⁴

Na slici 3. prikazane su nanostrukture srebra koje se mogu dobiti promjenom reakcijskih uvjeta tijekom njihove sinteze.



Slika 3. TEM i SEM slike nanostrukture srebra dobivenih pri različitim reakcijskim uvjetima sinteze.¹⁵

Kemijska transformacija prekursora srebra može biti inducirana različitim fizikalnim agensima poput laserskog zračenja i toplinske energije stoga postoje i fizikalno-kemijske metode sinteze nanočestica srebra. U takvom pristupu sintezi najčešće se uzrokuje raspad prekursora kao što su srebrove soli oksalata, nitrata ili masnih kiselina pri čemu nastaju

nanočestice srebra. Na taj način mogu se kontrolirati brojni parametri nastalih čestica, a sama sinteza vrlo je brza. Unatoč tome, procesi su skupocjeni i nisu pogodni za rad na većoj skali te praktičnu primjenu.

2.1.3. *Biološke metode sinteze nanočestica srebra*

Biološka sinteza nanočestica srebra održiva je i ekološki prihvatljiva alternativa konvencionalnim kemijskim i fizikalnim metodama. Tijekom biološke sinteze nanočestica srebra ne nastaju toksični produkti te same čestice karakterizira niža citotoksičnost za eukariotsku stanicu što povećava njihov potencijal za biomedicinsku primjenu. Sama sinteza temelji se na istim principima kao i kemijske metode sinteze nanočestica srebra. Razlika je u tome što se kao reducensi i stabilizatori u sintezi koriste tvari iz različitih bioloških izvora kao što su biljke, gljive, alge, bakterije i virusi. Sinteza na biljnoj bazi korištenjem ekstrakata iz lišća, voća, sjemenki i pigmenata kao što su kurkumin i betanin naširoko je istražena, kao i putovi posredovani proteinima i polisaharidima koji uključuju spojeve poput kitozana i pektina.¹⁶ Sinteza potpomognuta mikroorganizmima, odnosno uz korištenje bakterija, gljivica i cijanobakterija, može se odvijati unutarstaničnim putevima ili upotrebom supernatanta kulture, bakterijske biomase ili ekstrakta bez stanica. Unatoč svojim prednostima biološka sinteza predstavlja izazove uključujući ograničenu kontrolu nad morfologijom i čistoćom nanočestica. Tijekom sinteze nanočestica srebra postoji mogućnost nastanka srebrova klorida i kompozita srebro/srebrov klorid zbog prisutnosti kloridnih iona u mediju za rast kulture. Ovi čimbenici mogu otežati karakterizaciju nanočestica i ograničiti njihovu primjenjivost. Unatoč tome, polje nastavlja napredovati, uz stalne napore usmjerene na poboljšanje ponovljivosti i razumijevanje mehanizama koji leže u osnovi biosinteze.

2.2. **Karakterizacija nanočestica srebra**

Za potpuno razumijevanje svojstava, strukture i ponašanja nanočestica srebra nužno je upotrijebiti niz analitičkih tehnika. Njihov pažljiv odabir ključan je za dobivanje pouzdanih i sveobuhvatnih informacija o sustavu koji se istražuje. Unatoč tome, točnost dobivenih rezultata može biti narušena zbog ograničenja pojedine metode što može dovesti do pogrešnih zaključaka. U nastavku su opisane analitičke tehnike koje se najčešće koriste u karakterizaciji nanočestica srebra.

2.2.1. Elektronska mikroskopija

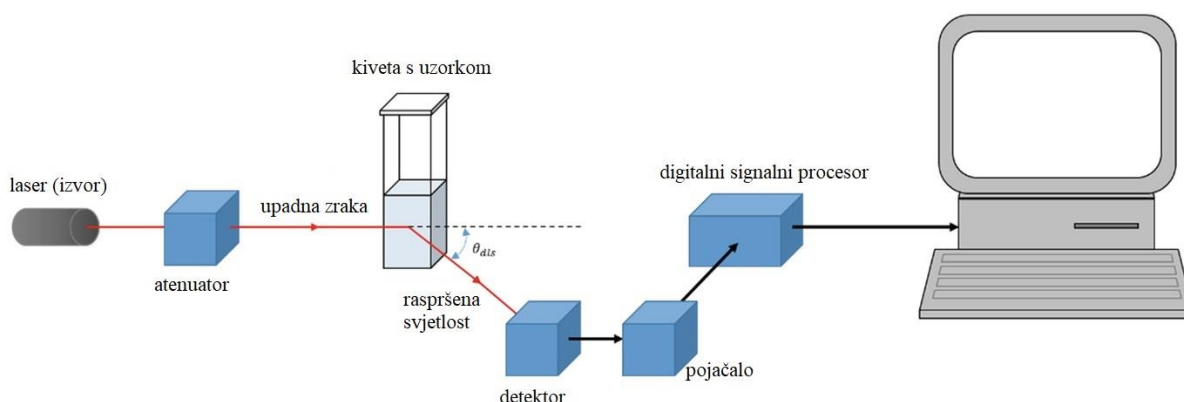
Tehnike elektronske mikroskopije pretražna elektronska mikroskopija (engl. *Scanning Electron Microscopy*, SEM) i transmisijiska elektronska mikroskopija (engl. *Transmission Electron Microscopy*, TEM) koriste se za dobivanje informacija o strukturi i površinskoj morfologiji materijala, pa tako i nanočestica srebra.

SEM je vrsta mikroskopa koji stvara slike uzorka tako da fokusirani snop elektrona prelazi preko površine uzorka. Emitirani elektroni s površine uzorka mogu se detektirati te se pomoću njih formira slika, difraktogram ili kemijski spektar uzorka.¹⁷ SEM je korišten za ispitivanje taloženja nanočestica srebra na silikatnim sferama i štapićima, na poliesterskim vlaknima i platnu te za praćenje biološke aktivnosti nanočestica srebra u mikroorganizmima i oblicima. Kombinacijom SEM-a s fokusiranim ionskim snopom moguća je izrada presjeka uzorka i njegova dodatna analiza. Jedan od nedostataka SEM-a je potreba za vodljivošću uzorka. Nabijanje neprovodljivih uzoraka može negativno utjecati na kvalitetu slike. Negativno nabijena površina uzorka može uzrokovati stvaranje sekundarnih elektrona koji utječu na energiju slijetanja upadnih elektrona. Pozitivna površina uzorka uzrokuje formiranje električnog polja u materijalu koje privlači elektrona i on ostaje „zarobljen“ u položaju. Tako „zarobljen“ elektron utječe na lokalno polje i druge elektrone. Navedeni problemi mogu se eliminirati korištenjem ESEM metode (engl. *Environmental SEM*) koji koristi komoru s vodenom parom umjesto vakuuma. Na taj se način sprječava isušivanje i dodatna oštećenja uzorka kao što su promjena oblika, smanjenje veličine ili pucanje.¹⁸

TEM je vrsta mikroskopa koji funkcionira tako da usmjereni snop elektrona visoke energije prolazi kroz tanki sloj uzorka. Kako elektroni prolaze kroz uzorak, dolazi do njihovog raspršenja koje ovisi o unutarnjoj strukturi uzorka.¹⁹ TEM se koristi za proučavanje strukturnih značajki nanočestica, odnosno veličine, oblika, rasporeda i unutarnje strukture. Glavni nedostaci TEM-a su zahtjevna priprema vrlo tankih uzoraka te mogućnost oštećenja uzorka zbog korištenja visokonaponskog snopa elektrona. Također, slike dobivene TEM-om su dvodimenzionalne što može ograničiti prikaz morfologije. Ovisno o samoj izvedbi TEM-a te kombinacijom s drugim tehnikama poput SEM-a može se pratiti sinteza nanočestica srebra u mikroorganizmima, njihov rast i agregacija te se mogu razlikovati adsorbirane molekule poput proteina na nanočesticama srebra.

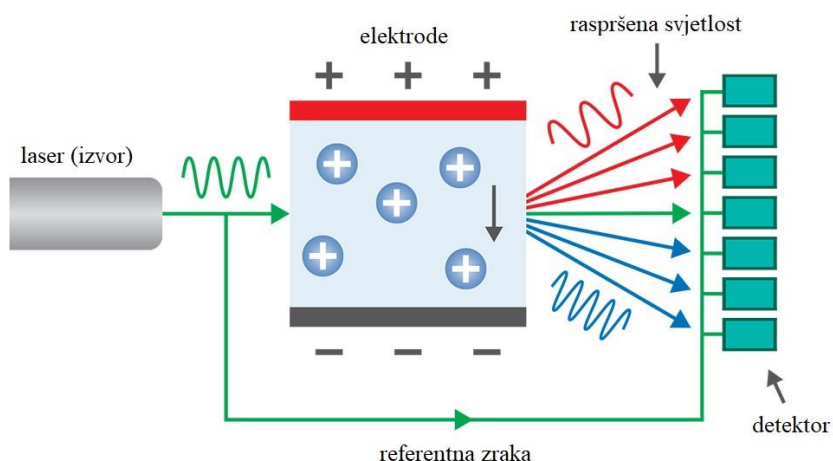
2.2.2. Dinamičko i elektroforetsko raspršenje svjetlosti

Dinamičko raspršenje svjetlosti (engl. *Dinamic Light Scattering*, DLS) i elektroforetsko raspršenje svjetlosti (engl. *Electrophoretic Light Scattering*, ELS) dvije su komplementarne tehnike koje se često koriste u fizikalno-kemijskoj karakterizaciji nanočestica srebra. DLS omogućuje određivanje hidrodinamičkog promjera nanočestica temeljenog na analizi fluktuacija intenziteta raspršene svjetlosti kao rezultat Brownovog gibanja čestica u suspenziji. Shematski prikaz DLS uređaja prikazan je na slici 4.



Slika 4. Shematski prikaz DLS uređaja.²⁰

S druge strane, ELS se koristi za određivanje elektrokinetičkog potencijala čestica mjerenjem njihove elektroforetske pokretljivosti u električnom polju. Princip rada ELS uređaja prikazan je na slici 5. Visoke apsolutne vrijednosti elektrokinetičkog potencijala nanočestica ukazuju na snažno elektrostatsko odbijanje među česticama i veću stabilnost suspenzije.

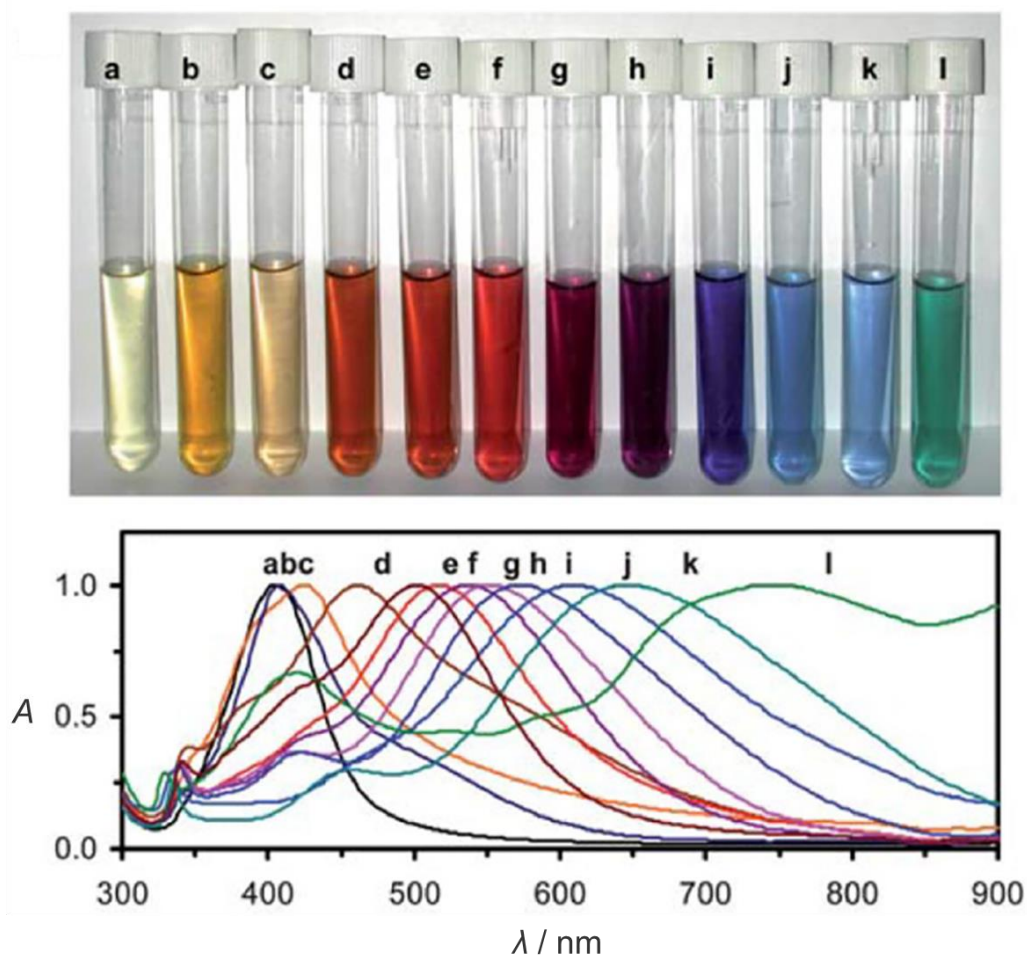


Slika 5. Shematski prikaz ELS uređaja.²¹

Značajan utjecaj na hidrodinamički promjer i elektrokinetički potencijal nanočestica mogu imati čimbenici poput pH-vrijednosti suspenzije, ionske jakosti i prisutnost drugih molekula. Pokazano je da nanočestice srebra stabilizirane citratnim anionom imaju negativniji elektrokinetički potencijal od onih nanočestica stabiliziranih ekstraktima biljaka te su suspenzije s citratnim anionima bile pokazivale veću stabilnost. Također, adsorpcija proteina ili iona iz okolnog medija može dovesti do povećanja hidrodinamičkog promjera nanočestica srebra te izazvati njihovu agregaciju. Zajedno DLS i ELS omogućuju detaljan uvid u veličinu nanočestica srebra, površinske interakcije i ponašanje koloida u različitim uvjetima.

2.2.3. UV-Vis spektrofotometrija

UV-Vis spektroskopija je široko korištena, brza i osjetljiva analitička tehnika koja se često koristi za karakterizaciju nanočestica srebra. UV-Vis spektar srebra ima karakterističan apsorpcijski maksimum koji je povezan s lokaliziranom površinskom plazmonskom rezonancijom (engl. *Localized Surface Plasmon Resonance*, LSPR). LSPR nastaje zbog koherentne oscilacije vodljivih elektrona potaknute vanjskim elektromagnetskim zračenjem. Položaj i intenzitet apsorpcijskog maksimuma srebra ovise o karakteristikama nanočestica srebra poput veličine, oblika, sastava, površinske kemije, okolnog medija i interakcija među česticama. Primjerice, sferične nanočestice srebra imaju apsorpcijski maksimum oko 400 nm, a trokutaste nanopločice i agregirani sustavi pokazuju šire vrpce pomaknute prema većim valnim duljinama. Slika 6. prikazuje kako različiti oblici koloidnog srebra utječe na boju suspenzija srebra te njihov apsorpcijski spektar.



Slika 6. Suspenzije koloidnog srebra različitih oblika i njihovi odgovarajući apsorpcijski spektri.

UV-Vis spektroskopija ključna je za praćenje stabilnosti nanočestica srebra i njihovih svojstava, ali i za optimizaciju sintetskih uvjeta kako bi se dobile nanostrukture za plazmonske primjene poput senzora, katalizatora i fotoničkih uređaja.

2.2.4. Infracrvena i Ramanova spektroskopija

Infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom (FTIR) analitička je tehnika pomoću koje je moguće identificirati funkcijske skupine molekula adsorbiranih na površini nanočestica srebra, kontrolirati funkcionalizaciju površine te identificirati skupine koje sudjeluju u sintezi i stabilizaciji nanočestica srebra. Sama metoda FTIR često nije dovoljna za preciznu identifikaciju pojedinačnih skupina zbog preklapanja vibracijskih vrpca i utjecaja susjednih funkcionalnih skupina. Iz tog razloga infracrvena spektroskopija može se kombinirati

s nekim drugim analitičkim tehnikama poput spektroskopije nuklearne magnetske rezonancije (engl. *Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, NMR).

Ramanova spektroskopija temelji se na neelastičnom raspršenju svjetlosti te se također može koristiti za karakterizaciju nanočestica srebra. Pomoću Ramanove spektroskopije mogu se detektirati vibracijske vrpce onih funkcijskih skupina koje su slabo izražene ili neaktivne u IR spektrima čime pruža komplementarne informacije od IR spektroskopije. Osim karakterizacije površine, Ramanova spektroskopija korištena je za ispitivanje interakcija nanočestica srebra s različitim spojevima kao što su peptoidi s 2,2'-piridinom gdje je zabilježena nova vrpca pri 241 cm^{-1} . Navedena vrpca odgovara interakciji između srebra i dušika piridina. Također, promatrane su promjene u spektrima proteina poput laktoferina nakon vezanja srebra.

2.2.5. Termalna analiza

Termalna analiza ključna je za razumijevanje ponašanja nanočestica srebra osobito zbog njihove primjene u visokotemperaturnim sustavima. Nanočestice srebra često se nalaze u različitim materijalima zbog svojih antibakterijskih svojstava pa je za takve kompozite potrebna termalna analiza kako bi se proučila termalna stabilnost takvog sustava. Najčešće korištene metode za termalnu analizu nanočestica srebra su visokotemperaturna in situ rendgenska difrakcija (engl. *X-ray Diffraction*, XRD), termogravimetrijska analiza (engl. *Thermogravimetric Analysis*, TGA) i diferencijalna pretražna kalorimetrija (engl. *Differential Scanning Calorimetry*, DSC).²² Primjerice, XRD analizom nanočestica Ag_2S pokazala je fazne prijelaze od $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$ do $\beta\text{-Ag}_2\text{S}$ te konačno u elementarno srebro s porastom temperature. Termogravimetrijskom analizom pokazano je da se ugradnjom nanočestica srebra u materijale poput želatine ili celuloze može poboljšati toplinska stabilnost navedenih tvari. Jedna od primjena DSC analize je praćenje faznih prijelaza uzorka i određivanje promjene temperature staklastog prijelaza. Uočeno je da se s povećanjem udjela nanočestica srebra u filmu želatine smanjuje temperatura staklastog prijelaza želatine što ukazuje na povećanje stupnja neuređenosti u strukturi želatine.

2.3. Fizikalno-kemijska svojstva i primjena nanočestica srebra

Fizikalno-kemijska svojstva nanočestica srebra primarno su određena njihovim kemijskim sastavom, veličinom i površinskim karakteristikama. Iako su najčešće istraživane nanočestice

elementarnog srebra, drugi oblici poput srebrova sulfida i srebrova oksida također pokazuju korisna svojstva. Primjerice, nanočestice srebrova sulfida potencijalni su biokompatibilni kontrastni agensi za medicinsko oslikavanje, a nanočestice srebrova oksida, osim što imaju antimikrobna svojstva, koriste se kao punila za printanje elektroničkih komponenti. Nanočestice srebra sklone su transformacijama poput kloriranja, oksidacije i sulfidacije što utječe na njihovu topljivost, reaktivnost i bioraspoloživost. Upotreba stabilizatora i površinska funkcionalizacija nanočestica srebra imaju ključnu ulogu u stabilizaciji suspenzija te utječu na njihovu agregaciju, površinski naboj i interakcije s biološkim sustavima. Kemijska svojstva nanočestica srebra u različitim uvjetima mogu se proširiti modifikacijama u sustavu, primjerice stvaranjem legura sa zlatom, paladijem ili platinom te nanokompozita s oksidima titanija ili silicija.

Zahvaljujući iznimnim plazmoničkim svojstvima, nanočestice srebra široko se primjenjuju u analitičkim tehnikama poput površinski pojačanog Ramanovog raspršenja (engl. *Surface Enhanced Raman Spectroscopy*, SERS) i nanostrukturom potpomognutoj laserskoj desorpciji/ionizaciji (engl. *Nanostructure-Assisted Laser Desorption/Ionization*, NALDI). Srebro je jedno od najučinkovitijih SERS aktivnih metala zbog svoje sposobnosti stvaranja snažne lokalizirane površinske plazmonske rezonancije pri čemu nastaju tzv. vrući elektroni (engl. *hot electrons*). Kao rezultat toga inducira se elektromagnetsko pojačanje Ramanova raspršenja molekula koje se nalaze blizu površine nanočestica srebra. Iz tog razloga tehnika SERS koristi se detekciju niskih koncentracija biomolekula, lijekova, toksina i ostalih analita u tragovima. Slično tome, nanočestice srebra u tehnici NALDI povećavaju učinkovitost desorpcije iona, a osjetljivost je veća nego u slučaju korištenja drugih plemenitih metala poput platine i zlata. Zahvaljujući navedenim svojstvima, nanočestice srebra nalaze primjenu i u fluorescenciji, katalizi te apsorpciji solarne energije.

2.4. Zaključak

Nanočestice srebra predstavljaju svestranu klasu nanomaterijala s brojnim primjenama u znanosti, industriji i biomedicini. Njihova sinteza može se provoditi fizikalnim, kemijskim ili biološkim metodama pri čemu svaka omogućuje specifičnu kontrolu nad veličinom, oblikom i površinskom kemijom čestica. Odabir metode sinteze ključan je korak jer izravno utječe na fizikalno-kemijska svojstva nanočestica srebra, uključujući njihovu stabilnost, reaktivnost i

biokompatibilnost. Detaljna karakterizacija nanočestica srebra pomoću naprednih analitičkih tehnika kao što su elektronska mikroskopija, UV-Vis, IR i Ramanova spektroskopija te tehnike termalne analize neophodne su za razumijevanje odnosa strukture i svojstava nanočestica srebra te za optimizaciju materijala za specifične primjene. Nanočestice srebra pokazuju jedinstvena svojstva poput lokalizirane površinske plazmonske rezonancije, površinske reaktivnosti i podesivog optičkog ponašanja što ih čini korisnima u područjima poput katalize, u antimikrobnim premazima, biosenzorima i tehnikama poput površinski pojačanog Ramanovog raspršenja.

§ 3. LITERATURNI IZVORI

1. <https://www.britannica.com/science/nanoparticle> (datum pristupa 31. ožujka 2025.)
2. I. Ijaz, E. Gilani, A. Nazir, A. Bukhari, *Green Chem. Lett. Rev.* **13** (2020) 59–81.
3. K. A. Altmarr, *Front. Microbiol.* **14** (2023)
4. İ. M. Alkaç, B. Çerçi, C. Timuralp, F. Şen, *Nanomaterials for Direct Alcohol Fuel Cells*, Elsevier, 2021, str. 17–33.
5. S. Pan, M. Ashaduzzaman, X. Li, E. Wornyo, *Curr. Opin. Electrochem.* **37** (2023) 101174.
6. J. Natsuki, T. Natsuki, Y. Hashimoto, *Int. J. Matter. Sci. Appl.* **4** (2015) 325–332.
7. W. J. Kang, C. Q. Cheng, Z. Li, Y. Feng, G. R. Shen, X. W. Du, *ChemCatChem* **11** (2019) 5976–5981.
8. I. Khan, A. Bahuguna, M. Krishnan, S. Shukla, H. Lee, S. H. Min, *Sci. Total. Environ.* **679** (2019), 365–77.
9. N. P. U. Nguyen, N. T. Dang, L. Doan, T. T. H. Nguyen, *Processes* **11** (2023) 2617–2634.
10. W. H. Eisa, M. F. Zayed, B. Anis, L. M. Abbas, S. S. M. Ali, A. M. Mostafa, *J. Cleaner Prod.* **241** (2019) 118398–118410.
11. A. Mazzonello, V. V. Valdramidis, C. Farrugia, J. N. Grimal, R. Gatt, *IJMERE* **7** (2017) 41–47.
12. T. Huang, X. H. N. Xu, *J. Mater. Chem.* **20** (2010) 9867–9876.
13. M. A. AbuDalo, I. R. Al-Mheidat, A. W. Al-Shurafat, C. Grinham, V. Oyanedel-Craver, *PeerJ* **7** (2019)
14. B. Wiley, T. Herricks, Y. Sun, Y. Xia, *Nano Lett.* **4** (2004) 1733–1739.
15. S. H. Lee, B. H. Jun, *Int. J. Mol. Sci.* **20** (2019) 865–889.
16. J. H. Lee, D. Jeong, P. Kanmani, *Carbohydr. Polym.* **224** (2019) 115159.
17. D. J. Stokes, *Principles and Practice of Variable Pressure/environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM)*, Wiley, 2008, str. 17–20.
18. D. J. Burleson, M. D. Driesse, R. L. Penn, *J. Environ. Sci. Health, Part A: Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* **39** (2004) 2707–2753.
19. D. B. Williams, C. B. Carter, *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*, Springer, 2009, str. 3–22.

20. S. S. Leong, W. M. Ng, J. Lim, S. P. Yeap, *Handbook of Materials Characterization*, Springer, Cham., 2018, str. 77–111.
21. <https://www.wyatt.com/library/theory/electrophoretic-light-scattering-theory.html> (datum pristupa 28. ožujka 2025.)
22. M. A. M. Khan, S. Kumar, M. Ahamed, S. A. Alrokayan, M. S. AlSalhi, *Nanoscale Res. Lett.* **6** (2011) 434–442.