

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

ANTON POPOV

KOLOIDINIŲ TIRPALŲ SUDARYTŲ IŠ POLIMERINIŲ IR METALINIŲ
NANODALELIŲ TYRIMAI

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, Chemija (03P)

Vilnius, 2018 metai

Disertacija rengta 2013 – 2017 metais Vilniaus universitete, Chemijos ir geomokslų fakultete ir J. Haber Katalizės ir paviršių chemijos institute.

Mokslinė vadovė: prof. dr. Almira Ramanavičienė (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, chemija – 03P).

Disertacija ginama viešame disertacijos gynimo tarybos posėdyje:

Pirmininkas:

prof. dr. Stasys Tautkus (Vilnius universitetas, Fiziniai mokslai, Chemija - 03P)

Nariai:

prof. dr. Vida Vičkačkaitė (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, chemija – 03P);

doc. dr. Artūras Katelnikovas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, chemija – 03P);

dr. Sigita Jurkonienė (Gamtos tyrimų centras, biomedicinos mokslai, biologija - 01B);

dr. Aneta Michna (J. Haber Katalizės ir paviršių chemijos institutas, fiziniai mokslai, chemija – 03P).

Disertacija bus ginama viešame disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2018 m. rugsėjo mėn. 21 d. 14 val. Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Neorganinės chemijos auditorijoje.

Adresas: Naugarduko 24, LT – 03225 Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2018 m. rugpjūčio mėn. 20 d.

Disertacija galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir FTMC bibliotekose bei VU interneto svetainėje adresu: <https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

ANTON POPOV

INVESTIGATION OF COLLOID SOLUTIONS CONSISTING OF
POLYMERIC AND METALLIC NANOPARTICLES

Summary of doctoral dissertation
Physical sciences, Chemistry (03P)

Vilnius, 2018

The dissertation was prepared at Vilnius University Faculty of Chemistry and Geosciences and J. Haber Institute of Catalysis and Surface Chemistry in the period of 2013 – 2017.

Supervisor: prof. dr. Almira Ramanavičienė (Vilnius University, Physical Sciences, Chemistry – 03P).

Evaluation board:

Chairman:

prof. dr. Stasys Tautkus (Vilnius University, Physical Sciences, Chemistry – 03P).

Members:

prof. dr. Vida Vičkačkaitė (Vilnius University, Physical Sciences, Chemistry – 03P);

doc. dr. Artūras Katelnikovas (Vilnius University, Physical Sciences, Chemistry – 03P);

dr. Sigita Jurkonienė (Nature Research Centre, Biomedical Sciences, biology – 01B);

dr. Aneta Michna (J. Haber Institute of Catalysis and Surface Chemistry, Physical Sciences, Chemistry – 03P).

The official discussion will be held at 2 p.m. on the 21st of September, 2018 at the public meeting of the council at the Inorganic Chemistry lecture hall of the Faculty of Chemistry and Geosciences.

Address: Naugarduko 24, LT – 032258, Vilnius, Lithuania.

Summary of the doctoral dissertation was mailed on the 20th August, 2018.

The dissertation is available at the Libraries of Vilnius University and Center for Physical Sciences and Technology and online at <https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

SANTRUMPOS

- 1,6-DMH – 1,6-dimerkaptiheksanas
- AgND – sidabro nanodalelės
- ANI – anilinas
- AJM – atominių jėgų mikroskopija
- AuND – aukso nanodalelės
- GOx – gliukozės oksidazė
- ELP – elektrai laidūs polimerai
- I - joninė jėga
- ND – nanodalelės
- PAH – poli(alilamino hidrochloridas)
- PANI – polianilinas
- RŠ – regimoji šviesa
- SEM – skenuojanti elektroninė mikroskopija
- SAM – savitvarkis monosluoksniš

Įvadas

Nanotechnologija yra gerai žinoma tarpdisciplininė mokslo šaka, kurios vystymas prasidėjo dar XX amžiuje. Ši sparčiai besivystanti mokslo sritis apima įvairių nanomedžiagų sintezę, tyrimus bei taikymą įvairiose srityse. Didelis susidomėjimas nanotechnologijomis gali būti paaiškintas tuo, kad nanodalelės (ND) pasižymi savybėmis, kurios ryškiai skiriasi nuo didesnio dydžio tos pačios medžiagos dalelių savybių. Tai skatina nanomedžiagų pritaikymą daugelyje naujų sričių.

Dažnai, norint gauti įvairias ND, yra atliekama jų koloidinių tirpalų sintezė. Sintezės metodo bei sąlygų parinkimas paprastai priklauso nuo to, kokiomis savybėmis turi pasižymėti norimos ND. Dalelių dydis, forma bei paviršiaus funkcionalizavimas daro įtaką ND savybėmis. Naujų sintezės būdų paieška ir vystymas leis gauti ND, pasižyminčias ypatingomis savybėmis. Be to, yra labai svarbu kontroliuoti ir optimizuoti ND gamybą tam, kad užtikrinti dalelių stabilumą, grynumą bei jų dydžio ir formos vienodumą.

Elektrai laidžių polimerų (ELP) nanostruktūrų sintezė yra labai perspektyvi tyrimo sritis, nes yra galimybė ELP gerą elektrinį laidumą derinti su kitomis jiems būdingomis savybėmis. Polianilinas (PANI) yra vienas iš populiariausių ELP naudojamų moksliniuose tyrimuose. Keičiant sintezės sąlygas bei kontroliuojant legiravimą, galima gauti PANI, kuris skirsis laidumo savybėmis. Be to, polianilinas pasižymi terminiu ir cheminiu stabilumu bei puikiomis mechaninėmis savybėmis. Tačiau yra sunku pagaminti PANI nanostruktūras, pasižyminčias geru biologiniu suderinamumu. Fermentinio sintezės būdo ir papildomų praplovimo stadijų panaudojimas leidžia pagerinti PANI tirpumą vandenyje ir biologinį suderinamumą bei nenaudoti toksiškų ir biologiškai neskaidomų medžiagų.

Sidabro nanodalelės (AgND) ir aukso nanodalelės (AuND) yra dažnai taikomos skirtingose mokslo srityse. Unikalioms AgND ir AuND optinėms savybėms yra susietos su paviršiaus plazmonų rezonansų reiškiniu, todėl šios metalinės ND rado savo pritaikymą biologinių jutiklių kūrimo srityje ir paviršiaus sustiprintos Ramano sklaidos spektroskopijoje.

AgND dėl savo antimikrobinių savybių dažnai yra taikomos medicinoje, pavyzdžiui, formuojant AgND monosluoksnį chirurginių instrumentų paviršiuje. Joninė

jėga (I), tirpalo pH bei papildomų medžiagų buvimas tirpale gali trukdyti suformuoti tankų nanodalelių monosluoksnį bei daryti įtaką jo stabilumui, todėl ypatingai svarbu tirti ir turėti galimybę kontroliuoti AgND monosluoksnio formavimą.

Fermentiniu būdu sintetintos ar padidintos nanodalelės gali būti naudojamos kaip analizinis signalas ar pritaikytos analizinio signalo stiprinimui. Įvairios oksidazės, pavyzdžiui, gliukozės oksidazė (GOx), gali būti panaudotos AuND biokatalitiniame didinime. AuND biokatalitinis didinimas gali būti atliekamas kai dalelės yra tirpale arba kai dalelės yra imobilizuotos per savitvarę monosluoksnį (SAM) paviršiuje. AuND didinimo procesas gali būti stebimas spektrofotometriškai. Tokie metodai kaip dinaminės šviesos sklaidos (DŠS) metodas, atominių jėgų mikroskopija (AJM) bei skenuojanti elektroninė mikroskopija (SEM) taip pat tinka padidintų AuND dydžio nustatymui.

Darbo tikslas:

Skirtingais metodais ištirti cheminiu ir fermentiniu būdais susintetintų ar biokatalitiškai padidintų polimerinių ir metalinių nanodalelių koloidinius tirpalus skirtus tolimesniam biomedicininiam ir bioanaliziniam taikymui.

Darbo uždaviniai:

1. Nustatyti optimalias polianilino nanodalelių sintezės sąlygas vykdant anilino polimerizaciją/oligomerizaciją terpėje su vandenilio peroksidu, kuris susidarė gliukozės oksidazės fermentinės reakcijos metu.
2. Charakterizuoti dinaminės šviesos sklaidos bei ciklinės voltamperometrijos metodais polianilino nanodaleles susintetintas optimaliomis sąlygomis.
3. Nustatyti tanino rūgšties tirpalo ir sidabro nanodalelių koloidinio tirpalo fizikochemines savybes bei stabilumą.
4. Ištirti krūvį turinčių sidabro nanodalelių nusodinimo ant žėručio paviršiaus padengto poli(alilamino hidrochloridu) kinetiką iš koloidinio tirpalo, kurio sudėtyje yra tanino rūgšties.

5. Ištirti UV-RŠ spektroskopijos, atominių jėgų mikroskopijos ir dinaminės šviesos sklaidos metodais AuND esančių koloidiniame tirpale ir imobilizuotų paviršiuje biokatalitinį didinimą.
6. Ištirti biokatalitiškai padidintų AuND dydžio priklausomybę nuo gliukozės koncentracijos.

Ginamieji teiginiai:

1. PANI nanodalelių susidarymo greitis priklauso nuo fermentinės reakcijos trukmės.
2. PANI nanodalelių dydis didėja ilginant fermentinės reakcijos trukmę.
3. AgND monosluoksnio formavimas ant žėručio, padengto PAH sluoksniu, priklauso nuo tanino rūgšties koncentracijos koloidiniame tirpale.
4. Biokatalitiškai tirpale padidintų AuND hidrodinaminis skersmuo ir imobilizuotų paviršiuje nanodalelių aukštis priklauso nuo gliukozės koncentracijos ir reakcijos trukmės.
5. AuND biokatalitinis didinimas gali būti pritaikytas gliukozės koncentracijos nustatymui analizinėmis sistemomis pagrįstomis dinaminės šviesos sklaidos ir atominių jėgų mikroskopijos metodais.

Disertacijos sandara

Daktaro disertacija parašyta anglų kalba ir ją sudaro 9 skyriai: santrumpos sąrašas, įvadas, literatūros apžvalga, medžiagos ir metodai, rezultatai ir jų aptarimas, išvados, su disertacija susijusių mokslinių darbų sąrašas, disertanto gyvenimo aprašymas bei naudotos literatūros sąrašas.

Įvadas

Įvade aprašytas darbo aktualumas. Pažymimos nanotechnologijų svarba šiuolaikiniame kontekste bei ND savybių kontrolės galimybės. Paminėtos išskirtinės PANI savybės bei fermentinės sintezės privalumai. Aptiriamos išskirtinės AgND ir AuND optinės savybės. Apžvelgtos AgND antimikrobinės savybės bei įvairių faktorių įtaka AgND monosluoksnio formavimui. Paminėtas AuND biokatalitinio didinimo taikymo perspektyvumas. Išskirti AuND esančių koloidiniame tirpale ir imobilizuotų paviršiuje biokatalitinio didinimo galimi stebėjimo metodai.

1. Literatūros apžvalga

Literatūros apžvalgoje pateikiama koloidinių tirpalų apžvalga. Aprašomi svarbūs koloidinių sistemų stabilumo parametrai bei Daerzargin–Landau–Varvei–Overbeko teorijos pritaikymas aprašant koloidų stabilumą. Trumpai pristatytos polimerinių ir tauriųjų metalų nanodalelių taikymo sričiai. Išsamiai išnagrinėtos PANI atradimo istorija, jo savybės ir sintezės bei panaudojimo galimybės. Aprašytos AgND ir AuND savybės, skirtingi nanodalelių sintezės metodai bei jų įvairios taikymo sritys.

2. Metodika

Šią dalį sudaro tris skyriai, skirti eksperimentinės disertacijos dalies aprašymui. Skyriuje 2.1. pateikti visi reagentai ir medžiagos, kurie buvo naudojami tyrimų metu. Detalūs mėginių paruošimo bei eksperimentų atlikimo aprašymai pateikti 2.2. skyriuje. Skyriuje 2.3. aprašyta visa aparatūra, kuri buvo naudojama tyrimų metu. Tai pat šiame skyriuje aprašytos visos mėginių charakterizavimo metodikos bei pateikti trumpi dinaminės šviesos sklaidos ir nuolatinės srovės potencialo metodų teorijos pagrindai.

3. Rezultatai ir jų aptarimas

Rezultatų dalis sudaryta iš trijų skyrių. Pirmame skyriuje aprašoma fermentinė PANI nanodalelių sintezė, optimalių polimerizacijos sąlygų nustatymas bei polianilino nanodalelių charakterizavimas DŠS ir ciklinės voltamperometrijos metodais. Antrame skyriuje aprašytas AgND monosluoksnių formavimas ant žėručio paviršiaus iš tirpalų, kurių sudėtyje yra skirtingos tanino rūgšties koncentracijos bei nusodinimo kinetikos matavimas. Trečiame skyriuje aprašytas AuND esančių tirpaluose bei imobilizuotų per savitvarkį monosluosnį ant aukso lusto paviršiaus biokatalitinis didinimas.

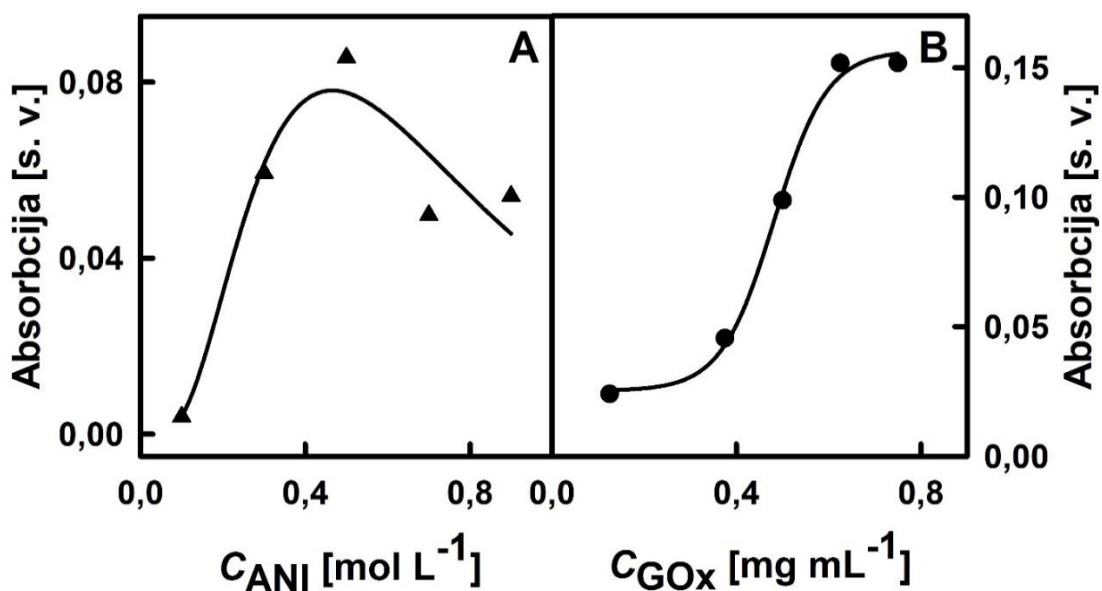
3.1. Fermentinio polianilino nanodalelių susidarymo tyrimai

Šioje dalyje aprašytas polianilino nanodalelių formavimas, kai anilino (ANI) polimerizacijos reakcija vyksta dėka gliukozės oksidazės fermentinės reakcijos metu susidariusio oksidatoriaus vandenilio peroksido, taip pat įtakos šiam procesui turi ir rūgštėjanti terpės pH. Tyrimo metu buvo nustatytos optimalios PANI nanodalelių sintezės sąlygos.

PANI nanodalelės buvo sintetamos tamsoje, kambario temperatūroje. Po polimerizacijos PANI nanodalelių tirpalas buvo centrifuguojamas, nuosėdos surenkamos ir praplaunamos. Plovimo procedūra buvo kartojama 3 kartus. Po to nuosėdos buvo užpilamos $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ acetatiniu buferiu pH 6,0 ir išmaišomos. Taigi, PANI dalelių tyrimai skirtingais metodais buvo atliekami ne polimerizacijos tirpale, o jas atskyrus ir praplovus.

Norint gauti pavienes stabilias PANI nanodaleles buvo parinktas tinkamas tirpalas, kuris buvo naudojamas dalelių praplovimui po sintezės. Tirpalų tinkamumas buvo įvertinamas po praplovimo stadijos gautas PANI nanodaleles suspendavus $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ acetatiniame buferyje pH 6,0 ir ištyrus koloidinius tirpalus spektrofotometriškai. Nustatyta, kad iš visų tirtų tirpalų labiausiai dalelių plovimui tinka $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ acetatinis buferis. PANI nanodalelių sintezė priklauso nuo anilino ir GOx koncentracijų polimerizacijos tirpale. Norint pagerinti PANI nanodalelių formavimą buvo ieškomos optimalios ANI ir GOx koncentracijos pradiniam tirpale. Dalelių sintezė buvo atliekama 21 valandą.

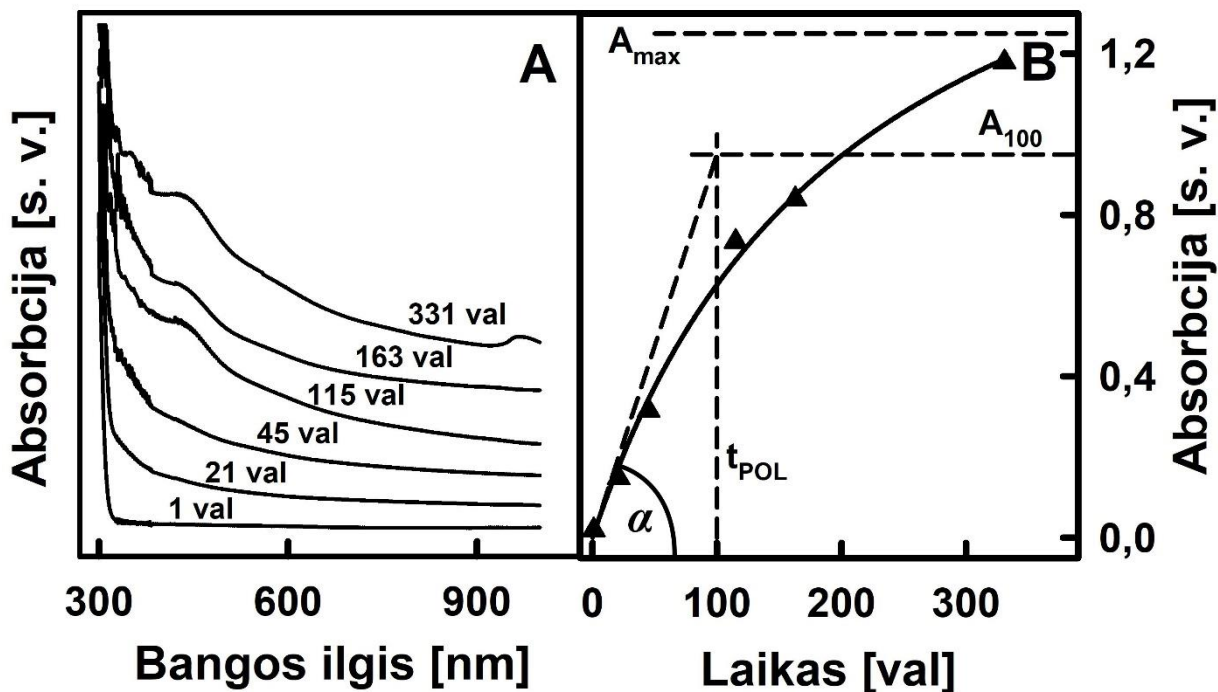
Optimalių anilino ir GOx koncentracijų parinkimui buvo atlikti du tyrimai. Pirmame, anilino koncentracija buvo keičiama intervale nuo 0,1 iki 0,9 mol L⁻¹ (pav. 1A). Didžiausia tirpalo absorbcija buvo nustatyta, kai anilino koncentracija pradiniam tirpale buvo 0,5 mol L⁻¹. Kaip optimali tolimesniems tyrimams buvo pasirinkta 0,5 mol L⁻¹ anilino koncentracija. Antro tyrimo metu buvo keičiama tik GOx koncentracija intervale nuo 0,125 iki 0,750 mg mL⁻¹ (pav. 1B). Pastebėta, kad didinant GOx koncentraciją PANI nanodalelių tirpalo absorbcija padidėjo 6,33 kartus. Kaip optimali buvo pasirinkta 0,75 mg mL⁻¹ GOx koncentracija.



1 pav. PANI nanodalelių tirpalo absorbcijos ($\lambda = 434$ nm) priklausomybė nuo pradinių anilino (A) ir gliukozės oksidazės (B) koncentracijų. (Polimerizacijos sąlygos: A – 0,05 mol L⁻¹ acetatinis buferis pH 6,0; 0,05 mol L⁻¹ gliukozės; 0,5 mg mL⁻¹ GOx, B – 0,05 mol L⁻¹ acetatinis buferis pH 6,0; 0,05 mol L⁻¹ gliukozės; 0,5 mol L⁻¹ anilino; polimerizacijos laikas – 21 val.

Taip pat buvo ištirta kaip polimerizacijos tirpalo absorbcijos spektrai priklauso nuo polimerizacijos trukmės (pav. 2A). Polimerizacijos laikas buvo keičiamas nuo 1 iki 331 val. Jeigu polimerizacijos pradžioje tirpalas buvo bespalvis ir absorbcijos smailės nebuvo registruojamos, tai bėgant laikui tirpalas tapo gelsvas ir dvi smailės ties $\lambda = 325$ nm ir $\lambda = 434$ nm išryškėjo. Pagal absorbciją ties $\lambda = 434$ nm gali būti įvertintas PANI nanodalelių susidarymas. Absorbcijos smailė ties $\lambda = 325$ nm yra būdinga benzeno žiedo $\pi \rightarrow \pi^*$ elektronų šuoliui ir šiuo atveju charakterizuoja PANI linijinės struktūros formavimą.

Polimerizacijos tirpalo absorbcija ties $\lambda = 434 \text{ nm}$ (pav. 2B) per 331 val. padidėjo 62,4 kartus. Kaip optimali sintezės trukmė buvo pasirinkta 115 valandų, atsižvelgus į tai, kad atliekant sintezę 331 val. absorbcija pasikeitė tik apytiksliai 1,5 karto, palyginus su tirpalo absorbcija po 115 val. sintezės.

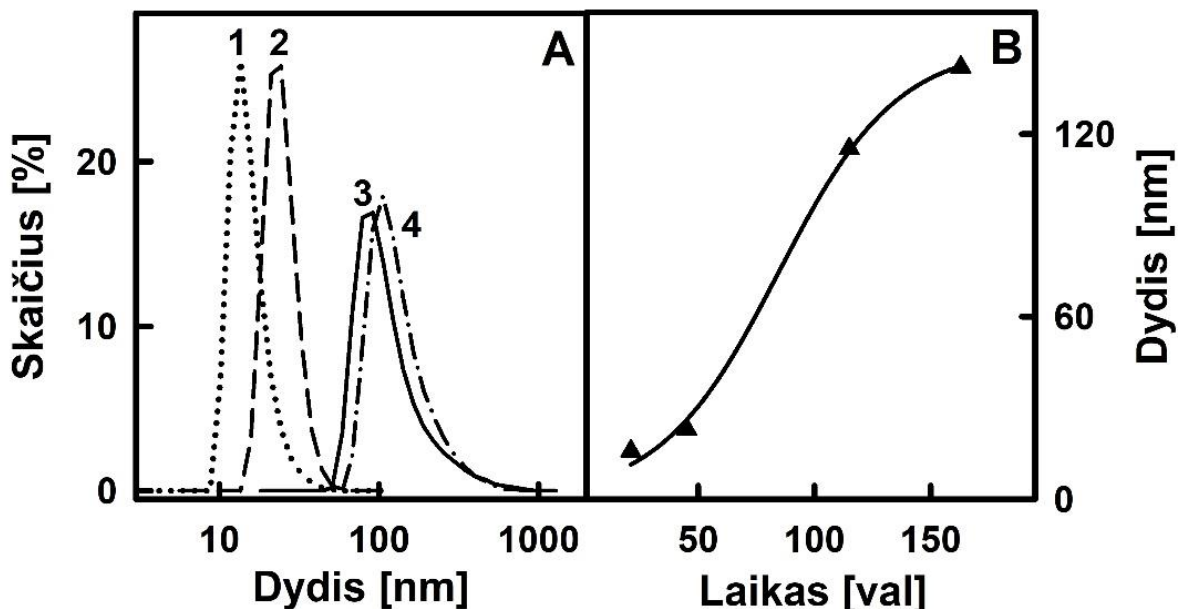


2 pav. Fermentinės PANI sintezės spektrai (A) bei PANI polimerizacijos tirpalo absorbcijos ties $\lambda = 434 \text{ nm}$ priklausomybė nuo sintezės trukmės (B). (Polimerizacijos sąlygos: $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ acetatinis buferis pH 6,0; $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ gliukozės; $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ anilino; $0,75 \text{ mg mL}^{-1}$ GOx).

Polimerizacijos greitis (V) yra lygus tga (pav. 2B). Norint nustatyti pradinį polimerizacijos greitį buvo įvertintos tikėtina maksimalia absorbcija, kai anilino konversija yra 100 %, bei tikėtina absorbcija, kai pradinis polimerizacijos greitis nesikeičia ir sintezė vykdoma 100 val., o pradinė anilino koncentracija yra $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Nanodalelių susidarymo greitis reakcijos pradžioje buvo lygus:

$$V = (tga) = \frac{A_{100} \times C_{ANI}}{A_{max} \times t_{Pol}} = \frac{0,95 \times 0,50}{1,25 \times 100} = 0,0038 \text{ mol L}^{-1} \text{ val}^{-1}$$

Norint įvertinti PANI nanodalelių dydį buvo atlikti suspenduotų acetatiniame buferyje PANI nanodalelių tyrimai DŠS metodu (pav. 3).



3 pav. PANI nanodalelių dydžio pasiskirstymas po skirtingo polimerizacijos laiko: 1 – 21 val., 2 – 45 val., 3 – 115 val. ir 4 – 163 val. (A) bei PANI nanodalelių dydžio priklausomybė nuo polimerizacijos laiko (B) (Polimerizacijos tirpalą sudaro 0,05 mol L⁻¹ acetatinis buferis pH 6,0, 0,05 mol L⁻¹ gliukozės, 0,5 mol L⁻¹ anilino ir 0,75 mg mL⁻¹ GOx.)

Vykdamas PANI nanodalelių sintezę po 21 val. nanodalelės buvo 15,8 nm dydžio, kai po 163 val. dalelės padidėjo iki 142 nm. Polimerizaciją atliekant 115 val. (optimalus laikas) susidariusių PANI nanodalelių dydis siekė 115 nm. PANI nanodalelės gautos optimaliomis sąlygomis buvo ištirtos ciklinės voltamperometrijos metodu. Voltamperogramoje buvo stebimos dvi oksidacijos smailės. Tai parodo, kad susintetintos PANI nanodalelės yra elektrochemiškai aktyvios.

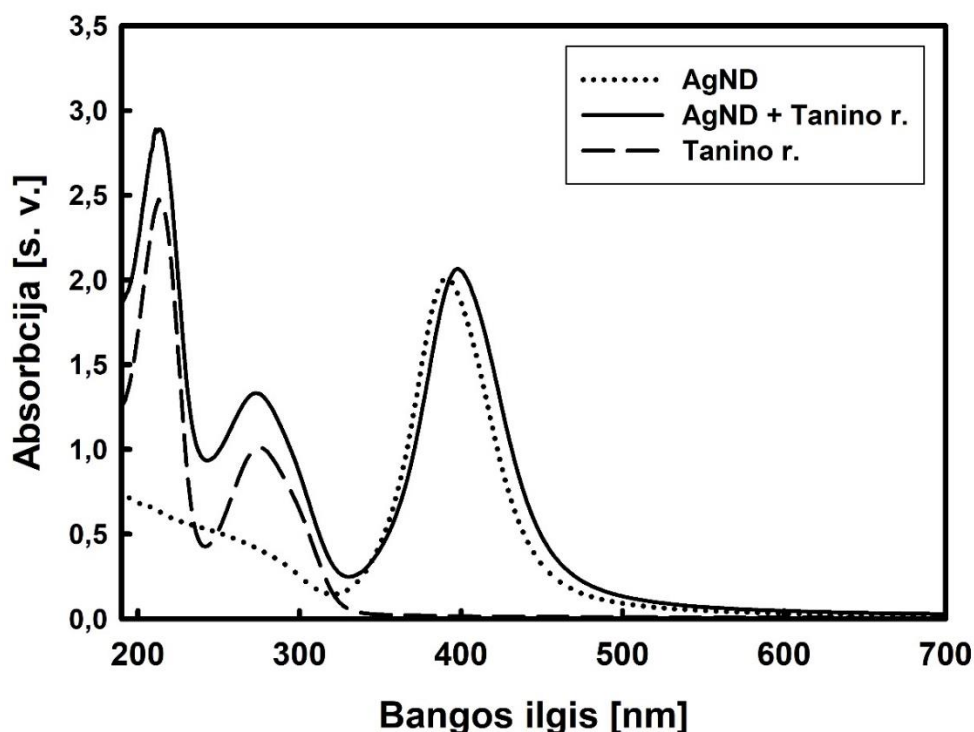
3.2. AgND nusodinimas iš tirpalo, kuriame yra tanino rūgšties

Ši dalis sudaryta iš dviejų skyrių. Pirmame skyriuje aprašomi tanino rūgšties tirpalo ir AgND koloidinio tirpalo fizikocheminių savybių nustatymas bei stabilumo tyrimas. Antras skyrius skirtas tanino rūgšties molekulių, neigiamai įkrautų AgND ir AgND iš

tirpalo su tanino rūgštimi nusodinimo ant žėručio modifikuoto poli(alilamino hidrochloridu) (PAH) paviršiaus kinetikos tyrimams.

3.2.1. Tanino rūgšties tirpalo ir AgND charakterizavimas

AgND sintezė buvo atliekama chemiškai redukuojant AgNO_3 , panaudojus NaBH_4 kaip reduktorių ir natrio citratą kaip stabilizuojantį agentą. Iš susintetintų AgND koloidinio tirpalo buvo pašalintas jonų perteklius ultrafiltracijos metodu bei nustatyta koloidinio tirpalo koncentracija.



4 pav. Tanino rūgšties tirpalo, AgND koloidinio tirpalo bei AgND koloidinio tirpalo sumaišyto su tanino rūgšties tirpalu spektrai. Nusodinimo sąlygos: $C_{\text{AgND}} = 15 \text{ mg L}^{-1}$, $C_{\text{tan}} = 25 \text{ mg L}^{-1}$, $I = 10^{-2} \text{ mol L}^{-1} \text{ NaCl}$, pH 4,5.

Tanino rūgšties molekulių tirpalo stabilumas buvo įvertintas nustatius jų hidrodinaminio skersmens ir dzeta potencialo priklausomybę nuo tirpalo pH ir joninės jėgos. Tanino rūgšties molekulių hidrodinaminis skersmuo buvo $1,63 \pm 0,15 \text{ nm}$ ir beveik nesikeitė pH intervale nuo 3,5 iki 5,0. Šių molekulių dzeta potencialas esant $10^{-2} \text{ mol L}^{-1} \text{ NaCl}$ koncentracijai pasikeitė nuo -9,2 iki -30 mV, kai tirpalo pH vertė padidėjo nuo 3,5 iki 5,5. Dėl to taip pat keitėsi vidutinis elementarių krūvių skaičius tenkantis vienai tanino rūgšties molekulei nuo -0,5 iki -1,4. Šie rezultatai parodo, kad norint išvengti

nekontroliuojamos tanino rūgšties molekulių hidrolizės, nusodinimo tyrimai turi būti atliekami iš tirpalų, kurių pH vertė yra mažesnė negu 5,0.

AgND buvo stabilios pH intervale nuo 4,0 iki 8,0, nes jų hidrodinaminis skersmuo beveik nesikeitė šiame intervale ir buvo lygus 16 ± 8 nm. AgND dzeta potencialas priklausė nuo tirpalo pH. AgND buvo neigimai įkrautos visame tirtame pH intervale. Didinat pH nuo 3,5 iki 9,0, dzeta potencialas pasikeitė nuo -49 iki -61 mV. Dalelių dydis buvo nustatytas iš transmisinės elektroninės mikroskopijos vaizdu ir buvo lygus 15 ± 3 nm. Susintetintos AgND buvo apvalios formos ir monodispersiškos.

Norint ištirti AgND koloidinio tirpalo su tanino rūgštimi stabilumą, buvo atlikti spektrofotometriniai tyrimai. Nustatyta, kad smailių vietos šiek tiek pasikeitė, kai į AgND koloidinį tirpalą buvo pridėta tanino rūgšties tirpalo (pav. 4). Tyrimai, kuriuose buvo maišomi AgND ir tanino rūgšties tirpalai skirtingais santykiais ir registruojami jų spektrai po skirtingų laiko tarpų parodė, kad tanino rūgšties buvimas AgND koloidiniam tirpale neskatina AgND agregavimo. Ištirti tirpalai buvo stabilūs daugiau ne 24 val. po jų paruošimo, kai tirpalo pH buvo intervale nuo 3,5 iki 5,0.

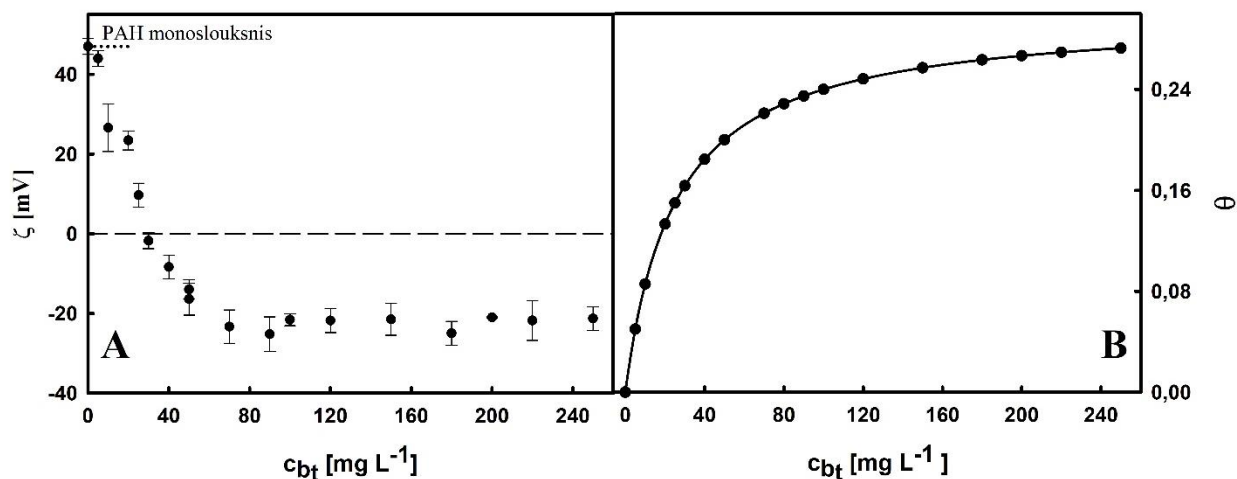
3.2.2. Tanino rūgšties ir AgND adsorbcija ant PAH monosluoksnio

Tanino rūgšties adsorbcijos tyrimai buvo atliekami panaudojus nuolatinės srovės potencialo metodą. Tyrimo pradžioje žėručio lakšto dzeta potencialas buvo nustatomas ir PAH monosluoksnis suformuojamas lakšto paviršiuje. Po to tanino rūgšties molekulės buvo adsorbuojamos modifikuoto žėručio paviršiuje iš tirpalų, savo sudėtyje turinčių skirtingas taninio rūgšties koncentracijas. Buvo pastebėta, kad paruoštų PAH/tanino rūgšties bisluoksnų dzeta potencialas priklausė nuo pradinės taninio rūgšties koncentracijos (pav. 5A).

Bisluoksnio dzeta potencialas mažėdavo, kai didėdavo paviršiaus plotas padengtas tanino rūgšties monosluoksniu. Dzeta potencialas tapo neigiamu, kai tanino rūgšties koncentracija buvo 30 mg L^{-1} . Didinant tanino rūgšties koncentraciją, dzeta potencialo vertė pasiekė -23 mV ir toliau nesikeitė. Tokį pat dzeta potencialą turėjo tanino rūgšties molekulės tirpale, kurio pH buvo 4,5.

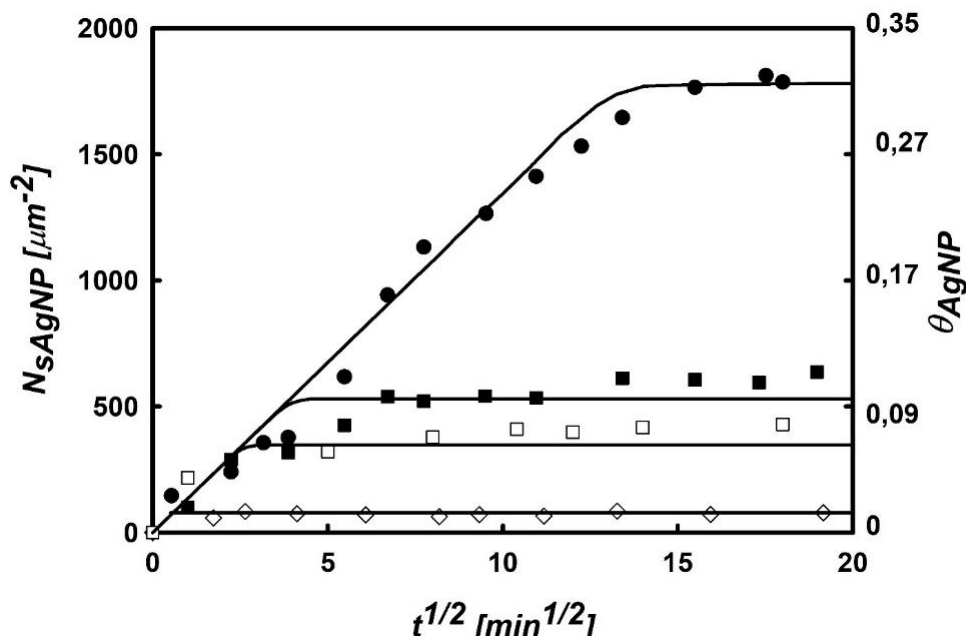
Norint interpretuoti AgND ir tanino rūgšties mišinio nusodinimo ant PAH modifikuoto žėručio kinetiką, dzeta potencialo priklausomybė nuo tanino rūgšties koncentracijos buvo konvertuota į paviršiaus padengimo priklausomybę nuo tanino rūgšties koncentracijos. Įvertinus, kad mūsų atveju Gouy - Chapmano adsorbcijos modelis turi gerai aprašyti rezultatus, buvo apskaičiuotas tanino rūgšties monosluoksniu padengimas, esant skirtingoms pradinėms tanino rūgšties koncentracijoms (pav. 5B).

Dzeta potencialas tapo neigiamas, kai paviršiaus padengimas buvo 0,18. Tuo metu didžiaisiais padengimas buvo pasiektas, kai buvo naudojama 250 mg L^{-1} tanino rūgšties koncentracija. Buvo pastebėta, kad Langmiuro adsorbcijos izotermos lygtis puikiai aprašo gautus eksperimentinius duomenis. Be to buvo teoriškai prognozuojama, kiek laiko užtruks monosluoksniu formavimas. Kai tanino rūgšties koncentracija 10 mg L^{-1} , teoriškai monosluoksniu turėjo susiformuoti per 240 ms, o kai tanino rūgšties koncentracija 250 mg L^{-1} - monosluoksniu turėjo susiformuoti per 4 ms. Tai reiškia, kad tanino rūgšties monosluoksniai susiformuodavo žymiai greičiau, negu buvo laukta eksperimento metu. Dėl tokio greito tanino rūgšties sluoksniu susidarymo, tanino rūgšties buvimas AgND koloidiniame tirpale turėjo paveikti AgND nusodinimą.



5 pav. PAH/tanino rūgšties bisluoksniu dzeta potencialo priklausomybė nuo pradinės tanino rūgšties koncentracijos (A) Tanino rūgšties adsorbcijos ant PAH monosluoksniu izoterma. Ištinė linija nurodo gautus teorinius duomenis, apskaičiuotus naudojant Langmiuro adsorbcijos izotermos modelį. Nusodinimo sąlygos: $I = 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ NaCl, pH 4,0 - 5,0, $T = 298 \text{ K}$, nusodinimo laikas - 15 min.

Toliau buvo tiriamas AgND nusodinimas iš tirpalų, savo sudėtyje turinčių skirtingas tanino rūgšties koncentracijas. Po nusodinimo dalelių kiekis paviršiuje buvo apskaičiuotas iš atominių jėgų mikroskopijos ir skenuojančios elektroninės mikroskopijos nuotraukų (pav. 6).



6 pav. AgND nusodinimo ant PAH modifikuoto žėručio paviršiaus kinetika iš tirpalų, savo sudėtyje turinčių skirtingas tanino rūgšties koncentracijas: (●) 0 mg L⁻¹, (■) 5 mg L⁻¹, (□) 10 mg L⁻¹ ir (◇) 250 mg L⁻¹. Ištinės linijos nurodo apskaičiuotus teorinius rezultatus, naudojant atsitiktinės nuoseklios adsorbcijos modelį. Nusodinimo sąlygos: $C_{AgND} = 50 \text{ mg L}^{-1}$, $I = 10^{-2} \text{ mol L}^{-1} \text{ NaCl}$, pH 4,0 – 5,0 ir $T = 298 \text{ K}$.

Atlikus AgND nusodinimą ant PAH modifikuoto žėručio iš tirpalo, kuriame nėra tanino rūgšties, nustatyta, kad maksimalus paviršiaus padengimas buvo pasiektas per 200 min ir lygus 0,28 (1 lentelė). Tačiau, esant 5 mg L⁻¹ tanino rūgšties koncentracijai, AgND maksimalus padengimas sumažėjo iki 0,09, o esant 10 mg L⁻¹ tanino rūgšties koncentracijai, AgND adsorbcija paviršiuje buvo nereikšminga. Eksperimentiniai duomenys puikiai koreliavo su teoriniais rezultatais, kurie buvo gauti skaičiavimams naudojant atsitiktinės nuoseklios adsorbcijos modelį. Ištyrus tanino rūgšties įtaką AgND monosluoksnių nusodinimui buvo pastebėta, kad mažų molekulių buvimas AgND koloidiniame tirpale gali reikšmingai paveikti monosluoksnių susidarymo ant PAH modifikuoto žėručio efektyvumą.

1 lentelė. AgND/tanino rūgšties nusodinimo kinetikos rezultatai.

$C_{tan} : C_{AgND}$ [mg L ⁻¹ : mg L ⁻¹]	N_s [μm ⁻²]	θ_{AgNPs}
0:50	1598	0,282
5:50	548	0,096
10:50	356	0,063
25:50	187	0,033
50:50	190	0,034
100:50	149	0,026
250:50	140	0,025
500:50	135	0,024

3.3. Biokatalitinio AuND didinimo tyrimai

Ši dalis sudaryta iš trijų skyrių. Pirmame skyriuje aprašytas optimalių AuND biokatalitinio didinimo sąlygų parinkimas ir padidintų AuND plazmonų absorbcijos ir hidrodinaminio skersmens priklausomybė nuo gliukozės koncentracijos tirpale bei biokatalitinio didinimo trukmės. Antrame ir trečiame skyriuose aprašytas AuND imobilizavimas ant lusto padengto Au sluoksniu, panaudojant savitvarkį monosluoksnį (SAM) bei imobilizuotų AuND biokatalitinis didinimas.

3.3.1. AuND biokatalitinis didinimas tirpaluose

13 nm AuND buvo susintetintos vandeninėje terpėje redukuojant AuCl₄⁻ jonus, tirpale esant natrio citratui ir tanino rūgščiai. AuND didinimui buvo pasirinktas fermentas – gliukozės oksidazė. GOx katalizuojamos reakcijos metu susidaręs vandenilio peroksidas redukuoja AuCl₄⁻ jonus ant tirpale esančių AuND ir taip vyksta biokatalitinis AuND didinimas.

2 lentelė. AuND tirpalų absorbcijos smailių vertės, sumaišius 13 nm AuND tirpalą skirtingais santykiais su AuND didinimui skirtais tirpalais.

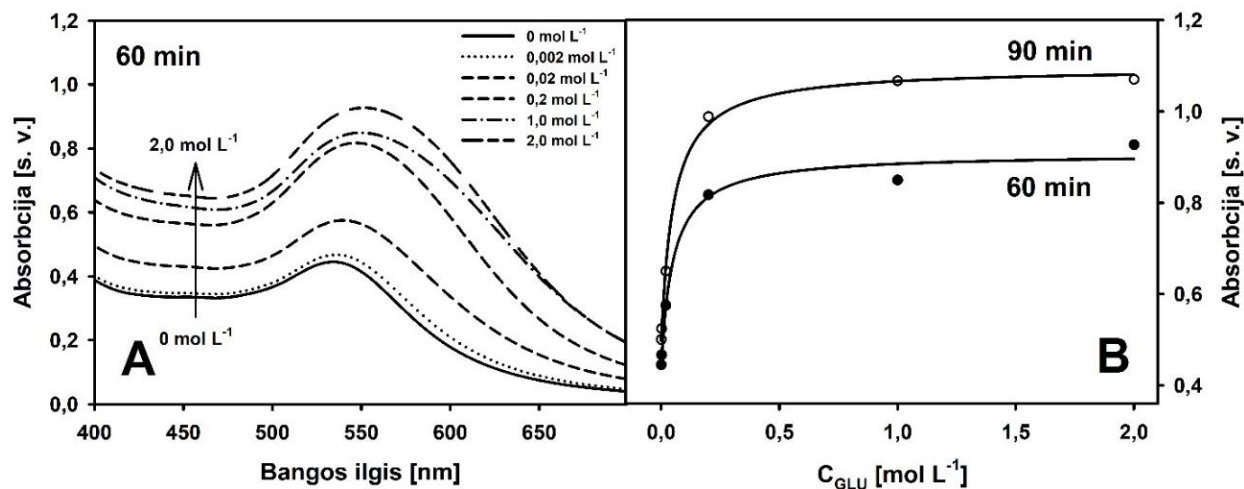
	0 min, $A_{533\text{ nm}}$	60 min, A_{max}	90 min, A_{max}	$\Delta A_{60\text{ min}}$	$\Delta A_{90\text{ min}}$
1:1	0,625	1,190	1,336	0,565	0,711
2:3	0,508	1,127	1,299	0,619	0,791
1:2	0,437	1,099	1,304	0,662	0,867
1:3	0,390	1,021	1,179	0,631	0,789
1:6	0,186	0,591	0,839	0,405	0,653
1:14	0,125	0,527	0,877	0,402	0,752

Pagamintas 13 nm AuND koloidinis tirpalas buvo sumaišomas skirtingais santykiais su tirpalais skirtais AuND didinimui, norint rasti optimalų AuND ir kitų reagentų santykį. AuND didinimui skirti tirpalai buvo pagaminami ištirpinus skirtingus GOx, gliukozės bei vandenilio tetrachloraurato kiekius $0,01\text{ mol L}^{-1}$ fosfatiniame buferyje pH 6,0. Galutinės GOx, HAuCl₄ ir gliukozės koncentracijos, sumaišius tirpalus, atitinkamai buvo $25\text{ }\mu\text{g mL}^{-1}$, $0,976\text{ mmol L}^{-1}$ ir $4 \times 10^{-2}\text{ mol L}^{-1}$. Eksperimentiškai nustatytos optimalios komponentų, esančių AuND didinimui skirtame tirpale, koncentracijos. Tyrimų rezultatai buvo vertinami spektrofotometriškai. Gauti rezultatai pateikti 2 lentelėje.

Didžiausi AuND tirpalų absorbcijos pokyčiai buvo registruojami, kai AuND ir jų didinimui skirti tirpalai buvo sumaišyti santykiu 1:2. Tik sumaišius tirpalus, AuND absorbcijos smailės vieta pasislinko nuo 520 iki 533 nm. Po 60 min smailė pasislinko iki 554 nm. Smailės pasistūmimas į ilgesnių bangos ilgių pusę bei absorbcijos padidėjimas signalizuoja apie sėkmingą AuND padidinimą. Toks tirpalų santykis buvo naudojimas kaip optimalus tolimesniuose tyrimuose.

Toliau buvo ištirta AuND spektrų priklausomybė nuo gliukozės koncentracijos tirpale. Tyrimams buvo naudojama gliukozės koncentracija nuo 0 iki $2,0\text{ mol L}^{-1}$. Rezultatai yra pateikti 7 paveiksle. Tirpale esant gliukozės koncentracijoms mažesnėms

nei $0,02 \text{ mol L}^{-1}$, buvo stebima absorbcijos smailės vertės tiesinė priklausomybė nuo gliukozės koncentracijos. Kai gliukozės koncentracija buvo didesnė negu $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, absorbcijos smailės intensyvumo pokytis buvo nereikšmingas. Todėl tolimesniuose tyrimuose buvo naudojamos $4 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$, $4 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ ir $4 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ gliukozės koncentracijos bei biokatalitinis didinimas buvo atliekamas 60 ir 90 min.

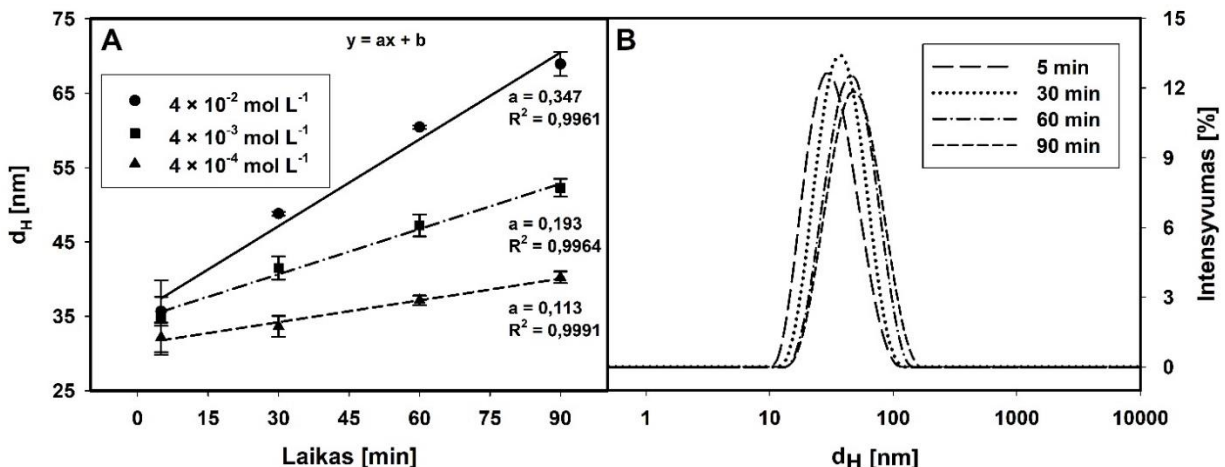


7 pav. AuND tirpalų, esant skirtingiems gliukozės koncentracijoms, spektrų po 60 min biokatalitinio didinimo (A) bei plazmonų absorbcijos smailių (B) priklausomybės nuo gliukozės koncentracijos tirpale.

Norint įvertinti kaip AuND hidrodinaminis skersmuo priklauso nuo biokatalitinio didinimo trukmės, buvo atlikti tirpalų tyrimai DŠS metodu (pav. 8). Buvo nustatyta, kad dalelių dydis priklauso nuo gliukozės koncentracijos tirpale. Dydis tiesiškai priklausė nuo biokatalitinio didinimo trukmės pasirinktam gliukozės koncentracijų intervale.

Hidrodinaminis AuND skersmuo buvo nuo 29 iki 34 nm, kai didinimas buvo atliekamas tik 5 min., esant $4 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ gliukozės koncentracijai. Po 60 min biokatalitinio didinimo AuND hidrodinaminis skersmuo padidėjo iki 37,2 nm, 47,2 nm ir 60,4 nm, kai gliukozės koncentracija tirpale atitinkamai buvo $4 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$, $4 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ ir $4 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$. Po 90 min biokatalitinio didinimo, AuND hidrodinaminis skersmuo jau buvo 40,3 nm, 52,3 nm ir 68,9 nm, tirpale esant toms pačioms gliukozės koncentracijoms. Iš tiesių krypties koeficientų buvo nustatyta, kad

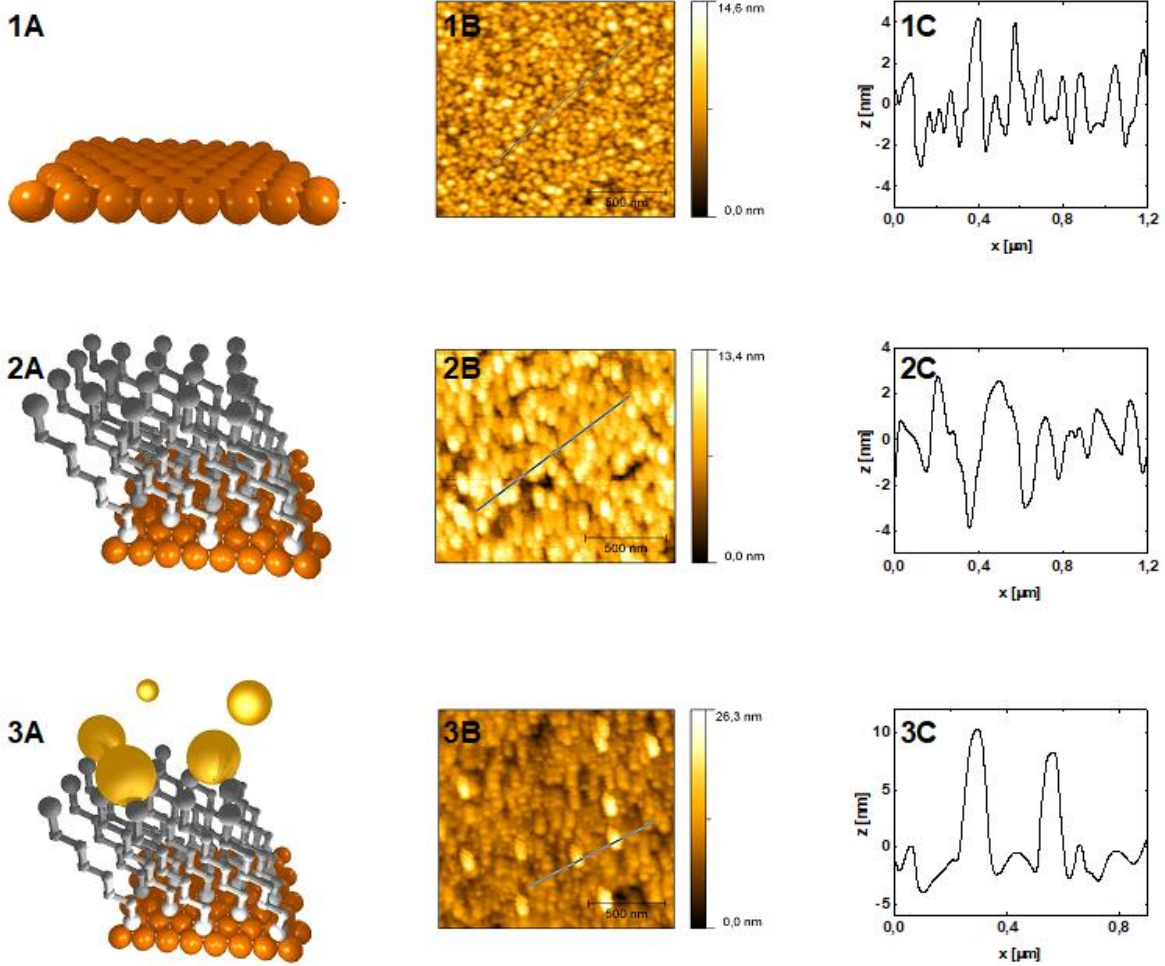
greičiausiai AuND dydis kisdavo naudojant didžiausią gliukozės koncentraciją, t.y. 40 mmol L⁻¹.



8 pav. (A) AuND hidrodinaminio skersmens priklausomybė nuo biokatalitino didinimo trukmės, tirpale esant skirtingoms gliukozės koncentracijoms. (B) AuND hidrodinaminio skersmens pasiskirstymas po skirtingą laiko tarpą vykdyto biokatalitino didinimo, kai gliukozės koncentracija tirpale 4×10^{-3} mol L⁻¹.

3.3.2. Lusto modifikavimas savitvarkiu monosluoksniu

Toliau AuND buvo imobilizuojamos savitvarkio monosluoksniu, suformuoto ant aukso sluoksniu padengto lusto paviršiaus. Prieš ir po kiekvieno modifikavimo žingsnio struktūros susidariusios lusto paviršiuje buvo tiriamos AJM metodu. Tam, kad susiformuotų SAM, lustas buvo įmerktas 24 valandoms į 1,6-dimerkaptohexano (1,6-DMH) tirpalą. Struktūrų padidėjimas lusto paviršiuje (pav. 9 2A-C) bei nežymus šurkštumo sumažėjimas (pav. 9 1A-C) leido teigti, kad SAM buvo sėkmingai suformuotas. SAM susidarydavo dėl 1,6-DMH tiolinių funkcinių grupių prisijungimo prie Au sluoksniu paviršiaus chemisorbcijos būdu.

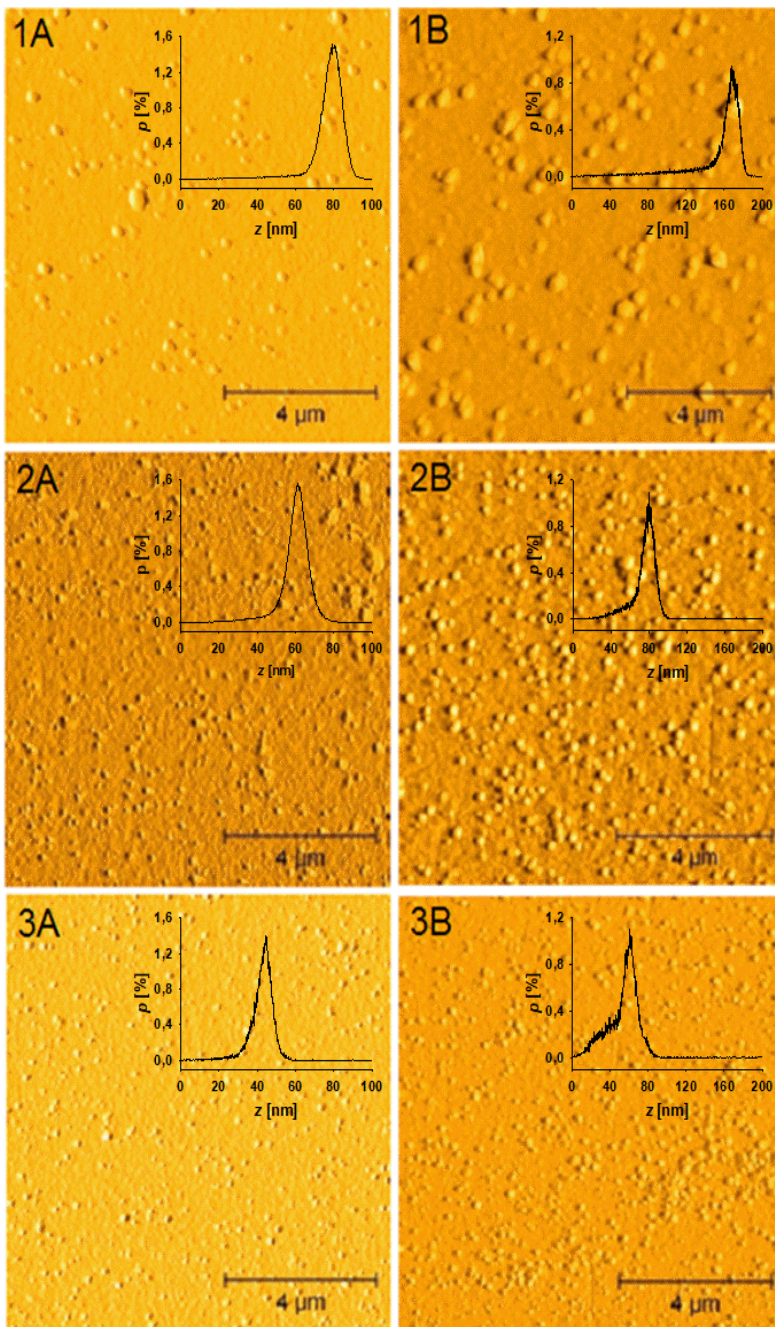


9 pav. Pagrindiniai AuND imobilizavimo per savitvarkį monosluoksnį (SAM) lusto, padengto aukso sluoksniu, paviršiuje etapai (A), modifikuoto paviršiaus 2D AJM vaizdai (B) ir paviršiaus skerspjūvis pažymėtas 2D AJM vaizduose (C). 1 A-C – plonas aukso sluoksnis lusto paviršiuje, 2 A-C – 1,6-DMH modifikuotas lusto paviršius; 3 A-C – 1,6-DMH modifikuotas lusto paviršius po AuND imobilizavimo.

Po 20 min SAM modifikuoto lusto inkubavimo 13 nm AuND tirpale, lusto paviršiuje buvo registruojamos 10-14 nm dydžio reguliariai išsidėsčiusios struktūros. Dėl stiprios sąveikos tarp sieros ir aukso atomų, AuND buvo sėkmingai imobilizuotos. Tokia AuND imobilizavimo metodika buvo naudojama tolimesniuose tyrimuose.

3.3.3. Biokatalitinis imobilizuotų AuND didinimas

Imobilizuotos AuND toliau buvo biokatalitiškai didinamos, naudojant tris skirtingas gliukozės koncentracijas: 4×10^{-4} mol L⁻¹, 4×10^{-3} mol L⁻¹ ir 4×10^{-2} mol L⁻¹ (pav. 10).



10 pav. Biokatalitiškai padidintų AuND imobilizuotų per 1,6-DMH savitvarkį monosluoksnį lusto padengto Au sluoksniu paviršiuje AJM vaizdai ir aukščio pasiskirstymo grafikai. Biokatalitinis didinimas buvo atliekamas 60 (A) arba 90 (B) min.

Buvo pastebėta, kad dalelių aukštis priklausė nuo pradinės gliukozės koncentracijos ir biokatalitinio didinimo trukmės. Vykdamas biokatalitinį AuND didinimą 60 min, tirpale esant 4×10^{-2} , 4×10^{-3} ir 4×10^{-4} mol L⁻¹ gliukozės koncentracijoms, lusto paviršiuje formavosi atitinkamai 70–90 nm (pav. 10 1A), 50–70 nm (pav. 10 2A) ir 35–55 nm (pav. 10 3A) struktūros. Po 90 min AuND biokatalitinio didinimo, naudojant tas pačias gliukozės koncentracijas, buvo registruojamas struktūrų aukščio padidėjimas iki 150–180 nm (pav. 10 2A), 60–90 nm (pav. 10 2B) ir iki 50–70 nm (pav. 10 3B).

Norint gauti vienodo dydžio AuND, kai naudojama gliukozės koncentracija yra intervale nuo 4×10^{-4} iki 4×10^{-2} mol L⁻¹, reikia keisti biokatalitinio didinimo trukmę. Biokatalitiškai padidintų tirpaluose ir imobilizuotų lusto paviršiuje AuND dydžiai skyrėsi. Tai galima būtų paaiškinti skirtingomis pradinėmis AuND koncentracijomis biokatalitiškai didinant daleles tirpale ir imobilizuotas ant paviršiaus.

Išvados

1. Optimalios PANI nanodalelių susidarymo sąlygos yra $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ anilino ir $0,75 \text{ mg mL}^{-1}$ gliukozės oksidazės, fermentinę sintezę vykdant 115 val. PANI nanodalelių susidarymo greitis reakcijos pradžioje yra lygus $0,0038 \text{ mol L}^{-1}\text{val}^{-1}$, o susidariusių PANI nanodalelių dydis siekia 115 nm, atliekant polimerizaciją optimaliomis sąlygomis.
2. Tanino rūgšties tirpalas ir sidabro nanodalelių koloidinis tirpalas yra stabilūs pH intervale nuo 3,5 iki 5,0.
3. Sidabro nanodalelių monosluoksniu, nusodinto iš koloidinio tirpalo nesant tanino rūgšties, maksimalus padengimas ant PAH modifikuoto žėručio paviršiaus buvo 0,28, o esant $3 \times 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ tanino rūgšties AgND padengimas reikšmingai sumažėja iki 0,03.
4. Padidintų AuND plazmonų absorbcija tiesiškai priklauso nuo gliukozės koncentracijos intervale nuo 2×10^{-3} iki $0,02 \text{ mol L}^{-1}$.
5. AuND hidrodinaminis skersmuo po 60 min biokatalitinio didinimo buvo 37,2 nm, 47,2 nm ir 60,4 nm, o po 90 min didinimo – 40,3 nm, 52,3 nm ir 68,9 nm, kai gliukozės koncentracija tirpale buvo atitinkamai 4×10^{-4} , 4×10^{-3} ir $4 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$. Be to, AuND biokatalitinio didinimo greitis išauga, didinant pradinę gliukozės koncentraciją tirpale.
6. AuND aukštis po 60 min biokatalitinio didinimo buvo 35 – 55 nm, 50 – 70 nm ir 70 – 90 nm, o po 90 min. didinimo – 50 – 70 nm, 60 – 90 nm ir 150 – 180 nm, kai gliukozės koncentracija tirpale buvo atitinkamai 4×10^{-4} , 4×10^{-3} ir $4 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$.

Publikacijų, apibendrintų daktaro disertacijoje, sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose žurnaluose:

1. M. Ocwieja, **A. Popov**, Z. Adamczyk, M. Morga, A. Ramanaviciene, A. Ramanavicius, Deposition of silver nanoparticles from suspensions containing tannic acid, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2015, (477) 70–76.
2. A. Ramanaviciene, J. Voronovic, **A. Popov**, R. Drevinskas, A. Kausaite-Minkstimiene, A. Ramanavicius, Investigation of biocatalytic enlargement of gold nanoparticles using dynamic light scattering and atomic force microscopy, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2016, (510) 183–189.
3. N. German, **A. Popov**, A. Ramanaviciene, A. Ramanavicius, Evaluation of enzymatic formation of polyaniline nanoparticles, *Polymer* 2017, (115) 211-216.

Pranešimų mokslinėse konferencijose tezės:

1. **A. Popov**, M. Ocwieja, Z. Adamczyk, A. Ramanaviciene, A. Ramanavicius, Physicochemical characteristics of charge stabilized silver sols, *Ecobalt 2014*, Riga, Latvia, 8-10 October 2014.
2. A. Ramanaviciene, J. Voronovic, **A. Popov**, R. Drevinskas, A. Ramanavicius, Investigation of biocatalytic growth of gold nanoparticles using atomic force microscopy and dynamic light scattering, 29th Conference of the European Colloids and Interface Society „ECIS 2015”, 6-11 September 2014, Bordeaux, France.
3. **A. Popov**, J. Voronovic, A. Ramanaviciene, The investigation of biocatalytic growth of gold nanoparticles, *EuroNanoForum 2015*, Riga, Latvia, 10-12 June 2015.
4. **A. Popov**, M. Oćwieja, Z. Adamczyk, M. Morga, A. Ramanavicius, A. Ramanaviciene, Deposition of silver nanoparticles from suspensions containing tannic acid, 9th Nanoconference Advance in Bioelectrochemistry and Nanomaterials, Vilnius, Lithuania, 20-22 October, 2016.

Publikacijų, neištrauktų į daktaro disertaciją, sąrašas:

1. L. Mikoliunaite, R. Kubiliute, **A. Popov**, J. Voronovic, S. Sakirzanovas, A. Ramanaviciene, A. Ramanavicius, Development of gold nanoparticle-polypyrrole nanocomposites. *Chemija*, 2014, 25(2) 63-69.
2. A. Garbaras, L. Mikoliunaite, **A. Popov**, A. Ramanaviciene, V. Remeikis, A. Ramanavicius. Isotope method for the determination of stoichiometry between compounds forming polypyrrole and glucose oxidase composite. *Physical Chemistry Chemical Physics* 2015, 17(3) 2252-8

Summary

Investigation of colloid solutions consisting of polymeric and metallic nanoparticles

The aim of this study was to investigate chemically and enzymatically synthesized or biocatalytically enlarged polymeric and metallic nanoparticles colloidal solutions by different methods for further biomedical and bioanalytical application.

Firstly, enzymatic synthesis of polyaniline (PANI) nanoparticles was investigated. The polymerization of aniline (ANI) was performed using hydrogen peroxide, which was formed during glucose oxidase catalyzed enzymatic reaction. The absorbance of washed and resuspended in buffer PANI nanoparticles solution was evaluated by UV-Vis spectroscopy. The optimal conditions of PANI nanoparticles enzymatic formation were determined. The size of synthesized under optimal conditions PANI nanoparticles was 115 nm and initial rate of polymerization reaction was equal to $0.0038 \text{ mol L}^{-1}\text{h}^{-1}$. Electroactive nature of PANI obtained by GOx catalyzed polymerization was confirmed.

In the second part of this work, kinetics of silver nanoparticles (AgNPs) deposition in the presence of controlled amounts of tannic acid and in the absence of this reagent, whose coverage can be precisely controlled by the streaming potential measurements, was systematically studied. Physicochemical properties of tannic acid solution and AgNPs colloidal solution were defined. It was determined that solutions of tannic acid and colloidal solution of AgNPs are stable at pH range from 3.5 to 5.0. AgNPs and tannic acid molecules adsorption was performed under diffusion-controlled conditions on the mica sheets covered with a poly(allylamine hydrochloride) monolayer. Kinetics results showed that the presence of tannic acid at low bulk concentration in the range of 10^{-6} to $10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ significantly reduces the attachment efficiency of silver particles to the polymer modified surfaces. Experimental results also confirmed that by quantitative determination of the kinetics of AgNPs deposition

in this model system, one can precisely estimate the suspension purity and its ability to form dense monolayers on solid substrates.

In the next part of study, biocatalytic enlargement of gold nanoparticles (AuNPs) seeds in colloidal solution and immobilized on the surface was investigated. Reduction of AuCl_4^- on the surface of seeds by the H_2O_2 formed during glucose oxidase catalyzed reaction was used for enlargement. Biocatalytic enlargement of AuNPs in colloidal solution was monitored by UV-Vis spectroscopy. Optimal ratio of AuNPs seeds and components required for the growing of nanoparticles was defined. It was determined that plasmon absorbance of enlarged AuNPs linearly depends on glucose concentration in the range from 2×10^{-3} to 0.02 mol L^{-1} . Hydrodynamic diameter of AuNPs was evaluated by dynamic light scattering method. It was determined that size of enlarged AuNPs depends on glucose concentration and duration of enlargement. Rate of AuNPs seeds enlargement increases increasing initial concentration of glucose in the solution. AuNPs were also immobilized on modified by 1,6-hexanedithiol surface of sensor disc with a planar Au layer. Success of immobilization and biocatalytic enlargement was monitored by atomic force microscopy. It was determined that height of enlarged AuNPs depends on initial glucose concentration and duration of enlargement.

Gyvenimo aprašymas

Vardas, pavardė Anton Popov
El. paštas anton.popov@chgf.vu.lt
Gimimo data 1987 08 27

Išsilavinimas

2013 – 2017 Vilniaus universitetas – Chemijos ir geomokslų fakultetas, Analizinės ir aplinkos chemijos katedra, doktorantūros studijos.

2011 – 2013 Vilniaus universitetas – Chemijos fakultetas, Analizinės ir aplinkos chemijos katedra, magistro laipsnis

2006 – 2011 Vilniaus Gedimino technikos universitetas – Fundamentinių mokslų fakultetas, Chemijos ir bioinžinerijos katedra, bakalauro laipsnis.

Darbinė veikla

2017 06 01 – dabar Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakultetas, jaunesnysis mokslo darbuotojas.

2017 10 02 – dabar Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Inovatyvios medicinos centras, jaunesnysis mokslo darbuotojas.

Stażuotės užsienio mokslo ir studijų institucijose

1. Intensyvi vasaros mokykla „EUCHEME 2013“, 2013 07 30 – 08 12, Kamerino universitetas (Italija);

2. 2014 m. 3 mėnesių stažuotė Lenkijos mokslo akademijos J. Haber katalizės ir paviršių fiziko-chemijos institute, Krokuvoje.

3. 2016 m. 3 mėnesių stažuotė Lenkijos mokslo akademijos J. Haber katalizės ir paviršių fiziko-chemijos institute, Krokuvoje.