

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ – ХЕМИЈСКИ ФАКУЛТЕТ
НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

Молим Наставно-научно веће Хемијског факултета, Универзитета у Београду, да ми одобри пријаву теме докторске дисертације под називом:

**„Двослојни злато-поли(*N*-изопропилакриламид)/поли(винил алкохол)
нанокомпозити као фотоактуатори за конверзију оптичке у механичку енергију”**

Образложење теме:

1. Научна област: Хемија

Ужа научна област: Примењена хемија
Хемија материјала

2. Предмет научног истраживања

Предмет научног истраживања ове докторске дисертације обухвата развој методологије за синтезу нових двослојних злато-поли(*N*-изопропилакриламид)/поли(винилалкохол) (*Аи-РNiРАAm/PVA*) хидрогел нанокомпозита. Због специфичних својстава, овакву врсту умрежених полимерних система погодно је користити као фотоактуаторе тј. материјале који конвертују оптичку у механичку енергију. Истраживање ће обухватити оптимизацију услова синтезе двослојних хидрогел нанокомпозита жељених карактеристика, као и детаљно испитивање њихових оптичких, структурних, морфолошких, физичко-хемијских, механичких и електричних својстава. Такође, биће испитан и процес реверзибилног механичког одговора система, а који се јавља као последица фото-термо-механичког ефекта под дејством различитих извора светлости.

3. Основне хипотезе

Технолошке потребе за новим материјалима последњих година довеле су до значајног напретка у развоју паметних материјала, нарочито у области нанокомпозитних система на бази умрежених полимерних матрица (хидрогелова) и наночестица племенитих метала (сребра и злата). Захваљујући стабилној тродимензионалној порозној структури, способности упијања и задржавања велике количине околног флуида уз непромењену структуру, сличности са живим ткивима и одличној биокомпатибилности, хидрогелови су се издвојили као значајна класа биоматеријала. Као посебно интересантна издвојила се

област “паметних материјала”, тј. хидрогелова који имају способност да на дејство неког спољашњег стимуланса (топлота, pH , јонска јачина, светлост, магнетизам...) одреагују променом неког свог физичког или хемијског својства. Овој врсти материјала припадају и актуатори који могу да обезбеде могућност активирања и пригушења као одговор на спољашњи стимуланс. Због способности динамичке интеракције са окружењем, паметни актуатори привлаче све већу пажњу у различитим пољима примене, као што су вештачки мишићи, паметни текстил, паметни сензори, мекани роботи, системи за контролисану доставу активних супстанци. Фотоактуатори су паметни системи који под дејством одговарајуће светлости испољавају реверзибилну механичку деформацију (савијање) као последицу фото-термо-механичког ефекта (конверзије енергије), и као такви могу бити коришћени као системи са бежичном контролом.

На основу теоријских сазнања и претходних истраживања, у оквиру ове докторске дисертације биће извршена синтеза и карактеризација новог двослојног материјала на бази наночестица злата, термосензитивног поли(N -изопропилакриламида) ($PNiPAAm$) као активног слоја и поли(винил алкохола) (PVA) као пасивног слоја. У циљу добијања фотоактуатора, наночестице злата различитог облика (наносфере - $AuNPs$ и наноштапићи - $AuNRs$), величина и концентрација биће уграђене у активни $PNiPAAm$ слој. Ове функционалне наночестице поседују јединствени фототермални способност да апсорбовану светлосну енергију претварају у топлотну, те тако изазову локално загревање и скупљање активног слоја, што омогућава бежичну контролу уређаја и програмирање покрета савијања и увијања. $Au-PNiPAAm/PVA$ хидрогел нанокомпозити поседују термосензитивност као специфично својство поли(N -изопропилакриламида), која може бити контролисана уградњом наночестица злата, али и комбинацијом са другом врстом полимера. С друге стране, фототермални ефекат који производе уграђене наночестице злата даје нанокомпозитима осетљивост на светлост. Синергистичко дејство ова два феномена омогућава да ови паметни материјали произведу реверзибилну механичку деформацију, под дејством спољашњег извора светлости.

4. Циљ истраживања и очекивани резултати

Циљ истраживања ове докторске дисертације јесте добијање стабилних двослојних $Au-PNiPAAm/PVA$ хидрогел нанокомпозита који ће, као најважнији очекивани резултат, испољити реверзибилну механичку деформацију, узроковану фототермалним ефектом. Овакве врсте полимерних нанокомпозита имају изузетно широк апликативни потенцијал, при чему су примене у мекој роботизици, инжењерству ткива (вештачки мишићи) и биомедицини (паметни системи за контролисано ослобађање активних супстанци) само неке од најиспитиванијих у данашње време.

Сходно циљу истраживања, целокупне активности током израде ове докторске дисертације биће подељене у неколико целина:

- оптимизација синтезе двослојних матрица тј. *PNiPAAm/PVA* хидрогелова у смислу одређивања оптималних концентрација полимера, дебљине слојева (активног *PNiPAAm* и пасивног *PVA* слоја), као и изналагања одговарајуће методологије синтезе сваког од слојева, али и њиховог међусобног повезивања;
- синтеза двослојних *Au-PNiPAAm/PVA* нанокompозита путем инкорпорације наночестица злата различитих облика (наносфере и наноштапићи), величина и концентрација у активни слој;
- испитивање физичко-хемијских, оптичких, структурних, морфолошких, механичких и електричних својстава, као и испитивање реверзибилне механичке деформације (фото-термо-механички ефекат) под дејством различитих извора светлости (лампа и ласер).

По завршетку експерименталног дела, очекује се да буде успостављена методологија синтезе *Au-PNiPAAm/PVA* хидрогел нанокompозита, са хомогеном дистрибуцијом наночестица злата унутар активног *PNiPAAm* слоја, као и са стабилном структуром и морфологијом. Биће показано да сама инкорпорација, али и различити облици, величине и концентрације наночестица злата доводе до промена вредности капацитета бубрења и температура фазног прелаза, као и дифузионих својстава система. Поред тога, очекивано је да ће нанокompозити показати побољшана механичка и електрична својства у поређењу са чистим двослојним умреженим матрицама. На крају, очекује се да ће могућност бежичне контроле система бити потврђена, односно да ће фото-термо-механички ефекат под дејством светлости бити евидентан и демонстриран као реверзибилна механичка деформација система, у овом случају савијање.

5. Методе истраживања

У току израде докторске дисертације главни циљ биће синтеза стабилних двослојних *Au-PNiPAAm/PVA* хидрогел нанокompозита од којих се очекује да покажу фото-термо-механички ефекат. Стога, на самом почетку истраживања биће извршена оптимизација методе синтезе у смислу избора одговарајуће методе за формирање пасивног и активног умреженог слоја, њихово међусобно повезивање, као и избор методе синтезе наночестица злата жељених својстава (облика и величине). Сходно чињеници да су испитивани системи сложене структуре (међусобно спојена два различита полимерна слоја, од којих је један термосензитиван и садржи оптички активне наночестице злата) за очекивати је да током испитивања њихових својстава буде употребљен већи број различитих техника карактеризације. За анализу оптичких, структурних и морфолошких својстава користиће се методе спектроскопије у ултраљубичастој и видљивој области спектра (*UV-Vis*), спектроскопије у инфрацрвеној области спектра (*FTIR*), фотоелектронске спектроскопије рендгенских зрака (*XPS*), дифракције рендгенских зрака (*XRD*), скенирајуће и трансмисионе електронске микроскопије (*SEM* и *TEM*). Такође, биће извршена и термо-механичка анализа (*TMA*) система, али и одређивање њихових електричних својстава

методом волтаметрије. Поред тога, биће урађена физичко-хемијска карактеризација која укључује одређивање капацитета бубрења и температуре фазног прелаза испитиваних система, али обухвата и праћење процеса бубрења и отпуштања течности, као и анализу кинетичких параметара самих процеса. За праћење фото-термо-механичког ефекта користиће се различити светлосни извори побуде (лампа и ласер).

6. Литература

1. J. Spasojević, A. Radosavljević, J. Krstić, D. Jovanović, V. Spasojević, M. Kalagasidis-Krušić, Z. Kačarević-Popović, Dual responsive antibacterial Ag-poly(N-isopropylacrylamide/itaconic acid) hydrogel nanocomposites synthesized by gamma irradiation, *Eur. Polym. J.* 69 (2015) 168-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.06.008>
2. Y. Zhang, S. Xie, D. Zhang, B. Ren, Y. Liu, L. Tang, Q. Chen, J. Yang, J. Wu, J. Tang, J. Zheng, Thermo-Responsive and Shape-Adaptive Hydrogel Actuators from Fundamentals to Applications, *Eng. Sci.* 6 (2019) 1-11. <http://dx.doi.org/10.30919/es8d788>
3. V. Vodnik, U. Bogdanović, Metal nanoparticles and their composites: a promising multifunctional nanomaterial for biomedical and related applications, In *Materials for Biomedical Engineering: Inorganic Micro and Nanostructures*, Eds. V. Grumezescu, A.M. Grumezescu, Chapter 12, Elsevier, 2019, 397-426. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102814-8.00014-7>
4. Y. Hu, Z. Li, T. Lan, W. Chen, Photoactuators for Direct Optical-to-Mechanical Energy Conversion: From Nanocomponent Assembly to Macroscopic Deformation, *Adv. Mater.* 28 (2016) 10548-10556. <https://doi.org/10.1002/adma.201602685>
5. Y. Yang, Y. Wu, C. Li, X. Yang, W. Chen, Flexible Actuators for Soft Robotics, *Adv. Intell. Syst.* 2 (2020) 1900077. <https://doi.org/10.1002/aisy.201900077>
6. X. Xu, Y. Liu, W. Fu, M. Yao, Z. Ding, J. Xuan, D. Li, S. Wang, Y. Xia, M. Cao, Poly(N-isopropylacrylamide)-Based Thermoresponsive Composite Hydrogels for Biomedical Applications, *Polymers*, 12 (2020) 580. <https://doi.org/10.3390/polym12030580>
7. Y. Lee, W.J. Song, J.-Y. Sun, Hydrogel soft robotics, *Mater.Today Phys.* 15 (2020) 100258. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100258>
8. J. Li, X. Zhou, Z. Liu, Recent Advances in Photoactuators and Their Applications in Intelligent Bionic Movements, *Adv. Opt. Mater.* 8(18) (2020) 2000886. <https://doi.org/10.1002/adom.202000886>
9. H. Kim, S. Ahn, D.M. Mackie, J. Kwon, S.H. Kim, C. Choi, Y.H. Moon, H.B. Lee, S. Hwan Ko, Shape morphing smart 3D actuator materials for micro soft robot, *Mater. Today* 41 (2020) 243-269. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.06.005>
10. Q. Zheng, C. Xu, Z. Jiang, M. Zhu, C. Chen, F. Fu, Smart Actuators Based on External Stimulus Response, *Front. Chem.* 9 (2021) 650358. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.650358>