



Тајана Симетић¹, Марија Куч²

Тијана Марјановић Сребро³, Јасмина Агбаба⁴

Александра Тубић⁵, Срђан Рончевић⁶, Јелена Молнар Јазић⁷

Оригинални научни рад

DOI: 10.5937/VIK26253S

РАЗГРАДЊА БИСФЕНОЛА А У ОТПАДНОЈ ВОДИ ПРИМЕНОМ УНАПРЕЂЕНИХ ОКСИДАЦИОНИХ ПРОЦЕСА

Резиме: Бисфенол А (БРА) је један од значајних емергентних органских микрополутаната који се често детектује у различитим воденим срединама, укључујући отпадне воде. Због своје високе хемијске стабилности, израженог ендокрино-дисруптивног деловања и ограничене ефикасности уклањања конвенционалним процесима, БРА представља изазов за савремене технологије третмана вода.

У овом раду испитивана је разградња БРА у отпадној води применом UV/H₂O₂ процеса. Уклањање БРА >90% постигнуто је при вишој почетној концентрацији водоник-пероксида и дози UV зрачења од 1000 mJ/cm².

Паралелно су праћене промене индикатора ароматичне структуре, степена минерализације и укупног органског оптерећења као показатеља трансформације органске материје.

Кључне речи: разградња, бисфенол А, отпадна вода, фотохемијски процеси

¹ Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, tajana.djurkic@dh.uns.ac.rs; ORCID: 0000-0002-0923-7034

² Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, marija.kuc@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0009-0007-4538-9602

³ Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, [tijanam@dh.uns.ac.rs](mailto:tijanamat@dh.uns.ac.rs), ORCID: 0009-0006-9886-6516

⁴ Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, jasmına.agbaba@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-9915-2885

⁵ Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, 21000 Нови Сад, aleksandra.tubic@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7503-7754

⁶ Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, srdjan.roncevic@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-8698-4204

⁷ Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, jelena.molnar@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-8696-7647



DEGRADATION OF BISPENOL A IN WASTEWATER BY ADVANCED OXIDATION PROCESSES

Abstract: Bisphenol A (BPA) is one of the important emerging organic micropollutants frequently detected in various aquatic environments, including wastewater. Due to its high chemical stability, pronounced endocrine-disrupting effects, and limited removal efficiency by conventional treatment processes, BPA represents a challenge for modern water treatment technologies. In this study, the degradation of BPA in wastewater was investigated using a UV/H₂O₂ process. BPA removal >90% was achieved at a higher initial hydrogen peroxide concentration and a UV irradiation dose of 1000 mJ/cm². In parallel, changes in aromatic structure indicators, the degree of mineralization, and total organic load were monitored as indicators of organic matter transformation.

Key Words: degradation, bisphenol A, wastewater, photochemical processes

1. Увод

Убрзана индустријализација, урбанизација и континуирани пораст броја становника довели су до све интензивнијег антропогеног притиска на водене ресурсе и последичног нарушавања квалитета површинских и отпадних вода [6]. Међу бројним органским загађујућим материјама које се данас детектују у воденој средини, посебну пажњу привлаче ендокрини дисруптори (енг. endocrine-disrupting chemicals, EDCs), чије присуство представља значајан еколошки и здравствени проблем [11]. Њихова континуирана емисија, постојаност у животној средини и потенцијал за дуготрајну изложеност указују на ограничења конвенционалних процеса пречишћавања отпадних вода, који често не обезбеђују њихово потпуно уклањање [6].

Бисфенол А (енг. bisphenol A, BPA) представља једно од најзначајнијих и највише проучаваних EDC једињења [1]. Због широке примене у производњи поликарбонатне пластике, епоксидних смола и других полимерних материјала, BPA се производи у великим количинама, при чему годишња глобална производња премашује осам милијарди фунти [9, 10]. Широка употреба производа који садрже BPA, укључујући амбалажу за храну, посуде и боце, као и његово ослобађање током производње, употребе и разградње полимерних материјала, представљају значајне путеве његовог доспевања у животну средину. Његова релативна постојаност омогућава перзистирање у воденој средини, док недовољно уклањање током конвенционалних третмана отпадних вода може довести до његовог испуштања у водене реципијенте и даљег ширења у животној средини. BPA је детектован у концентрацијама до 17,2 mg/l у процедним водама са депонија, до 0,37 mg/l у ефлуентима постројења за пречишћавање отпадних вода и до 56 µg/l у површинским водама, што указује на значај различитих антропогених извора и путева његовог доспевања у водене системе [4].

Имајући у виду распрострањеност, постојаност и потенцијалну токсичност BPA, развој ефикасних технологија за његово уклањање из водене средине представља значајан изазов савременог инжењерства заштите животне средине. Различите физичке, хемијске и биолошке методе испитиване су за уклањање BPA, укључујући адсорпцију, мембранске процесе, биолошки третман, фотокаталитичку и електрохемијску оксидацију [3]. Иако ови поступци могу обезбедити висок степен уклањања, њихова примена може бити ограничена високом потрошњом енергије, сложеним



условима рада, потребом за регенерацијом адсорбената или мембрана, осетљивошћу на састав воденог матрикса и могућношћу формирања секундарних загађујућих материја [5].

У том контексту, посебан потенцијал показују унапређени оксидациони процеси (енг. advanced oxidation processes, AOPs), који се заснивају на генерисању високо реактивних оксидационих врста способних за разградњу постојаних органских загађујућих материја. Међу њима, издвајају се процеси засновани на UV зрачењу (UV-AOPs), укључујући UV/H₂O₂ систем. Ефикасност ових процеса зависи од бројних фактора, укључујући почетну концентрацију оксиданта, pH, време реакције и састав воденог матрикса.

Посебно присуство природне органске материје и неорганских јона може утицати на доступност реактивних врста и последично на ефикасност деградације циљних једињења [6, 7]. Иако је разградња ВРА применом АОР система интензивно проучавана, и даље постоји потреба за бољим разумевањем њиховог понашања у реалним воденим матриксима, као и за свеобухватнијом проценом промена органске материје током оксидационог третмана.

У складу са наведеним, циљ овог рада био је испитивање ефикасности UV/H₂O₂ процеса за разградњу ВРА у отпадној води, уз праћење промена органске материје током оксидационог третмана. Поред уклањања ВРА, праћене су промене показатеља ароматичне структуре, степена минерализације и укупног органског оптерећења, како би се свеобухватније проценио степен трансформације органске материје током процеса.

2. Методологија рада

За испитивање ефикасности UV/H₂O₂ процеса коришћена је отпадна вода, чије су основне физичко-хемијске карактеристике приказане у табели 1. Отпадна вода је обогаћена ВРА до циљне почетне концентрације од приближно 100 µg/l.

Фотохемијски третман спроведен је у лабораторијском фотореактору, израђеном од нерђајућег челика, са живином лампом ниског притиска (Philips TUV, 6 W). Експерименти су изведени при почетним концентрацијама H₂O₂ од 10 и 30 mM, уз примену дозе UV у опсегу од 0 до 1400 mJ/cm².

Узорци су узимани у дефинисаним временским интервалима током третмана, након чега је додат натријум-сулфит (Na₂SO₃) ради уклањања преосталог H₂O₂ и прекида даље реакције. Након тога, узорци су припремани за одређивање концентрације ВРА и праћење промена параметара органске материје.

Концентрација ВРА у узорцима одређивана је применом гасне хроматографије са масеном спектрометријом (GC/MS). Пре инструменталне анализе, ВРА је дериватизован ацетанхидридом у базној средини, након чега је дериват екстрахован хексаном применом течно-течне екстракције. Анализа је изведена на систему 7890A/5975C GC/MS (Agilent Technologies), опремљеном капиларном колоном DB-5MS.



Табела 1. Физичко-хемијски параметри отпадне воде

Table 1. Physicochemical parameters of the wastewater

Параметар	Јединица мере	Вредност
pH	/	7,59
електропроводљивост	$\mu\text{S}/\text{cm}$	880,0
мутноћа	NTU	46,24
UV _{254nm}	cm^{-1}	0,4893
UV _{278nm}	cm^{-1}	0,4421
хемијска потрошња кисеоника (енг. chemical oxygen demand, COD)	mg C/l	152,50
амонијак	mg N/l	15,75
укупан фосфор	mg P/l	2,17
укупан органски угљеник (енг. total organic carbon, TOC)	mg C/l	18,95

3. Резултати и дискусија

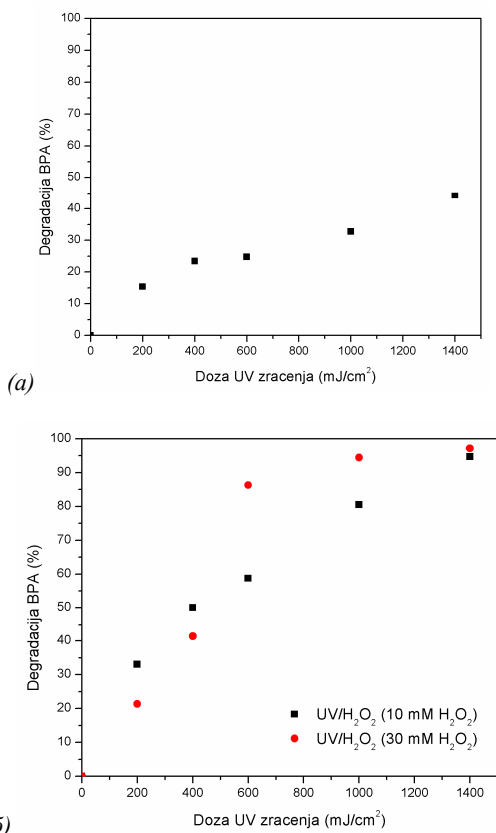
Утицај директне UV фотолизе и UV/H₂O₂ процеса на ефикасност деградације ВРА у отпадној води приказане су на слици 1. Применом директне UV фотолизе забележена је делимична разградња ВРА (око 44%) при дози UV зрачења од 1400 mJ/cm². Добијени резултати потврђују да ВРА подлеже директној фотолизе при UV зрачењу таласне дужине 254 nm, али истовремено указује на ограничену ефикасност овог процеса у испитиваном воденом матриксу. Porcar-Santos и сар. (2024) одредили су квантне приносе фотолизе различитих бисфенолних једињења при 254 nm, при чему су за већину испитиваних једињења добијене вредности у опсегу $4,8\text{--}28,7 \times 10^{-3} \text{ mol E}^{-1}$, док је за ВРА утврђена вредност реда величине $10^{-2} \text{ mol E}^{-1}$.

Наведени подаци потврђују да директна апсорпција UV зрачења може допринети трансформацији ВРА, али да степен фотолизе зависи од фотохемијских својстава једињења и услова у којима се процес одвија. У испитиваној отпадној води, присуство органских компоненти, на шта указују вредности UV₂₅₄ и COD, може додатно ограничити ефикасност директне фотолизе. Ове компоненте могу апсорбовати део примењеног UV зрачења, чиме се смањује његова доступност за фотолизу ВРА, а истовремено могу утицати на секундарне фотохемијске реакције које се одвијају током третмана [2].

Комбиновањем UV зрачења и H₂O₂ уводи се додатни оксидативни пут заснован на фотолизе водоник пероксида и генерисању високо реактивних хидроксил

радикала ($\text{HO}^\bullet$). На тај начин, поред директне фотолизе ВРА, у процес се укључује и индиректна оксидација посредством $\text{HO}^\bullet$ радикала, што објашњава већу ефикасност $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ процеса у односу на директну UV фотолизу (слика 1б).

У испитиваним условима, више од 90% ВРА уклоњено је при дози UV зрачења од $1000 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ и почетној концентрацији H_2O_2 од 30 mM . При нижој концентрацији H_2O_2 од 10 mM , упоредив степен разградње постигнут је тек при већој дози UV зрачења од $1400 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. Оваква зависност указује на значај почетне концентрације H_2O_2 за ефикасност процеса, при чему је у испитиваном опсегу већа концентрација H_2O_2 омогућила постизање високог степена разградње ВРА при нижој дози UV зрачења. Добијени резултати указују да ефикасност $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ процеса зависи од међусобног односа концентрације H_2O_2 и примењене дозе UV зрачења, што је од значаја за оптимизацију процеса у сложеним воденим матриксама.



Слика 1. Зависност степена разградње ВРА у отпадној води од дозе UV зрачења при (а) директној UV фотолизи и (б) $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ процесу

Figure 1. Dependence of BPA degradation in wastewater on UV dose during (a) direct UV photolysis and (b) $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ treatment



Поред ефикасности разградње ВРА, праћене су и промене у саставу органске материје током UV/H_2O_2 третмана, са посебним освртом на формирање нискомолекулских оксидационих производа.

У нетретираној отпадној води концентрација укупних алдехида износила је $7,03 \mu g/l$. Након UV/H_2O_2 третмана, при условима који су обезбедили више од 90% разградње ВРА, концентрација укупних алдехида повећана је на $81,9 \mu g/l$, што одговара повећању од приближно 11,6 пута у односу на нетретирану воду.

Најизраженија промена забележена је за глиоксал, чија је концентрација порасла са $0,16$ на $63,7 \mu g/l$, док су концентрације формалдехида и ацеталдехида повећане са $5,21$ на $11,5 \mu g/l$, односно са $1,51$ на $4,63 \mu g/l$. Концентрација метилглиоксала такође је повећана, са $0,15$ на $2,09 \mu g/l$. Оваква промена указује да ефикасна оксидација ВРА и органских компоненти воденог матрикса може бити праћена формирањем мањих, нискомолекулских органских једињења.

Стога повећање концентрације алдехида представља показатељ интензивне трансформације органске материје током UV/H_2O_2 третмана, а не нужно и њене потпуне минерализације.

С друге стране, смањење UV_{254} за 43,7% и UV_{278} за 54,4% указује на изражену трансформацију ароматичних и других UV -апсорбујућих органских структура током оксидативног UV/H_2O_2 третмана. Још израженија промена забележена је за COD, чија је вредност смањена за 83,9%, што потврђује да је UV/H_2O_2 процес довео до значајне оксидације органског оптерећења воденог матрикса.

Међутим, смањење UV апсорбације и COD не треба тумачити искључиво као потпуну минерализацију органске материје, јер оксидација сложених органских једињења може довести до формирања мањих и поларнијих интермедијера који више не доприносе значајно UV апсорбацији, али и даље представљају део органског оптерећења. Генерално гледано, добијени резултати указују на ефикасност UV/H_2O_2 процеса не само у трансформацији ВРА већ и у значајном смањењу органског оптерећења и UV -активних компоненти воденог матрикса.

4. Закључак

Добијени резултати показали су да је UV/H_2O_2 процес значајно ефикаснији у разградњи ВРА у односу на директну UV фотолизу. Директном UV фотолизом, при дози зрачења од 1400 mJ/cm^2 , уклоњено је око 44% ВРА. Насупрот томе, применом UV/H_2O_2 процеса постигнут је степен разградње ВРА >90% при концентрацији H_2O_2 од 30 mM и дози UV зрачења од 1000 mJ/cm^2 .

Истовремено, при овим условима дошло је до значајног смањења COD (83,9%), UV_{254} (43,7%) и UV_{278} (54,4%), што указује на интензивну трансформацију органске материје у отпадној води. Повећање концентрације укупних алдехида указује на формирање нискомолекулских оксидационих производа током третмана.

На основу добијених резултата, UV/H_2O_2 представља ефикасан приступ за уклањање ВРА и смањење органског оптерећења отпадне воде, при чему је за



потпунију процену процеса неопходно узети у обзир и промене у саставу органске материје и формирање продуката трансформације.

Захвалница

Истраживање је финансирао Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (Ев. бр. 451-03-33/2026-03/200125 и 451-03-34/2026-03/200125).

5. Литература

- [1] Buoso E, Masi M, Limosani R.V, Oliviero C, Saeed S, Iulini M, Passoni F. C, Racchi M, Corsini E. Endocrine Disrupting Toxicity of Bisphenol A and Its Analogs: Implications in the Neuro-Immune Milieu, *Xenobiotics*, 15, 13, 2025.
- [2] Guo Z, Kodikara D, Albi L. S, Hatano Y, Chen G., Yoshimura C, Wang J, Photodegradation of organic micropollutants in aquatic environment: Importance, factors and processes, *Water Research*, 231, 118236, 2023.
- [3] Ighalo J. O., Kurniawan S. B., Khongthaw B, Buhari J, Chauhan P. K., Georgin J., Pfingsten D. S. F. Bisphenol A (BPA) toxicity assessment and insights into current remediation strategies, Review, *Royal Society of Chemistry*, 14, 35128, 2024.
- [4] Brillas E. Degradation/mineralization of bisphenol A from aqueous matrices by single and combined electrochemical advanced oxidation processes. A review, *Separation and Purification Technology*, 357, 130170, 2025.
- [5] Sajid M, Rehman N. U, Suliman M.A. State-of-the-art adsorbent materials for Bisphenol A removal from water: A systematic evaluation of mechanisms, performance, and environmental sustainability, *Journal of Water Process Engineering*, 87, 110067, 2026.
- [6] Shah N. A, Chen X, Javed A, Qu J, Zhang Y. N. A comparative study on degradation kinetics and toxicity changes of BPA and BPS in UV-based advanced oxidation processes, *Environmental Research*, 284, 122223, 2025.
- [7] Gabera M. S, Garcia-Segura S, Lanza M. R. V, dos Santos A. J. Enabling decentralized treatment of BPA through electrified photo-activated advanced oxidation, *Separation and Purification Technology*, 382, 136095, 2026.
- [8] Porcar-Santos O., Cruz-Alcalde A., Sans C. Hydroxyl radical and UV-induced reactions of bisphenol analogues in water: Kinetics, transformation products and estrogenic activity estimation, *Science of the Total Environment*, 906, 167490, 2024.
- [9] Wee S.Y., Aris A.Z. Occurrence and public-perceived risk of endocrine disrupting compounds in drinking water, *Npj Clean Water*, 2 (1), 1-14, 2019.
- [10] Tsai W.T. Survey on the environmental risks of bisphenol A and its relevant regulations in Taiwan: an environmental endocrine-disrupting chemical of increasing concern, *Toxics*, 11 (9), 722, 2023.



- [11] Xiao Y., Han D., Currell M., Song X., Zhang Y. Review of Endocrine Disrupting Compounds (EDCs) in China's water environments: implications for environmental fate, transport and health risks, *Water Research*, 245, 120645, 2023.