



Stručni rad
Rad po pozivu

Ključne reči:
leteći pepeo;
organske i neorganske
zagađujuće materije;
adsorpcija; modifikacija

Key words:
fly ash; organic
and inorganic pollutants;
adsorption; modification

Marina MALETIĆ*

* mvukasinovic@tmf.bg.ac.rs

PONOVNA UPOTREBA LETEĆEG PEPELA KAO ADSORBENTA ZA UKLANJANJE ORGANSKIH I NEORGANSKIH ZAGAĐUJUĆIH MATERIJA IZ VODE

**REUSE OF FLY ASH AS AN ADSORBENT
FOR THE REMOVAL OF ORGANIC
AND INORGANIC POLLUTANTS FROM WATER**

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0002-4112-9316

Leteći pepeo je glavni industrijski nusproizvod sagorevanja uglja, i predstavlja ekološki izazov, ali i resurs sa visokim potencijalom za valorizaciju. Tradicionalno odlaganje letećeg pepela na deponijama narušava kvalitet zemljišta, i dovodi do povećanja rizika od zagađenja životne sredine. U cilju smanjenja negativnog ekološkog uticaja letećeg pepela u današnje vreme se sve više pažnje poklanja njegovoj ponovnoj upotrebi u različitim sektorima.

Jedna od najčešćih primena letećeg pepela je u građevinskoj industriji, gde služi kao dodatni materijal u proizvodnji betona i drugih građevinskih kompozita. Ovakav pristup obezbeđuje značajno smanjenje količine letećeg pepela na deponijama, kao i dobijanje građevinskih materijala poboljšane mehaničke čvrstoće, i dugoročne izdržljivosti i otpornosti na hemijsku degradaciju. Ponovno korišćenje letećeg pepela u proizvodnji građevinskih materijala u skladu je sa principima cirkularne ekonomije i održivog razvoja.

Pored svoje primene u oblasti građevinarstva, leteći pepeo sve više nalazi primenu u zaštiti životne sredine, kao adsorbent za uklanjanje zagađujućih materija u tretmanu voda. Zbog svog hemijskog sastava i porozne strukture, sirovi leteći pepeo pokazuje umereni kapacitet za adsorpciju. Međutim, različite tehnike modifikacije, kao što su alkalni tretman, hidrotermalna karbonizacija, hemijska aktivacija, polimerizacija, primenjuju se kako bi se poboljšale adsorpcione osobine letećeg pepela. Modifikovani leteći pepeo pokazao je značajnu efikasnost u uklanjanju organskih (npr. boje, pesticidi, farmaceutski proizvodi) i neorganskih (npr. teški metali, arsen) zagađujućih materija iz otpadnih voda. Ovako dobijeni materijali predstavljaju jeftine i efikasne adsorbente, koji su pogodni za korišćenje u sistemima za prečišćavanje vode.

Upotreba letećeg pepela u oblasti građevinarstva i kao adsorbenta, ne samo da ublažava ekološke rizike povezane sa njegovim odlaganjem, već i povećeva isplativost tehnologija za kontrolu zagađenja životne sredine. Budući napreci u modifikaciji materijala mogu dodatno doprineti bezbednoj i širokoj primeni letećeg pepela u cilju zaštite životne sredine.

Fly ash, a major industrial byproduct of coal combustion, presents both an environmental concern and a resource with high valorization potential. Traditionally disposed of in landfills, fly ash contributes to land degradation and pollution risks. However, innovative strategies for its reuse significantly reduce environmental waste while enabling sustainable solutions across various sectors.

One of the most established uses of fly ash is in the construction industry, where it serves as a supplementary cementitious material in concrete and other building composites. This approach significantly lowers the environmental impact by reducing the amount of landfilled fly ash and improves the mechanical strength, long-term durability, and resistance of building materials to chemical degradation. Incorporating fly ash into construction materials is in line with the principles of circular economy and sustainable development.

Beyond its structural applications, fly ash is gaining attention for its role in environmental remediation, particularly in water treatment. Due to its chemical composition and porous structure, raw fly ash exhibits moderate adsorption capacity. However, various modification techniques, such as alkaline and hydrothermal treatments, chemical activation, polymerization, and surface coating, have been employed to enhance the adsorptive properties of fly ash. Modified fly ash has shown significant efficiency in removing organic (e.g., dyes, pesticides, and pharmaceuticals) and inorganic (e.g., heavy metals, arsenic) pollutants from wastewater. These modified forms act as low-cost, efficient adsorbents, suitable for integration into water purification systems.

Utilizing fly ash in these dual roles not only mitigates environmental hazards associated with its disposal but also increases the cost-effectiveness of technologies applied for pollution control. Future advancements in material modification and policy frameworks can further promote fly ash's safe and widespread application in sustainable environmental management.

1 Uvod

Uprkos globalnoj tendenciji prelaska na obnovljive izvore energije, sagorevanje uglja i dalje ostaje dominantan način proizvodnje električne energije u mnogim zemljama, uključujući i Srbiju, gde udeo uglja u ukupnoj proizvodnji električne energije iznosi oko 65%. Termoelektrane na uglj generišu značajne količine pepela, od kojih se leteći pepeo i šljaka izdvajaju kao glavni nusproizvodi sagorevanja. Leteći pepeo predstavlja finu frakciju pepela koja se iz dimnih gasova izdvajaju u elektrostatičkim filterima, mada se manji deo može zadržati i u drugim delovima postrojenja. Ovaj materijal je uglavnom sastavljen od neorganskih, nesagorelih čestica uglja, koje se pod uticajem visokih temperatura tokom sagorevanja pretvaraju u staklastu, amorfnu fazu. Hemijski sastav letećeg pepela značajno varira u zavisnosti od mineralnog i hemijskog sastava uglja, kao i uslova sagorevanja, što direktno utiče na njegove fizičko-hemijske osobine i potencijalnu primenu [1].

Dominantne komponente letećeg pepela uključuju silikate, okside trovalentnih metala kao što su aluminijum i gvožđe, okside kalcijuma i magnezijuma, kao i karbonate, sulfide i sulfate [2,3]. Osim ovih glavnih sastojaka, leteći pepeo može sadržati i elemente u tragovima sa toksičnim svojstvima, poput arsena, hroma, kadmijuma, mangana, kobalta, olova i berilijuma, kao i organske zagađujuće supstance, pre svega policiklične aromatične ugljovodonike (PAH) [1-3]. Ove karakteristike čine leteći pepeo značajnim ekološkim problemom, jer se otpad najčešće deponuje na otvorenim deponijama, gde može dovesti do kontaminacije zemljišta, vode i vazduha, ugrožavajući lokalne ekosisteme i ljudsko zdravlje.

S obzirom na sve veće ekološke zahteve i regulative, postoji hitna potreba za pronalaženjem održivih načina upravljanja letećim pepelom. Jedan od najperspektivnijih pravaca jeste njegova primena u industriji, naročito u građevinarstvu. Leteći pepeo se koristi kao dodatni materijal u proizvodnji betona i drugih građevinskih kompozita, čime se ne samo smanjuje količina otpada koja ide na deponije, već i poboljšavaju mehaničke osobine i dugotrajnost građevinskih materijala [4,5]. Ugradnja letećeg pepela u betonske mešavine doprinosi povećanju otpornosti na hemijsku koroziju, smanjenju propustljivosti i povećanju trajnosti konstrukcija, što ima direktan uticaj na održivost i

ekonomičnost građevinskih projekata. Pored toga, istraživanja su pokazala da leteći pepeo, zahvaljujući svom hemijskom sastavu i poroznoj strukturi, može biti efikasan adsorbent za uklanjanje zagađujućih materija iz vode [6-8].

2 Upotreba letećeg pepela u prečišćavanju vode

Prisustvo zagađujućih materija u životnoj sredini postaje sve veći problem usled rasta svetske populacije, intenziviranja poljoprivrednih i industrijskih aktivnosti, kao i ispuštanja otpadnih voda u životnu sredinu. Sve otpadne vode uglavnom sadrže različite organske i neorganske zagađujuće materije (boje, pesticide, lekove, teške metale i dr.), čije prisustvo u životnoj sredini može predstavljati ozbiljan problem. Teški metali su trajni zagađivači životne sredine zbog nemogućnosti razgradnje i sposobnosti bioakumulacije, dok pesticidi i lekovi kontinuirano dospevaju u životnu sredinu, čime predstavljaju perzistentne zagađivače. Stoga je jedna od aktuelnih tema pronalaženje optimalnih metoda za prečišćavanje zagađene vode.

Među mnogobrojnim razvijenim tehnikama za prečišćavanje vode (fotokatalitička degradacija, aerobna degradacija, ozonizacija, hemijska taloženje, hemijska oksidacija ili redukcija, elektrohemijska obrada, filtracija, reversna osmoza, jonska razmena i membranske tehnologije), adsorpcija se smatra jednostavnom i brzom metodom sa niskim energetske i operativnim troškovima, koja ne stvara toksične nusproizvode koji bi mogli izazvati sekundarno zagađenje. Takođe, korišćenje jeftinih i obnovljivih materijala kao alternativa za konvencionalni aktivni uglj dodatno povećava ekonomsku efikasnost procesa adsorpcije.

Poslednje tri decenije obeležene su razvojem novih adsorbenata zasnovanih na otpadnim materijalima za uklanjanje organskih i neorganskih zagađujućih materija u adsorpcionim procesima. Primena adsorbenata dobijenih iz različitih vrsta otpada za prečišćavanje vode može se posmatrati kao korišćenje jednog otpada za sanaciju drugog. Brojne studije su sprovedene o upotrebi letećeg pepela kao adsorbenata za uklanjanje različitih zagađujućih materija iz vode.

U cilju poboljšanja adsorpcionih karakteristika letećeg pepela primenjene su različite metode modifikacije. Metode modifikacije koje se koriste su alkalni tretman, hidrotermalna karbonizacija, hemijska aktivacija, polimerizacija i druge [3,9-11]. Modifikovani leteći pepeo ima bolje adsorpcione osobine i veću selektivnost prema organskim (boje, lekovi, pesticidi) i neorganskim zagađujućim materijama (teški metali, retki elementi Zemljine kore) [6-8]. Ovako dobijeni materijali su se pokazali kao ekonomski isplativi i ekološki prihvatljivi za primenu u tehnologijama prečišćavanja voda, što je posebno značajno za zemlje sa ograničenim resursima i visokim stepenom industrijske zagađenosti. Tabela 1 daje pregled literature upotrebe modifikovanog letećeg pepela kao adsorbenta za uklanjanje različitih zagađujućih materija iz vode.

Tabela 1. Adsorpcioni kapacitet i efikasnost uklanjanja različitih modifikacija letećeg pepela za uklanjanje zagađujućih materija iz vode

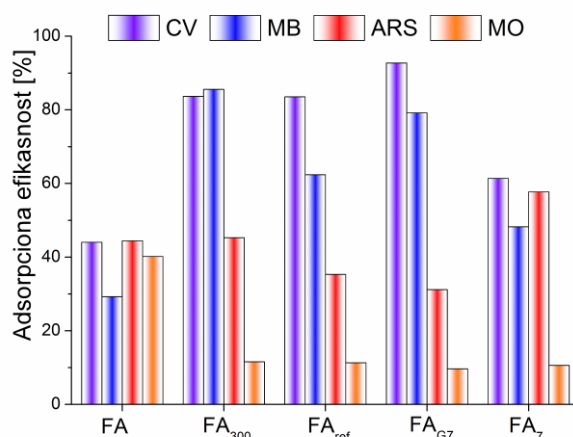
<i>Materijal</i>	<i>Modifikacija</i>	<i>Analit</i>	<i>Adsorpcioni kapacitet, mg/g</i>	<i>Efikasnost uklanjanja, %</i>	<i>Literatura</i>
Sintetički zeolit na bazi letećeg pepela Kompozit ugljenik-zeolit	Hidrotermalna sinteza	Eritormicin	314,7 363,0	94-99	12
Fe ₂ O ₃ -TiO ₂ /FA fotokatalizator	Sol gel proces	Metilensko plavo	-	86,81	13
ZFA/HIO Zeolit ZFA/HZ Zeolit	Hidrotermalni tretman	Metilensko plavo	-	~100	14
FAG	Alkalna aktivacija	Metilensko plavo	-	98,5	15
FA-Geo	Alkalna aktivacija	Metilensko plavo	-	~65	16
MZSB Zeolit	Hidrotermalni tretman	Kristalno ljubičasta	-	52	17
ZFA-600	Alkalni tretman fuzijom	Cd ²⁺	-	84	18
FA-Z	Hidrotermalni tretman	Cd ²⁺ Zn ²⁺	-	60 70	19
ZCFA	Hidrotermalna sinteza	Pb ²⁺	-	98,1	20
Leteći pepeo sa (3-aminopropil) trietoksisilanom i dietilenetri-aminpentasilicetna	Hidrotermalna sinteza	Gd	28,9	-	21

U ovom radu ispitana je upotreba letećeg pepela kao adsorbenta, i kao polazne sirovine za dobijanje efikasnih adsorbentata primenom različitih tehnika modifikacije. Nemodifikovani i modifikovani leteći pepeo korišćeni su kao adsorbenti za uklanjanje boja, lekova, teških metala i retkih elemenata Zemljine kore iz vode. U Tabeli 2 prikazane su korišćene modifikacije.

Tabela 2. Modifikacije uzoraka letećeg pepela, oznake i uslovi modifikacija

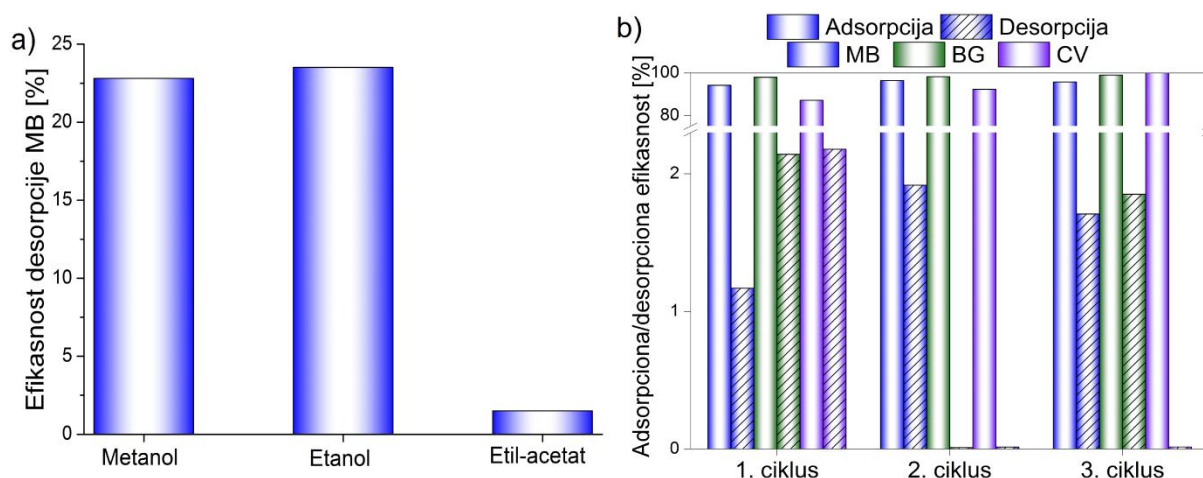
Uzorak	Masa letećeg pepela, g	Modifikacioni agens	Uslovi modifikacije	Literatura
FA ₃₀₀	2,0	3,2 g čvrstog NaOH	300 °C, 3 h, električna peć	22
FA _{ref}	2,0	20 ml 2M NaOH	5 h, refluks na temperaturi ključanja	22
FA _{G7}	9,8	4,2 g dijatomejske zemlje 10 g natrijum silikata Nekoliko kapi 16 M NaOH	Sušenje 2 h na 105 °C Starenje 7 dana na sobnoj temperaturi	22
FA _{G15}			Starenje 15 dana na sobnoj temperaturi	23
FA _{G30}			Starenje 30 dana na sobnoj temperaturi	23
FA ₇	2,0	6 ml 2M NaOH	Mučkanje (120 o/min), 7 dana na sobnoj temperaturi	22
FA _{ac}	9,0	100 ml 2 mol/dm ³ NaOH	Hidrotermalni tretman na 96 °C, 8 h	9
FA _{ac} /Ch	5,0 g FA _{ac}	Rastvor hitozana (1,0 g hitozana u acetatnom puferu pH=4,5)	Mučkanje (150 o/min), 24 h na sobnoj temperaturi	9
FA/Ch _{mag}	1,0	1,0 g hitozana, 3,90 g FeCl ₃ ·6H ₂ O 2,70 g FeCl ₂ ·4H ₂ O	Impregnacija hitozanom i magnetinim česticama gvožđa	9
FA _{mod1}	Odnos FA i tečne faze alkalnog aktivatora 1:1	6 M NaOH SiO ₂ /Na ₂ O=3,1	Alakalno aktiviranje	11
FA _{mod2}	80 % i 20% drvenog pepela	NaOH/Na ₂ SiO ₃	24 h na sobnoj temperaturi 48 h na 60 °C u peći Starenje 28 dana na sobnoj temperaturi	11

Adsorpciona efikasnost nemodifikovanih i modifikovanih uzoraka letećeg pepela za uklanjanje katjonskih (kristalno ljubičasta (CV) i metilensko plavo (MB)) i anjonskih (alizarin crvena (ARS) i metil oranž (MO)) boja prikazana je na slici 1. Primenjene modifikacije povećavaju efikasnost adsorpcije katjonskih boja, dostižući do 92 % za adsorpciju CV na uzorku FA_{G7}. S druge strane, alkalni tretmani nemaju uticaj ili čak smanjuju efikasnost adsorpcije anjonskih boja. Generalno, svi ispitivani uzorci pokazuju najveću adsorpcionu efikasnost za uklanjanje boje kristalno ljubičasto. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da primenjene modifikacije pozitivno utiču na adsorpcionu efikasnost letećeg pepela za uklanjanje katjonskih boja.



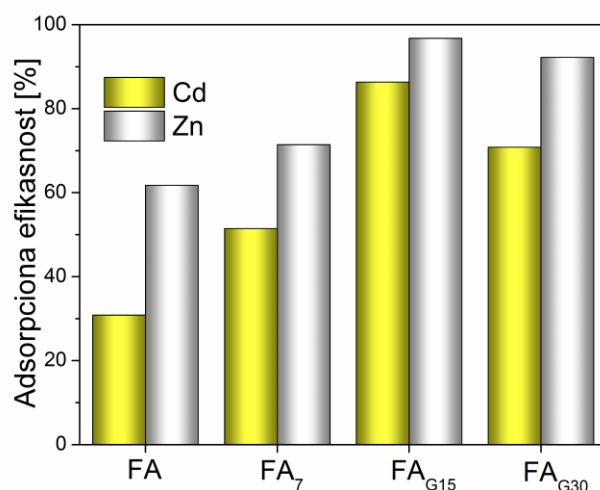
Slika 1. Adsorpciona efikasnost uzorka modificiranog letećeg pepela za uklanjanje odabranih boja

U cilju korišćenja uzorka FA₃₀₀ u više uzastopnih ciklusa adsorpcija/desorpcija ispitani su različiti rastvarači, kao što su metanol, etanol, etil-acetat, kao desorpciona sredstva (Slika 2a). Najbolja efikasnost desorpcije MB sa površine modificiranog adsorbenta postignuta je primenom etanola. Na slici 2b prikazana je adsorpciono/desorpciona efikasnost uzorka FA₃₀₀ u tri uzastopna ciklusa u procesu uklanjanja katjonskih boja (metilensko plavo, kristalno ljubičasto i brilijantno zeleno (BG)). I pored relativno niske efikasnosti desorpcije, rezultati ispitivanja su pokazali da se alkalno-termički modificirani leteći pepeo, FA₃₀₀, može koristiti kao visoko-efikasan adsorbent za uklanjanje metilensko plavog, kristal violet i brilijantno zelene iz vode.



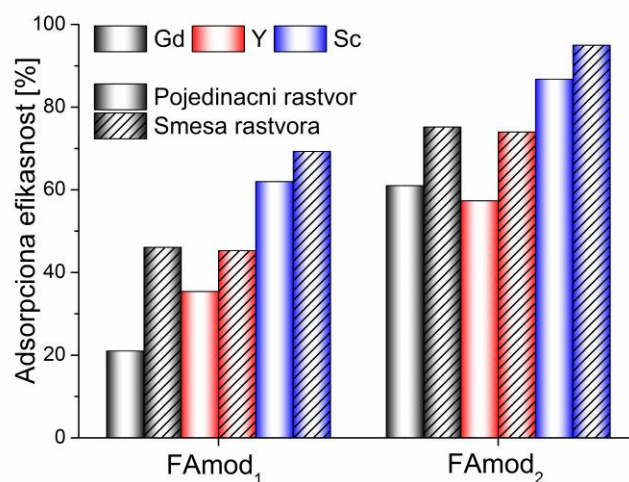
Slika 2. Efikasnost a) desorpcije MB primenom različitih desorpcionih sredstava, i b) adsorpcije/desorpcije sa površine uzorka FA₃₀₀

Na slici 3 su prikazane adsorpcione efikasnosti uzorka FA, alkalno tretiranog FA i geopolimera dobijenih polazeći od FA u procesu uklanjanja teških metala (Cd^{2+} i Zn^{2+}) iz vodenog rastvora. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da modificirani uzorci letećeg pepela pokazuju bolju adsorpcionu efikasnost od nemodifikovanog letećeg pepela, što je izraženije kod adsorpcije jona Zn^{2+} . Geopolimerni uzorci koji su aktivirani sa većom koncentracijom NaOH pokazali su se kao efikasniji adsorbenti u procesu uklanjanja jona Cd^{2+} i Zn^{2+} . Ovo može biti i posledica uvođenja polimernih veza u strukturu materijala tokom alkalne aktivacije, prilikom čega dolazi do povećanja broja aktivnih mesta za vezivanje metalnih jona [23].



Slika 3. Adsorpciona efikasnost nemodifikovanih i modifikovanih materijala u procesu uklanjanja jona Cd^{2+} i Zn^{2+}

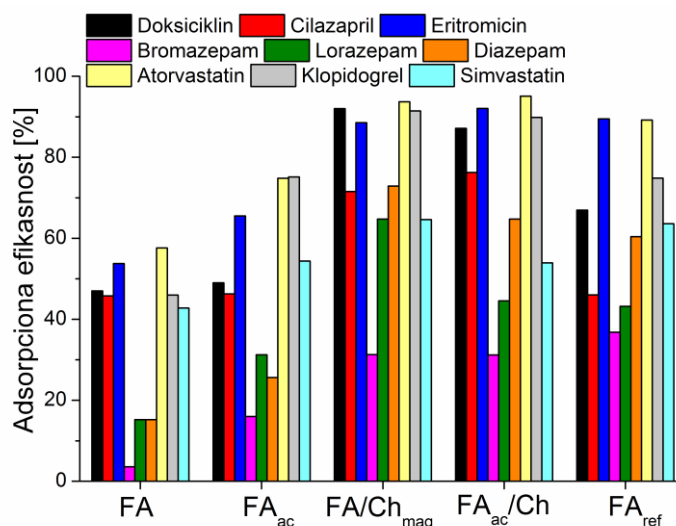
U sklopu istraživanja upotrebe modifikovanog letećeg pepela kao adsorbenta, ispitana je i mogućnost upotrebe alkalno-aktiviranog letećeg pepela (FA_{mod1} i FA_{mod2}) kao adsorbenta za separaciju odabranih retkih elemenata Zemljine kore (REE) iz vodenog rastvora, s obzirom na to da primena ovih neorganskih polimernih materijala za uklanjanje gadolinijuma, itrijuma i skandijuma do sada nije zabeležena u literaturi. Kompeticija i međusobni uticaj jona REE u rastvoru ispitana je na osnovu dobijenih efikasnosti materijala za adsorpciju REE iz pojedinačnih rastvora i iz rastvora smeše jona (Slika 4).



Slika 4. Adsorpciona efikasnost uzoraka FA_{mod1} i FA_{mod2} iz pojedinačnog rastvora i iz rastvora smeše REE

Uzorak FA_{mod2} pokazao je veću adsorpcionu efikasnost za sve ispitivane jone REE, kako iz pojedinačnih rastvora, tako i iz rastvora smeše. Može se primetiti da prisustvo drugih REE jona povoljno utiče na proces adsorpcije, budući da su modifikovani uzorci pokazali veću adsorpcionu efikasnost iz smeše rastvora REE. Povećana adsorpciona efikasnost u smeši može se pripisati većem broju prisutnih jonskih vrsta i većem koncentracionom gradijentu, koji predstavlja pokretačku silu za proces adsorpcije. Sinergistički efekat, primećen između REE jona tokom adsorpcije iz rastvora smeše, ukazuje na to da se ovi joni mogu adsorbovati na različita aktivna mesta ili da adsorpcija može da se odvija različitim mehanizmima.

Alkalno aktiviran leteći pepeo modifikovan hitozanom i magnetnim česticama gvožđa korišćen je za uklanjanje odabranih lekova iz vodenih rastvora. Prema dobijenim rezultatima može se zaključiti da primenjena modifikacija dovodi do povećanja adsorpcione efikasnosti (Slika 5). Ovo povećanje adsorpcione efikasnosti može se pripisati povećanju hrapavosti površine modifikovanih uzoraka, a samim tim i prisustvu većeg broja funkcionalnih grupa na površini koje potiču od hitozana korišćenog za modifikaciju [9]. Uzorak FA/Ch_{mag}, koji sadrži hitozan i magnetne čestice gvožđa pokazao je najveću adsorpcionu efikasnost (preko 80 %) za većinu odabranih lekova.



Slika 5. Uticaj primenjene modifikacije na adsorpcionu efikasnost ispitivanih uzoraka u procesu uklanjanja odabranih lekova

3 Zaključak

Rezultati ovog istraživanja pokazali su da leteći pepeo, kao otpadni materijal iz termoelektrana, ima značajan potencijal za primenu u tretmanu otpadnih voda, kako u uklanjanju organskih, tako i neorganskih zagađujućih materija. Njegova dostupnost, niska cena i mogućnost modifikacije čine ga atraktivnim adsorbentom za široku primenu u zaštiti životne sredine. Modifikacija letećeg pepela, posebno alkalna aktivacija, kao i dodatna modifikacija hitozanom i magnetnim česticama gvožđa, značajno poboljšava njegove adsorpcione karakteristike. Korišćenje modifikovanog letećeg pepela ne samo da omogućava efikasno uklanjanje štetnih materija iz vode, već doprinosi i održivom upravljanju industrijskim otpadom. Ovakav pristup predstavlja primer implementacije principa cirkularne ekonomije, gde se industrijski otpad pretvara u vredan resurs, čime se smanjuje potreba za eksploatacijom prirodnih sirovina i minimalizuje negativan uticaj na životnu sredinu. Reciklaža i ponovna upotreba letećeg pepela ne samo da doprinosi zaštiti ekosistema već i podržava razvoj održivih industrijskih procesa i proizvoda. Ove strategije su u skladu sa globalnim naporima za smanjenje emisija ugljenika i prelazak na zelenu ekonomiju, naglašavajući značaj integrisanog pristupa upravljanju industrijskim otpadom. Dalja istraživanja treba usmeriti ka primeni ovih materijala u realnim uslovima, kao i ka razvoju kompozitnih adsorbenasa sa višefunkcionalnim svojstvima za ciljanu eliminaciju specifičnih zagađujućih materija.

Zahvalnica: Ova istraživanja podržana su od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (Contract No. 451-03-136/2025-03/200287).

4 Literatura

- [1] **Nalbandian, H.**, Report: Trace element emissions from coal in IEA Clean Coal Centre, London, United Kingdom, 89, 2012.
- [2] **Drljača, D., S. Maletić, B. Dalmacija**, Uklanjanje amonijum jona zeolitima sintetizovanih alkalnim fuzionim postupkom od različitih vrsta letećeg pepela, *Hemijska industrija*, 73 (2019), pp. 249–264.
- [3] **Hosseini Asl, S.M., H. Javadian, M. Khavarpour, C. Belviso, M. Taghavi, M. Maghsudi**, Porous adsorbents derived from coal fly ash as cost-effective and environmentally-friendly sources of aluminosilicate for sequestration of aqueous and gaseous pollutants: A review, *Journal of Cleaner Production*, 208 (2019), pp. 1131–1147.
- [4] **Kara De Maeijer, P., B. Craeye, R. Snellings, H. Kazemi-Kamyab, M. Loots, K. Janssens, G. Nuyts**, Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability, *Construction and Building Materials*, 263 (2020), art no. 120493.
- [5] **Hussain, Z., N. Chang, J. Sun, S. Xiang, T. Ayaz, H. Zhang, H. Wang**, Modification of coal fly ash and its use as low-cost adsorbent for the removal of directive, acid and reactive dyes, *Journal of Hazardous Materials*, 422 (2022), art. no. 126778.
- [6] **El Alouani, M., B. Aouan, Y. Rachdi, S. Alehyen, E. H. El Herradi, H. Saufi, J. Mabrouki, N. Barka**, Porous geopolymers as innovative adsorbents for the removal of organic and inorganic hazardous substances: A mini-review, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 10 (2022), pp. 4784–4796.
- [7] **Aigbe, U.O., K. E. Ukhurebor, R. B. Onyancha, O. A. Osibote, H. Darmokoesoemo, H. S. Kusuma**, Fly ash-based adsorbent for adsorption of heavy metals and dyes from aqueous solution: A review, *Journal of Materials Research and Technology*, 14 (2021), pp. 2751–2774.
- [8] **Omran, A. A., O. Hamad Salah, H. F. Shamikh Al-Saedi, M. M. Karim, H. A. Abdulridui, A. H. Kareem**, Evaluation of Activity Coal Fly Ash as Low Cost an Adsorbent for the Removal of Pollutants: Equilibrium and Isotherm Studies of Pharmaceutical Compounds, *Asian Journal of Green Chemistry*, 8 (2024), pp. 161–172.
- [9] **Vukčević, M., D. Trajković, M. Maletić, M. Mirković, A. Perić Grujić, D. Živojinović**, Modified Fly Ash as an Adsorbent for the Removal of Pharmaceutical Residues from Water, *Separations*, 11 (2024), art no. 337
- [10] **Trivunac, K., M. Vukčević, M. Maletić, N. Karić, B. Pejić, A. Perić Grujić**, Waste materials as adsorbents for heavy metals removal from water: comparative analysis of modification techniques, *Tekstilna industrija*, 70 (2023), 1, pp. 4-10.
- [11] **Radojičić, T., K. Trivunac, M. Vukčević, M. Maletić, N. Palić, I. Janković-Častvan, A. Perić Grujić**, Rare Earth Element Adsorption from Water Using Alkali-Activated Waste Fly Ash, *Materials* 18 (2025), art no. 699.
- [12] **Grela, A., J. Kuc, A. Klimek, J. Matusik, J. Pamuła, W. Franus, K. Urbanski, T. Bajda**, Erythromycin scavenging from aqueous solutions by zeolitic materials derived from fly ash, *Molecules*, 28 (2023), art no. 798.
- [13] **Zhu, J., S. Liu, J. Ge, X. Guo, X. Wang, H. Wu**, Synthesis of Fe₂O₃-TiO₂/fly-ash-cenosphere composite and its mechanism of photocatalytic oxidation under visible light, *Research on Chemical Intermediates*, 42 (2016), pp. 3637–3654.
- [14] **Lin, L., Y. Lin, C. Li, D. Wu, H. Kong**, Synthesis of zeolite/hydrous metal oxide composites from coal fly ash as efficient adsorbents for removal of methylene blue from water, *International Journal of Mineral Processing*, 148 (2016), pp. 32–40.
- [15] **EL Alouani, M., S. Alehyen, M. EL Achouri, M. Taibi**, Removal of Cationic Dye – Methylene Blue- from Aqueous Solution by Adsorption on Fly Ash-based Geopolymer, *Journal of Materials and Environmental Science* 9 (2018), 1, pp. 32–46.
- [16] **Novais, R. M., G. Ascensao, D. M. Tobaldi, M. P. Seabra, J. A. Labrincha**, Biomass fly ash geopolymer monoliths for effective methylene blue removal from wastewaters, *Journal of Cleaner Production*, 171 (2018), pp. 783–794.

- [17] **Rodrigues Bertolini, T. C., J. de Carvalho Izidoro, R. Reis Alcântara, L. C. Grosche, D. A. Fungaro**, Surfactant-Modified Zeolites from Coal Fly and Bottom Ashes as Adsorbents for Removal of Crystal Violet from Aqueous Solution, *Acta Velit*, 1 (2015), 4, 78–94.
- [18] **Javadian, H., F. Ghorbani, H. Tayebi, S. M. Hosseini Asl**, Study of the adsorption of Cd (II) from aqueous solution using zeolite-based geopolymer, synthesized from coal fly ash; kinetic, isotherm and thermodynamic studies, *Arabian Journal of Chemistry*, 8 (2015), pp. 837–849
- [19] **Visa, M., L. Isac, A. Duta**, Fly ash adsorbents for multi-cation wastewater treatment, *Applied Surface Science*, 258 (2012) pp. 6345–6352.
- [20] **Golbad, S., P. Khoshnoud, N. Abu-Zahra**, Hydrothermal synthesis of hydroxy sodalite from fly ash for the removal of lead ions from water, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14 (2017), pp. 135–142.
- [21] **Cui, J., Q. Wang, J. Gao, Y. Guo, F. Cheng**, The selective adsorption of rare earth elements by modified coal fly ash based SBA-15, *Chinese Journal of Chemical Engineering* 47 (2022), pp. 155–164.
- [22] **Karić, N., M. Maletić, S. Živojinović, M. Vukčević, M. Milošević, K. Trivunac, A. Perić Grujić**, Proceedings *International Scientific and Professional Conference POLITEHNIKA 2023*, The Academy of Applied Technical Studies Belgrade, Beograd, Srbija, 2023.
- [23] **Karić, N., S. Živojinović, M. Vukčević, M. Maletić, A. Perić Grujić, K. Trivunac**, Proceedings *XIV Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska*, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci, Banja Luka, Republika Srpska, B&H, 2023.