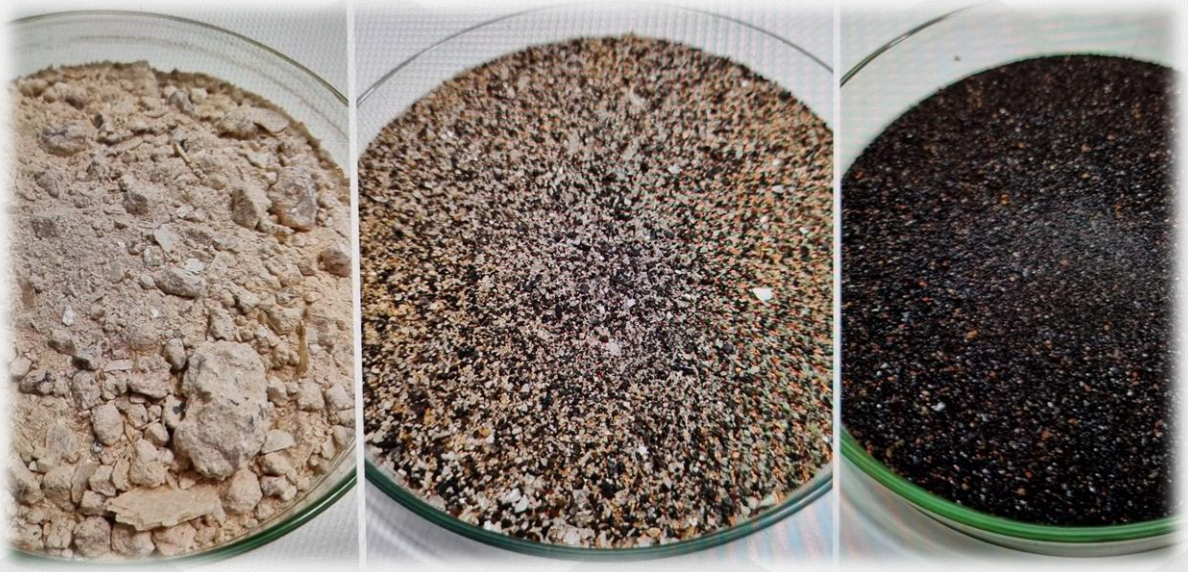
Slovenski simpozij občanske znanosti

Kritične surovine za strateške tehnologije skozi oči mladih



ZBORNIK POVZETKOV IN PRISPEVKOV

23. oktober 2026

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana

Institut "Jožef Stefan" Ljubljana, Slovenija

ARIS Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije

Zbornik povzetkov in prispevkov

Slovenski simpozij občanske znanosti:

Kritične surovine za strateške tehnologije skozi oči mladih

Slovenski simpozij občanske znanosti z naslovom *»Kritične surovine za strateške tehnologije skozi oči mladih«* je potekal v organizaciji *Odseka za anorgansko kemijo in tehnologijo* Instituta »Jožef Stefan«, Ljubljana ter ob finančni podpori Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (O1-0327, *Opolnomočenje skupnosti: širjenje državljanske znanosti za trajnostno upravljanje z elementi redkih zemelj*).

Institut "Jožef Stefan" Ljubljana, Slovenija

ARIS Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije

23. oktober 2026
Institut "Jožef Stefan", Ljubljana

Urednika:	Marko Jeran, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana Gašper Tavčar, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
Uredniški in recenzentski odbor:	Marko Jeran, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana Gašper Tavčar, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana Jasna Kastivnik, OreTech, Vrhnika
Tehnični urednik:	Marko Jeran, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
Izdano pri:	Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, Ljubljana
Organizator:	Institut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Jamova cesta 39, Ljubljana
Medijska podpora:	Nika Kunavar, POP TV Janez Usenik, POP TV
Fotografiji na naslovni in zadnji strani:	Jasna Kastivnik, OreTech, Vrhnika Marko Jeran, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana

Ljubljana, oktober 2026

Kataložni zapis o publikaciji (**CIP**)
pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani
COBISS.SI-ID 294507267
ISBN 978-961-264-346-1 (PDF)

KAZALO

Uvod **5**

Program simpozija **6**

Povzetki sekcijskih predavanj **8**

Prispevki sekcijskih predavanj **16**

Drugi prispevki **70**

UVOD

… kritičnim surovinam in simpoziju na pot

Pospešen razvoj znanosti, tehnologije in panog industrije je spodbudil razvoj izdelkov z dodano vrednostjo. Zaradi slednjega je potrebno tako pedagoškemu osebju kot mladim, v izobraževanje vključenim posameznikom, nenehno nuditi podporo pri učenju novih atraktivnih vsebin, preko katerih bodo razvijali veščine interdisciplinarnega povezovanja in razmišljali o trajnostnem razvoju. Skozi aktivnosti in uvedbo medgeneracijskega dialoga med mladimi in uveljavljenimi posamezniki zainteresirane javnosti smo na temo strateških surovin preko natečaja zbirali prispevke mladih. Najboljše prispevke, ki so naslavljali izzive Evropskega prostora pri zagotavljanju kritičnih surovin, bodo posamezniki ali skupine predstavili na zaključnem simpoziju ob izidu zbornika. Zbornik tako predstavlja interdisciplinarni pristop pri obravnavi strateških materialov in stanje področja skozi oči mladih.

V času sodobnega tehnološkega napredka imajo strateške surovine, med njimi predvsem redke zemlje, ključno vlogo v mnogih industrijskih panogah. Mednje uvrščamo predvsem obnovljive vire energije, elektroniko in medicino. Pomembno vlogo na področju trajnostne uporabe redkih zemelj bodo v prihodnosti igrale raziskave in inovacije. Razumevanje omenjenih kritičnih surovin je ključno za vsakogar, ki želi slediti sodobnim smernicam tehnološkega napredka. K pripravi zbornika in simpozija so bili povabljeni tudi predstavniki gospodarstva in industrije. Z aktivno komunikacijo na relaciji »znanost – odločevalne strukture – gospodarstvo« lahko ustvarimo velik prispevek v družbi. Prav tako ni zanemarljiv vpliv prispevka občanov na gospodarstvo. Interes za kritične surovine igra v času zelenega prehoda pomemben vpliv. Informiranost in zaposlovanje bodočih kadrov, ki bodo vključeni v gospodarske panoge na vseh nivojih, terja široko ozaveščanje, implementacijo novih znanj in dobrih praks. Trajnostno je naravnano tudi globalno učenje, ki poteka po celotni družbeni vertikali. Z doma razvitim znanjem in izkušnjami bomo tako lahko lažje ustvarjali izdelke in materiale z dodano vrednostjo.

Prispevki simpozija celostno obravnavajo pomen kritičnih in strateških surovin za sodobno družbo ter njihov vpliv na tehnološki, gospodarski, okoljski in družbeni razvoj. V ospredju so vprašanja pridobivanja, uporabe, recikliranja in krožnega gospodarjenja s surovinami, njihov pomen za razvoj novih materialov in tehnologij ter izzivi, povezani z njihovo dostopnostjo in trajnostno rabo. Posebna pozornost je namenjena vplivom kritičnih surovin na okolje in človeka, odgovornosti v svetovnih dobavnih verigah ter možnostim vključevanja javnosti in občanske znanosti v raziskovanje in trajnostno upravljanje teh virov. Prispevki hkrati osvetljujejo vlogo strateških surovin na različnih področjih znanosti, energetike in medicine ter izpostavljajo pomen interdisciplinarnega pristopa pri iskanju trajnostnih rešitev za prihodnost.

Takšne vsebine predstavljajo pomembno spodbudo za nadaljnje raziskovanje, povezovanje znanja in razvoj novih idej na področju kritičnih in strateških surovin. Z nadaljnjim vključevanjem mladih, strokovne javnosti in gospodarstva lahko krepimo interdisciplinarno sodelovanje ter prispevamo k iskanju trajnostnih rešitev za prihodnost.

Marko Jeran in **Gašper Tavčar**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
Koordinatorja projekta občanske znanosti in urednika zbornika

PROGRAM SIMPOZIJA

8.30 – 9.00	Prihod in prijava udeležencev
9.00 – 9.10	**Marko Jeran**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, koordinator aktivnosti projekta občanske znanosti ***Kritične surovine kot priložnost za občansko znanost in aktivno državljanstvo***
9.10 – 9.20	Odprtje simpozija in uvodne misli direktorja: prof. dr. **Leon Cizelj**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
9.20 – 9.25	**Sekcija 1**: moderator **Marko Jeran**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
9.25 – 9.45	Zaslužni prof. dr. **Maks Tajnikar**, Univerza v Ljubljani, Ekonomska fakulteta, Ljubljana ***Kritične surovine z vidiki evolucije proizvodnih načinov***
9.45 – 10.05	Zaslužna prof. dr. **Lučka Kajfež Bogataj**, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Ljubljana in Univerza v Mariboru, Maribor ***Podnebne spremembe – kje smo in kam gremo?***
10.05 – 10.25	Prof. dr. **Gašper Tavčar**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana ***Kritične surovine: kaj so, kje jih uporabljamo in zakaj so pomembne***
10.25 – 10.35	**Žiga Babnik, Vita Zbačnik**, Biotehniški izobraževalni center Ljubljana, Gimnazija in veterinarska šola in Institut "Jožef Stefan", Ljubljana ***Ocena potenciala e-odpadkov kot vira elementov redkih zemelj in strateških kovinskih surovin v okviru občanske znanosti***
10.35 – 11.05	***Odmor***
11.05 – 11.10	**Sekcija 2**: moderator **Marko Jeran**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
11.10 – 11.30	Prof. dr. **Kristina Žužek**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana ***Zeleni prehod v primežu kritičnih surovin – kako do trajnostnih magnetov?***
10.30 – 11.40	**Davor Bokal**, OŠ Vižmarje Brod, Ljubljana ***Recikliranje kritičnih surovin***
11.40 – 11.50	**Klara Ferlič**, Gimnazija Celje–Center, Celje ***Kritične surovine in človekove pravice: vpliv svetovnih dobavnih verig na kršenje človekovih pravic***
11.50 – 12.10	**Jasna Kastivnik**, OreTech, Vrhnika ***Kritične surovine: od rudnika do odpadkov – in nazaj do surovine***
12.10 – 12.30	**Mateja Aleksandra Kegel**, *AAE Gamit* ***Strateške surovine v energetiki: materiali, kritične surovine in krožnost vetrnih elektrarn***
12.30 – 13.00	***Odmor***

13.00 – 13.05	**Sekcija 3**: moderator **Marko Jeran**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
13.05 – 13.25	**Luka Irenej Pečan**, *BioStratexa, Piran* ***Vloga radionuklidov redkih zemelj v sodobni nuklearni medicini pri obravnavi onkoloških bolezni***
13.25 – 13.35	**Zarja Uranjek**, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo in Institut "Jožef Stefan", Ljubljana ***Iridijeve(III) koordinacijske spojine kot alternativa cisplatinu za zdravljenje rakavih tumorjev***
13.35 – 13.45	**Florijan Rauter**, **Taj Žmitek Pravst**, Biotehniški izobraževalni center, Gimnazija in veterinarska šola, Ljubljana in Institut "Jožef Stefan", Ljubljana ***Elementi redkih zemelj v jabolkih: prisotnost v tleh, porazdelitev v rastlini in njihov vpliv nanjo***
13.45 – 13.55	**David Pavlović**, Šolski center Celje, Srednja šola za kemijo, elektrotehniko in računalnišvo, Celje ***Uporaba jajčnih lupin kot naravnega adsorbenta za bakrove (Cu^{2+}) ione***
13.55 – 14.05	**Eva Merklin** in **Anej Kramer**, Biotehniški izobraževalni center Ljubljana, Gimnazija in veterinarska šola, Ljubljana in Institut "Jožef Stefan", Ljubljana ***Ocena bioloških učinkov vodotopnih ionov redkih zemelj na mikroorganizme v luči trajnostnega razvoja novih materialov***
14.05 – 14.25	**Marko Jeran**, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana ***Urbano rudarjenje e-odpadkov v Sloveniji ter vloga gospodinjstev in občanske znanosti pri pridobivanju strateških surovin***
14.25 – 15.00	Zaključne misli in pogled v prihodnost – skupinska razprava

POVZETKI

sekcijskih predavanj



Kritične surovine: kaj so, kje jih uporabljamo in zakaj so pomembne

Gašper Tavčar[1,*], Marko Jeran[1]

[1] Institut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana

**e-mail: gasper.tavcar@ijs.si*

Povzetek

Kritične surovine so materiali, brez katerih danes ni mogoče zagotavljati proizvodnje številnih ključnih tehnologij. Evropska unija mednje uvršča surovine z velikim gospodarskim pomenom in povečanim tveganjem oskrbe. Med najbolj izpostavljenimi so redke zemlje, litij, kobalt, naravni grafit, nikelj, galij, germanij, volfram, tantal in elementi platinske skupine. Njihov pomen izhaja predvsem iz specifičnih kemijskih, magnetnih, elektronskih in mehanskih lastnosti, ki jih pri številnih aplikacijah ni mogoče enostavno nadomestiti.

Redke zemlje, predvsem neodim, prazeodim, disprozij in terbij, so ključne za izdelavo visoko zmogljivih permanentnih magnetov Nd–Fe–B. Ti se uporabljajo v elektromotorjih električnih vozil, vetrnih turbinah, robotiki, računalniški tehniki in številnih drugih napravah. Litij, nikelj, kobalt, mangan in grafit so pomembni materiali za litij-ionske baterije. Galij in germanij imata pomembno vlogo v polprevodniških in optoelektronskih tehnologijah, tantal pa se uporablja predvsem v kondenzatorjih in specialnih zlitinah. Volfram je zaradi visoke temperature tališča in trdote pomemben za rezalna orodja, visokotemperaturne materiale in obrambne aplikacije, elementi platinske skupine pa so nepogrešljivi pri katalizi, elektrokemijskih procesih in tehnologijah vodika. Poseben problem predstavlja dejstvo, da so pridobivanje, predelava in rafinacija številnih teh surovin geografsko zelo skoncentrirani. Evropska industrija je zato pri nekaterih materialih močno odvisna od uvoza. Kritičnost surovine tako ni neposredno povezana z njeno absolutno količino v zemeljski skorji, temveč predvsem z možnostjo varne in stabilne dobave. Poleg primarnega rudarjenja postajajo zato vse pomembnejši tudi sekundarni viri, kot so elektronski odpadki, izrabljene baterije, permanentni magneti, metalurški prahovi in drugi industrijski ostanki. Pomemben del razvoja novih tehnologij je usmerjen v učinkovitejše pridobivanje in ločevanje kritičnih elementov iz kompleksnih materialov. Pri tem se uporabljajo hidrometalurški, pirometalurški in solvometalurški postopki, ionske tekočine, globoka evtektična topila, selektivna ekstrakcija, obarjanje in elektrokemijske metode. Poseben izziv je doseči visoko selektivnost, saj so kritični elementi pogosto prisotni skupaj z velikimi količinami železa, aluminija, bakra, cinka ali drugih kovin.

Kritične surovine niso zgolj geološko vprašanje, ampak predvsem tehnološki problem, ki vključuje kemijo, materiale, separacijske procese, recikliranje in vzpostavljanje celotnih vrednostnih verig.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa P1-0045 in projekta občanske znanosti O1-0327 *Opolnomočenje skupnosti: širjenje državljanske znanosti za trajnostno upravljanje z elementi redkih zemelj*, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).



Viri

Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, Á., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., … Christou, M. (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study.* JRC Science for Policy Report. https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54115/attachments/1/translations/en/renditions/native

European Commission: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., & Veeh, C. (2023). *Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report.* Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585

European Parliament, & Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020.* http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

SCRREEN3. (2023). *Critical raw materials 2023 factsheets.* https://scrreen.eu/crms-2023/



Zeleni prehod v primežu kritičnih surovin – kako do trajnostnih magnetov?

Kristina Žužek[1,2,*]

[1] Institut "Jožef Stefan", Odsek za nanostrukturne materiale, Ljubljana
[2] Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana

**e-mail: tina.zuzek@ijs.si*

Povzetek

Prehod v podnebno nevtralno družbo zahteva temeljito preobrazbo načina, kako proizvajamo, uporabljamo in ponovno vključujemo materiale v gospodarstvo. Evropski zeleni dogovor postavlja zeleni in energetski prehod med osrednje razvojne usmeritve Evropske unije, pri čemer imajo ključno vlogo tehnologije obnovljivih virov energije, elektrifikacija prometa in digitalizacija. Toda prav tehnologije, ki naj bi zmanjšale našo odvisnost od fosilnih goriv, povečujejo potrebe po številnih surovinah, katerih pridobivanje je geografsko skoncentrirano, okoljsko zahtevno ali povezano z ranljivimi globalnimi dobavnimi verigami.

Med takšne materiale sodijo tudi redke zemlje – skupina 17 kemijskih elementov, ki vključuje 15 lantanoidov ter skandij in itrij. Slednje so zaradi svoje edinstvene elektronske strukture in posledičnih magnetnih lastnosti nepogrešljive za izdelavo najzmogljivejših trajnih magnetov, pri čemer imajo ključno vlogo predvsem Nd in Pr ter za izboljšanje odpornosti proti razmagnetenju pri višjih temperaturah tudi kritičnejša Dy in Tb. Evropska unija je njihovo strateško vlogo prepoznala tudi v Evropskem aktu o kritičnih surovinah, katerega namen je zagotoviti bolj trajnostno in vzdržno oskrbo s kritičnimi surovinami, okrepiti evropske zmogljivosti ter zmanjšati odvisnost od posameznih zunanjih dobaviteljev. Pomemben del te strategije tako predstavljajo učinkovitejša raba surovin, razvoj sekundarnih virov in recikliranje. S tem postaja krožno gospodarstvo ne le okoljski cilj, temveč tudi pomembno orodje za zmanjševanje surovinske kritičnosti in krepitev tehnološke ter gospodarske odpornosti Evrope.

Trajni magneti na osnovi Nd-Fe-B so odličen primer. Sodijo med najzmogljivejše magnetne materiale, ki jih poznamo, in jih najdemo v elektromotorjih električnih vozil, generatorjih vetrnih turbin, robotiki, elektroniki ter številnih drugih sodobnih tehnologijah. Njihove izjemne lastnosti temeljijo predvsem na magnetni fazi $Nd_2Fe_{14}B$, njihova proizvodnja pa zahteva Nd in Pr, in ter druge redke zemlje kot sta Dy in Tb. Vprašanje zato ni več samo, kako izdelati čim boljši magnet, temveč tudi, kako ga izdelati z manj kritičnimi surovinami, kako mu podaljšati življenjsko in kako magnet po koncu njegove uporabe čim učinkoviteje vrniti v proizvodni cikel.

Predstavljene bodo različne možnosti recikliranja trajnih magnetov, ki temeljijo na fizikalnih, kemijskih in elektrokemijskih principih. Pri fizikalnih postopkih želimo čim bolj ohraniti vrednost in strukturo obstoječega magnetnega materiala ter ga z razmagnetenjem, drobljenjem, mletjem, separacijo in ponovnim procesiranjem neposredno vrniti v proizvodni cikel. Kemijski in elektrokemijski pristopi pa omogočajo selektivno ločevanje elementov in faz ter pridobivanje uporabnih magnetnih materialov iz kompleksnih odsluženih komponent. Izbira ustrezne reciklažne poti je kompromis med kakovostjo pridobljenega materiala, porabo energije in kemikalij, okoljskim odtisom ter možnostjo njegove ponovne uporabe.

Poseben poudarek bo namenjen konceptu, pri katerem materiala ne razgradimo popolnoma nazaj do posameznih elementov, temveč skušamo ohraniti in ponovno uporabiti funkcionalna magnetna zrna $Nd_2Fe_{14}B$. Takšna zrna lahko pridobimo iz odsluženih magnetov ter jih uporabimo kot



gradnike novega magneta. Na ta način ohranimo več vrednosti, energije in znanja, ki so bili v material vloženi že pri njegovi prvotni proizvodnji, ter potencialno zmanjšamo število energetsko in snovno zahtevnih korakov recikliranja.

Predstavljeno bo tudi, da odgovor na pomanjkanje kritičnih surovin ni nujno v dodajanju vedno več redkih zemelj, temveč predvsem v boljšem razumevanju in načrtovanju materiala na mikro- in nanometrski ravni. Posebej pomembne so meje med posameznimi magnetnimi zrni. Čeprav predstavljajo le majhen delež materiala, lahko njihova kemijska sestava, struktura odločilno vplivajo na odpornost magneta proti razmagnetenju. Tako lahko z njihovim načrtovanjem izboljšujemo magnetne lastnosti ob hkratnem zmanjševanju vsebnosti redkih zemelj. Pomemben korak v tej smeri predstavlja tudi vzpostavitev *Laboratorija za kritične surovine* na Institutu »Jožef Stefan«, ki bi na enem mestu povezoval raziskave, razvoj in demonstracijo naprednih tehnologij za pridobivanje, recikliranje, ponovno uporabo in kroženje kritičnih surovin.

Na primeru magnetov Nd-Fe-B bo prikazano, kako lahko povezovanje fizike, kemije, reciklažnih tehnologij in načrtovanja materialov prispeva k prehodu od linearnega modela h krožnemu gospodarstvu. Odsluženi magnet pri tem ni več odpadek, temveč dragocen sekundarni vir materiala za naslednjo generacijo magnetov. Razvoj takšnih pristopov tako hkrati zmanjšuje okoljski odtis, potrebe po primarnih kritičnih surovinah in evropsko uvozno odvisnost ter omogoča razvoj visokozmogljivih magnetov, potrebnih prav za tehnologije zelenega prehoda.

Zahvala

Raziskave so bile izvedene s podporo Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru raziskovalnega programa P2-0084 in projekta *RecovREE* (PR-14167), Okvirnega programa Evropske unije za raziskave in inovacije Obzorje Evropa v okviru projektov *REESILIENCE* (pogodba št. 101058598) in *GREENE* (pogodba št. 101129888) ter Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in inovacije Republike Slovenije v okviru projekta *ERA-MIN SIREN* (pogodba št. C3360-25-452010).



Kritične surovine: od rudnika do odpadkov – in nazaj do surovine

Jasna Kastivnik[1,*], Gašper Tavčar[2], Marko Jeran[2]

[1] OreTech, Vrhnika, Slovenija
[2] Institut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana

**e-mail: jasna@oretech.si*

Povzetek

Primarni mineralni viri predstavljajo naravne koncentracije mineralov in elementov v zemeljski skorji, ki jih je mogoče z ustreznimi rudarskimi in predelovalnimi postopki izkoriščati kot mineralne surovine. Mednje sodijo rude kovin, kot so železo, baker, zlato, tantal in preostali elementi redkih zemelj, ter nekovinske mineralne surovine, kot so fosfati in kremen.

Sekundarni mineralni viri predstavljajo materiale, ki nastajajo kot odpadki ali stranski proizvodi v rudarskih, metalurških in drugih industrijskih procesih oziroma izvirajo iz proizvodov po koncu njihove življenjske dobe. Mednje sodijo rudniška jalovina, metalurške žlindre, prahovi in mulji iz industrijskih procesov, pepeli ter odpadna električna in elektronska oprema. Zaradi vsebnosti kovin in drugih uporabnih komponent lahko ti materiali predstavljajo pomemben alternativni vir kritičnih surovin. Naraščajoče potrebe po kritičnih surovinah, ki so ključne za razvoj sodobnih tehnologij, energetskega prehoda, elektrifikacije in digitalizacije, postavljajo pridobivanje mineralnih surovin pred nove izzive. Poleg razvoja in odgovornega izkoriščanja primarnih nahajališč postaja zato vse pomembnejše tudi ponovno pridobivanje surovin iz sekundarnih virov.

Bogatenje primarnih in sekundarnih mineralnih surovin obsega vrsto med seboj povezanih procesnih postopkov, katerih cilj je ločevanje in koncentriranje vrednih mineralnih oziroma kovinskih komponent od manj vrednih spremljajočih faz. Glede na fizikalne in mineraloške lastnosti materiala se uporabljajo različni postopki, kot so gravitacijska, magnetna in elektrostatska separacija, flotacija ter njihove kombinacije. Učinkovitost teh postopkov je v veliki meri odvisna od mineralne sestave, velikosti delcev, stopnje osvoboditve mineralnih zrn ter razlik v njihovih fizikalnih lastnostih. Učinkovito bogatenje omogoča pridobivanje koncentratov, primernih za nadaljnjo metalurško ali kemijsko predelavo, hkrati pa lahko zmanjša količino materiala, ki ga je potrebno obdelovati v nadaljnjih procesnih stopnjah. Pri sekundarnih virih ima bogatenje še dodatno vlogo, saj omogoča pretvorbo materialov, ki so bili tradicionalno obravnavani kot odpadki, v potencialne vire surovin.

Prihodnost oskrbe s kritičnimi surovinami zato ni povezana zgolj z odpiranjem novih rudnikov, temveč z integriranim pristopom, ki združuje odgovorno izkoriščanje primarnih nahajališč, učinkovite tehnologije bogatenja, ponovno predelavo rudarskih in industrijskih ostankov ter recikliranje. Takšen pristop omogoča učinkovitejšo uporabo mineralnih virov, zmanjševanje količine odpadkov in postopno prehajanje od linearnega proti bolj krožnemu modelu gospodarjenja z mineralnimi surovinami.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa P1-0045 in projekta občanske znanosti O1-0327, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).



Urbano rudarjenje e-odpadkov v Sloveniji ter vloga gospodinjstev in občanske znanosti pri zagotavljanju strateških surovin

Marko Jeran[1,*], Gašper Tavčar[1,2], Aleksander Zidanšek[2,3,4], Andreja Abina[2]

[1] Institut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana
[2] Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana
[3] Institut "Jožef Stefan", Odsek za fiziko trdne snovi, Ljubljana
[4] Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor

**e-mail: marko.jeran@ijs.si*

Povzetek

Kritične in strateške surovine imajo pomembno vlogo pri razvoju sodobne industrije, digitalizaciji in zelenem prehodu, vendar je njihova dostopnost vse bolj povezana z vprašanji zanesljivosti dobavnih verig, recikliranja in učinkovite rabe virov. Med njimi imajo posebno mesto elementi redkih zemelj, ki so nepogrešljivi v številnih sodobnih tehnologijah, njihovo poznavanje in razumevanje njihovega pomena pa sta med splošno populacijo še vedno razmeroma omejeni. Pregledne študije namreč kažejo na pomembne vrzeli v znanju javnosti o elementih redkih zemelj in njihovem pomenu za družbo in industrijo.

Pomemben, vendar pogosto spregledan vir kritičnih in strateških surovin predstavljajo elektronski odpadki (e-odpadki). Ti vključujejo izrabljene električne in elektronske naprave, od mobilnih telefonov, računalnikov in tablic do baterij, svetilk, gospodinjskih aparatov in drugih elektronskih naprav. Namen raziskave je bil proučiti ravnanje gospodinjstev z e-odpadki, prepoznati ključne dejavnike, ki prebivalce spodbujajo oz. odvračajo od njihovega recikliranja, preveriti poznavanje pojmov "redke zemlje" in "kritični" oz. "strateški materiali" ter oceniti količino neuporabljenih elektronskih naprav, ki se nahajajo v slovenskih gospodinjstvih. Podatki so bili zbrani s spletnim anketnim vprašalnikom, pripravljenim v orodju 1KA. Vprašalnik je obsegal šest vsebinskih sklopov in 28 vprašanj, posredovan pa je bil polnoletnim prebivalcem Republike Slovenije preko družbenih omrežij in drugih spletnih platform. V raziskavi je sodelovalo 309 respondentov. Največ respondentov je bilo starih od 30 do 44 let, najmanj pa je zajemalo starostno skupino nad 60 let. Največ jih je prihajalo iz osrednjeslovenske statistične regije, večina pa je živela v gospodinjstvih s tremi ali štirimi člani.

Rezultati empiričnega dela kažejo, da se v gospodinjstvih najpogosteje nahaja vsaj pet (5) neuporabljenih elektronskih naprav, ki so pogosto shranjene kar v bivalnih prostorih in jih gospodinjstva hranijo približno eno do tri leta. Med najpogostejšimi napravami so mobilni telefoni, pralni stroji, baterije, LED-svetilke, trdi diski in televizorji. Kot najpomembnejši dejavnik, ki bi respondente spodbudil k recikliranju e-odpadkov, se je pokazal enostavnejši dostop do zbiralnic, vključno z možnostjo prevzema odpadkov na domu. Respondenti se močno strinjajo tudi s trditvijo o pomenu recikliranja e-odpadkov za varovanje okolja, pri čemer bi finančna spodbuda po njihovem mnenju dodatno povečala verjetnost oddaje e-odpadkov na zbirna mesta. Čeprav respondenti svoje poznavanje recikliranja e-odpadkov ocenjujejo kot povprečno, rezultati kažejo na razmeroma dobro prepoznavanje pojmov "redke zemlje" in "kritični materiali" v industriji. Pri pridobivanju informacij imajo pomembno vlogo poklicno okolje, pogovori z družino, prijatelji in znanci ter spletni mediji. Hkrati respondenti menijo, da bi morala država nameniti več pozornosti ozaveščanju javnosti o e-odpadkih, kritičnih oz. strateških materialih. Recikliranje kritičnih materialov, vključno z elementi redkih zemelj, ocenjujejo kot zelo pomembno za Slovenijo in Evropsko unijo.



Ugotovitve kažejo, da slovenska gospodinjstva predstavljajo potencialno pomemben vir naprav za urbano rudarjenje, čeprav dejanski materialni potencial zahteva nadaljnjo kvantitativno analizo sestave in količin zbranih e-odpadkov. E-odpadki niso zgolj okoljski problem, temveč predstavljajo sekundarni vir surovin, ki lahko prispeva k zmanjševanju odvisnosti od primarnih virov in večji surovinski odpornosti Slovenije in Evropske unije. Raziskava hkrati izpostavlja pomen vključevanja prebivalstva in občanske znanosti pri prepoznavanju, evidentiranju in učinkovitejšem usmerjanju e-odpadkov v reciklažne tokove. Ocenjeno je bilo, da bo v prihodnje tematiki urbanega rudarjenja in ravnanja z e-odpadki potrebno nameniti še več pozornosti, tako z vidika sistemskega upravljanja e-odpadkov kot tudi z vidika ozaveščanja in vključevanja prebivalstva. Krepitev znanja, izboljševanje dostopnosti zbirnih sistemov ter spodbujanje aktivnega sodelovanja gospodinjstev bodo ključni za učinkovitejše izkoriščanje sekundarnih virov in dolgoročno zagotavljanje strateških surovin za širši geografski prostor.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnih programov P1-0045 in P2-0348 ter projekta občanske znanosti O1-0327 *Opolnomočenje skupnosti: širjenje državljanske znanosti za trajnostno upravljanje z elementi redkih zemelj*, ki jih financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

Viri

Babnik, Ž., Zbačnik, V., Kastivnik, J., Ponikvar-Svet, M., Lap, P., Abina, A., Zidanšek, A., Tavčar, G., & Jeran, M. (2026). From household appliances to medical devices: The role of rare earth elements in modern technology. V V. Kralj-Iglič, Y. Istileulova, & A. Romolo (Ur.), *Socratic lectures: 14th international symposium, Ljubljana, 17. april, 2026: Peer reviewed proceedings, Part IV* (str. 117). University of Ljubljana Press. https://ebooks.uni-lj.si/ZalozbaUL/catalog/view/946/1418/13458

Jeran, M., & Tavčar, G. (2025). Rare earth elements in sustainable development and biomaterials for biological applications and as a challenge for education. V V. Kralj-Iglič, A. Romolo, & Y. Istileulova (Ur.), *Socratic lectures: 12th international symposium, Ljubljana, 11. januar, 2025: Peer reviewed proceedings, Part I* (str. 148). University of Ljubljana Press. https://ebooks.uni-lj.si/ZalozbaUL/catalog/view/723/1104/11303

Zbačnik, V., Babnik, Ž., Kastivnik, J., Ponikvar-Svet, M., Lap, P., Tavčar, G., & Jeran, M. (2026). *What is hidden in e-waste: Potential recycling opportunities*. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.20049966

PRISPEVKI

sekcijskih predavanj



Ocena potenciala e-odpadkov kot vira elementov redkih zemelj in strateških kovinskih surovin v okviru občanske znanosti

Žiga Babnik[1,2], Vita Zbačnik[1,2], Jasna Kastivnik[3], Patricija Lap[2], Maja Ponikvar–Svet[2], Gašper Tavčar[2], Jeran Marko[2,*]

[1] Biotehniški izobraževalni center, Gimnazija in veterinarska šola, Ljubljana
[2] Institut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana
[3] OreTech, Vrhnika, Slovenija

**e-mail: ziga.babnik2009@gmail.com; vita.zbacnik@gmail.com; marko.jeran@ijs.si*

Povzetek

Redke zemlje (REE) pridobivajo vse večji pomen zaradi njihove široke in naraščajoče uporabe na različnih področjih, med drugim v elektroniki, energetiki in medicini. Zaradi naraščajočega povpraševanja in omejenih naravnih virov je iskanje alternativnih virov REE ključnega pomena. Recikliranje električne in elektronske opreme (e-odpadkov) predstavlja pomembno možnost za pridobivanje REE iz sekundarnih virov ter lahko prispeva k zmanjšanju potrebe po njihovem pridobivanju iz primarnih mineralnih virov.

V nadaljnjih aktivnostih bo izvedena ocena vsebnosti REE v različnih vrstah e-odpadkov z namenom primerjave njihovega potenciala kot sekundarnih virov teh elementov. Rezultati bodo omogočili opredelitev vrst e-odpadkov, ki bi lahko bile z vidika vsebnosti REE primerne za nadaljnjo obravnavo v procesih recikliranja. Prednostna obravnava odpadkov z višjo vsebnostjo REE bi lahko prispevala k učinkovitejšemu recikliranju, boljšemu izkoriščanju sekundarnih surovin ter zmanjšanju pritiska na primarne vire. Pomembno vlogo pri tem ima tudi občanska znanost, saj omogoča vključevanje širše javnosti v zbiranje e-odpadkov, ozaveščanje o njihovi sestavi in okoljskih vplivih ter spodbujanje odgovornega ravnanja z električno in elektronsko opremo. Povezovanje znanstvenega raziskovanja z dejavnostmi občanske znanosti tako predstavlja priložnost za povečanje ozaveščenosti o pomenu REE, recikliranja in trajnostnega ravnanja z naravnimi viri.

Ključne besede: elementi redkih zemelj (REE), e-odpadki, reciklacija, primarni viri, občanska znanost

Uvod

Skupino kovin, znanih kot elementi redkih zemelj (REE), sestavljajo elementi t. i. lantanoidne vrste. Mednje uvrščamo lantan (La), cerij (Ce), prazeodim (Pr), neodim (Nd), prometij (Pm), samarij (Sm), evropij (Eu), gadolinij (Gd), terbij (Tb), disprozij (Dy), holmij (Ho), erbij (Er), tulij (Tm), iterbij (Yb) in lutecij (Lu). Poleg omenjenih v to skupino uvrščamo še itrij (Y) in skandij (Sc) (Zbačnik idr., 2026).

Med glavne tipe nahajališč elementov redkih zemelj uvrščamo nahajališča, povezana s karbonatiti ter alkalnimi in peralkalnimi magmatskimi kamninami, nahajališča z mehansko nakopičenimi težkimi minerali, predvsem monazitom in ksenotimom (placerji), ter ionsko-adsorpcijska nahajališča v glinastih preperinah, v katerih so ioni redkih zemelj adsorbirani na površinah mineralov glin (Zbačnik idr., 2026).

Hitra širitev visokotehnoloških industrij, zlasti na področju pridobivanja in shranjevanja energije ter elektronskih informacijskih tehnologij, je povzročila povečano svetovno povpraševanje po

elementih redkih zemelj, ki predstavljajo ključne surovine za te in številne druge industrijske panoge. Podatki kažejo, da se je svetovna proizvodnja mineralnih surovin z elementi redkih zemelj, ki vključuje rudarjenje, taljenje in njihovo nadaljnjo uporabo, povečala s 124.000 ton v letu 2015 na 390.000 ton v letu 2024, kar predstavlja 214-odstotno povečanje v zadnjem desetletju. Obsežno rudarjenje, predelava in industrijska uporaba elementov redkih zemelj pomembno vplivajo na njihov biogeokemijski cikel ter povzročajo njihovo kopičenje v ozračju, vodi, tleh in živih organizmih. Glede na nadaljnjo rast rudarjenja, predelave in uporabe elementov redkih zemelj zahtevata naraščajoča koncentracija teh elementov v urbanih okoljih ter njihovi morebitni vplivi na zdravje posebno in pravočasno pozornost (Ma in Wu, 2025).

Elementi redkih zemelj in e-odpadki v gospodinjstvih

Tabela 1 prikazuje izbrane elektronske in električne naprave, pri katerih je bila ugotovljena prisotnost REE, skupaj z ocenjenimi vsebnostmi ter z njimi povezanimi ekotoksikološkimi vidiki. Primerjava različnih virov omogoča vpogled v raznolikost vsebnosti REE in potencialne okoljske vplive, povezane z njihovo uporabo, ravnanjem z odpadki in neustreznim odstranjevanjem. Podatki hkrati poudarjajo pomen ustreznega ravnanja z odsluženo električno in elektronsko opremo ter možnosti pridobivanja REE iz sekundarnih virov.

Tabela 1: Viri elementov redkih zemelj v e-odpadkih.

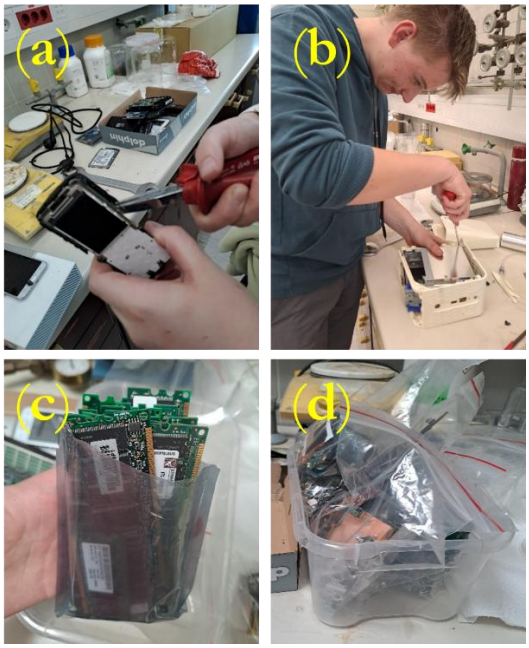
Vir	Prisotnost REE	Ekotoksikološke informacije	Literaturni citat
Pametni telefoni (Android/ iOS)	Nd, Pr, Dy, Y, Eu, Tb (skupno): 0,02–0,08 %	Neformalno recikliranje lahko povzroči sproščanje REE in z njimi povezanih kovin (Pb, Cu, Sb), kar prispeva k onesnaženju tal in podzemne vode. Velik obseg menjave elektronskih naprav povečuje globalno količino elektronskih odpadkov.	Balaram, 2019; Robinson, 2009; Forti idr., 2020
Telefon na tipke	Nd, Pr, Y, Eu (skupno): 0.005–0.02%	Manjša vsebnost oz. uporaba REE; vendar lahko neustrezno odlaganje povzroči sproščanje nevarnih kovin, ki škodljivo vplivajo na okolje in zdravje ljudi.	Robinson, 2009; Forti idr., 2020
E-skiro	Nd, Pr, Dy (skupno): 0,2–0,8%	Kombinirani odpadki baterij in magnetov povečujejo okoljsko tveganje ter zahtevnost recikliranja, hkrati pa predstavljajo pomemben potencial za pridobivanje sekundarnih surovin iz urbanih virov.	Binnemans idr., 2013; Gaines, 2014; International energy agency, 2021

Dron	Nd, Pr, Dy (skupno): 0,3–1,2 %	Visoka vsebnost REE na enoto mase; naraščajoče povpraševanje povečuje pritisk na dobavne verige in vplive pridobivanja na okolje.	Binnemans idr., 2013; International energy agency, 2021
Mikrovalovna pečica	Nd, Ce, La (skupno): 0,01–0,05%	Zmeren delež v skupni količini elektronskih odpadkov; vpliv na okolje je predvsem posledica neustreznega odlaganja in kopičenja.	Balaram, 2019; Robinson, 2009
Trdi disk (HDD)	2.500–15.000 ppm Nd, Dy in Pr skupaj	Vsebuje sledove svinca, ki lahko povzroča nevrološke okvare, in kadmija, ki je rakotvoren.	Liang idr., 2024; Chesapeake paper systems, b. d.; Lenntech, b. d.–a; Lenntech, b. d.–b
Fluorescentna svetilka	1.000–20.000 ppm Y, Eu, Ce, Tb ali La	Vsebuje živo srebro v obliki hlapov, ki vpliva na živčni sistem in ledvice ter je tudi teratogeno.	Liang idr., 2024; Viana idr., 2022; Lenntech, b. d.–c
Televizija	Skupna vsebnost Y, Eu in Tb: 10–100 ppm	Vsebuje svinec, ki lahko povzroča nevrološke okvare, kadmij, ki je rakotvoren, in arzen, ki lahko povzroča spremembe v DNK živali.	Liang et al., 2024; Sunada recycling, 2025; Lenntech, b. d.–a; Lenntech, b. d.–b; Lenntech, b. d.–d

Vključevanje občanske znanosti v zbiranje in obdelavo e-odpadkov

Za potrebe raziskovalnega projekta je bila v okviru *Gimnazije in veterinarske šole* Biotehniškega izobraževalnega centra (BIC) Ljubljana izvedena kampanja zbiranja odslužene električne in elektronske opreme. Dijaki in zaposleni so bili pozvani, naj prispevajo odslužene elektronske naprave iz svojih gospodinjstev. Kampanja je potekala od 27. 3. do 3. 4. 2026. V okviru kampanje so bili zbrani različni tipi e-odpadkov, med katerimi so prevladovali pametni telefoni, telefoni na tipke, trdi diski, pomnilniški moduli RAM, predvajalniki CD/DVD ter prenosne baterije.

Zbrane naprave so bile najprej ročno razstavljene z namenom izolacije posameznih komponent, pri katerih je pričakovana prisotnost REE (**Slika 1**). Pri razstavljanju so bila odstranjena plastična in kovinska ohišja ter drugi elementi, ki niso bili relevantni za nadaljnjo analizo. Pri delu so bila uporabljena različna ročna orodja, predvsem izvijači, klešče in viličasti ključi. Po razstavljanju so bile komponente razvrščene glede na izvorno vrsto elektronske naprave. Telefoni na tipke in pametni telefoni so bili združeni v skupno kategorijo, medtem ko so bili trdi diski, pomnilniški moduli RAM ter komponente CD/DVD–predvajalnikov razvrščeni v ločene kategorije. Takšen način sortiranja je omogočil sistematično obravnavo posameznih skupin e-odpadkov in nadaljnjo identifikacijo komponent, ki so potencialni viri REE. V okviru kampanje je bilo zbranih skupno 42 kosov električne in elektronske opreme, in sicer 3 telefoni na tipke, 15 novejših pametnih telefonov, 15 pomnilniških modulov RAM, 8 zunanjih trdih diskov ter 1 predvajalnik CD/DVD.



Slika 1: Separacija komponent e-odpadkov: (a)–(b) odstranjevanje ohišij in drugih delov, ki ne vsebujejo REE; (c)–(d) sortiranje komponent glede na izvorno vrsto e-odpadkov.

Zaključek

Z digitalizacijo razvitega sveta in napredkom novih medicinskih tehnologij se redke zemlje (REE) danes uvrščajo med strateške kovine svetovnega gospodarstva. Njihova uporaba je zato vse bolj pomembna na različnih področjih, od inženirstva do medicine. V medicini so postale nepogrešljive pri številnih postopkih molekularnega slikanja in radioterapije, medtem ko se v interdisciplinarni znanosti vse pogosteje obravnavajo v kontekstu recikliranja in ponovne uporabe kot dela prehoda v krožno gospodarstvo.

Za učinkovite in odgovorne postopke (pred)recikliranja je ključno podrobno poznavanje kemijske sestave materialov, ki vsebujejo REE. Poleg tehničnih vidikov je potrebno tudi širše razumevanje njihovih vplivov na okolje in družbo. V tem kontekstu ima pomembno vlogo občanska znanost, saj prispeva k vključevanju in ozaveščanju javnosti na več ravneh: od varne uporabe in poznavanja sestave izdelkov do praks recikliranja ter sistemov za varno ravnanje, odstranjevanje in razumevanje vplivov na žive organizme. Znanost ima zato odgovornost zagotavljati odgovore, ki zajemajo celoten ekosistem in družbeni spekter, ter tako omogočati razvoj varne in dobro obveščene družbe, temelječe na odgovornem ravnanju z viri.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru temeljnega raziskovalnega programa *P1-0045* in projekta občanske znanosti *O1-0327 Opolnomočenje skupnosti: širjenje državljanske znanosti za trajnostno upravljanje z elementi redkih zemelj*, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

Literatura

Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers, 10*(4), 1285–1303. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., & Yang, Y. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production, 51*, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037

Chesapeake Paper Systems. (b. d.). *The hidden dangers of DIY hard drive destruction*. https://chespaper.com/the-hidden-dangers-of-diy-hard-drive-destruction/

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential*. United Nations University/United Nations Institute for Training and Research, International Telecommunication Union, & International Solid Waste Association. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf

Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies, 1–2*, 2–7. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.10.001

International Energy Agency. (2021, 5. maj). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

Lenntech. (b. d.–a). *Lead – Pb: Chemical properties of lead – Health effects of lead – Environmental effects of lead*. https://www.lenntech.com/periodic/elements/pb.htm

Lenntech. (b. d.–b). *Cadmium – Cd: Chemical properties of cadmium – Health effects of cadmium – Environmental effects of cadmium*. https://www.lenntech.com/periodic/elements/cd.htm

Lenntech. (b. d.–c). *Mercury – Hg: Chemical properties of mercury – Health effects of mercury – Environmental effects of mercury*. https://www.lenntech.com/periodic/elements/hg.htm

Lenntech. (b. d.–d). *Arsenic – As: Chemical properties of arsenic – Health effects of arsenic – Environmental effects of arsenic*. https://www.lenntech.com/periodic/elements/as.htm

Liang, B., Gu, J., Zeng, X., Yuan, W., Rao, M., Xiao, B., & Hu, H. (2024). A review of the occurrence and recovery of rare earth elements from electronic waste. *Molecules, 29*(19), 4624. https://doi.org/10.3390/molecules29194624

Ma, J., & Wu, F. (2025). Urban impact of rare earth elements. *Science, 390*(6774), 684. https://doi.org/10.1126/science.aeb7692

Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment, 408*(2), 183–191. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044

Sunada Recycling. (2025, 1. maj). *Is your TV hurting the environment? Here's what you need to know*. https://www.sunadarecycling.com/blog/old-tvs-and-environment-concerns

Viana, L. N., Soares, A. P. S., Guimarães, D. L., Sandoval Rojano, W. J., & Saint'Pierre, T. D. (2022). Fluorescent lamps: A review on environmental concerns and current recycling perspectives highlighting Hg and rare earth elements. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 10*(6), 108915. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108915

Zbačnik, V., Babnik, Ž., Kastivnik, J., Ponikvar-Svet, M., Lap, P., Tavčar, G., & Jeran, M. (2026). *What is hidden in e-waste: Potential recycling opportunities*. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.20049966



Recikliranje kritičnih surovin

Davor Bokal[1], Drago Bokal[2,3], Petra Škofic Valjavec[1]

[1] OŠ Vižmarje–Brod, Ljubljana
[2] Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor
[3] DataBitLab, Laboratorij za podatkovno analitiko in poslovno svetovanje, Maribor

**e-mail: davor@bokal.net; petra.skofic2@guest.arnes.si*

Povzetek

Prispevek obravnava pomen recikliranja kritičnih surovin v kontekstu ciljev EU, ki do leta 2030 načrtuje pridobivanje četrtine teh surovin iz recikliranih izdelkov. V elektronskih izdelkih je večja koncentracija uporabnih kovin kot v njihovih rudah. Za reciklažo se porabi precej manj energije, kot za izkopavanje in rafiniranje rud, zato je tudi okolju prijazna, nastaja tudi manj odpadkov. Analiza literature razkriva izrazito pomanjkanje slovenskih virov o kritičnih surovinah. S pomočjo UNESCO metodologije predvidenih prihodnosti opredelimo ključne pogoje za vzpostavitev učinkovite reciklažne infrastrukture.

Raziskava med mladimi je pokazala, da gospodinjstva z otroki povprečno hranijo 6,25 kosov starih elektronskih naprav, kar npr. na ravni države predstavlja več kot 2,5 milijona potencialnih virov kritičnih surovin. V sodelovanju s podjetjem BLOK d.o.o. so bili analizirani postopki fizične reciklaže, kar potrjuje, da je kemijska reciklaža v Sloveniji še v začetni fazi. Predstavljeni so tudi osnovni redoks procesi ločevanja litija, bakra in kobalta, ki ponazarjajo kemijsko jedro recikliranja baterijskih materialov.

Rezultati poudarjajo dvojno potrebo: razvoj reciklažnih tehnologij ter približevanje kemije mladim generacijam, saj je razumevanje materialnih tokov ključno za doseganje zelenega prehoda. Prispevek tako združuje tehnološke, izobraževalne in družbene vidike ter izpostavlja velik neizkoriščen potencial za krožno gospodarstvo v Sloveniji.

Ključne besede: kritične surovine, recikliranje, zeleni prehod, mladi, izobraževanje

Uvod

V tem prispevku si bomo pogledali, zakaj je recikliranje pomembno in kako sploh poteka. Evropska Unija (EU) želi do leta 2030 pridobiti približno četrtino kritičnih surovin iz recikliranih izdelkov, saj je v njih koncentracija teh surovin veliko večja kot v rudi (Evropski parlament & Svet Evropske unije, 2024).

Zakaj so te surovine sploh kritične? Ne zato, ker bi jih bilo malo, ampak zato, ker jih uporabljamo skoraj povsod – od elektronskih vezij do močnih magnetov – in smo zato od njih zelo odvisni.

Zaradi uresničevanja cilja EU bomo postali manj odvisni od drugih držav z veliko redkimi surovinami (Manfreda, 2015).

Redke surovine so dandanes sestavina številnih izdelkov od telefonov, računalnikov do gospodinjskih aparatov, zato ni čudno, da si velike države (Kitajska, Brazilija, ZDA, Demokratična republika Kongo) prizadevajo pridobiti čim več rudnikov (Evropska komisija, b. d.). Rudarjenje surovin zelo onesnažuje okolje. Ker si svet prizadeva za zeleni prehod, se iščejo tudi boljši načini pridobivanja teh surovin. Eden od teh je recikliranje. Recikliranje redkih surovin je boljše od



rudarjenja novih, saj je koncentracija kritičnih surovin v izdelkih veliko večja kot v rudi. Poleg tega lahko iz izdelkov izločimo točno tiste snovi, ki jih potrebujemo, zato nam ni treba porabiti dodatne energije in onesnaževati za njihovo ponovno izdelavo. *Primer*: v magnetih je 267 g/kg neodima, medtem, ko je v rudi le od 4 do 6 g/kg.

Metode dela

V tem prispevku bomo uporabili tri metode: pismenost o predvidenih prihodnostih (*angl.* Futures Literacy & Foresight), iskanje virov in raziskavo med ciljno publiko. Poznamo tri vrste prihodnosti (UNESCO, 2023):

- pričakovano,
- drugačno in
- želeno.

Pričakovana prihodnost je tista, ki se bo zgodila, če se nič ne spremeni. Drugačna prihodnost je tista, ki se bo zgodila, če se nekaj spremeni. Želena prihodnost je pa tista, ki si jo želimo, da se zgodi (UNESCO, 2023).

Pri pisanju prispevka smo na začetku poskusili najti vire sami. Hitro smo ugotovili, da je naloga zahtevna, zato smo za iskanje virov uporabili umetno inteligenco (UI). Našli smo le tri strokovne vire, ki so bili zaključna dela univerzitetne stopnje (Manfreda, 2015; Logar, 2016; Kac, 2014). Ostali viri so bili poljudni ali pravni dokumenti, ki so zgolj omenjali kritične surovine. Zato je res pomembno razširiti slovensko literaturo o kritičnih surovinah. Simpozij bo pri tem zelo pomagal, saj zbere veliko ljudi, da začnejo poročati in pisati o tovrstni tematiki.

Pomembno je, da kemijo približamo učencem. Če ne bo naslednjih generacij, ki bodo razumele in obvladale izzive občanske znanosti na temo kritičnih surovin, se razvoj ciljev EU ne bo nadaljeval in uresničil. Primer dobre prakse navduševanja mladih nad kemijo je aktivnost *Šole eksperimentalne kemije*, ki se izvaja že več kot 30 let izvaja v okviru Instituta "Jožef Stefan" ter učencem in dijakom približuje kemijo skozi praktične poskuse in prakse (Tramšek idr., 2022).

Ker je bilo od začetka šolskega leta do roka oddaje na voljo manj kot teden dni, smo med sošolci izvedli le preprosto anketo o številu starih elektronskih naprav, primernih za recikliranje.

Rezultati

Rezultate vseh treh metod bomo predstavili v naslednjih podrazdelkih. Začnemo s ciljem prihodnost.

Vizija boljših prihodnosti

Predstavljajmo si, kakšno leto 2060 si želimo. Glede na sedanje trende lahko sklepamo, da se bo svet razvijal v smeri zelenega prehoda: električni avtomobili bodo vse bolj pogosti, od nafte pa ne bomo več tako odvisni. Takšna prihodnost se sliši privlačno, verjetno bi se zaradi teh ukrepov tudi zmanjšalo segrevanje podnebja. Ali bi jo lahko še izboljšali? Morda – zato recimo, da je to naša želena prihodnost. *Kaj pa se mora zgoditi, da takšna prihodnost sploh nastane?* Poskusimo razmišljati od konca proti začetku. Če želimo tak svet, moramo razviti infrastrukturo za reciklažo kritičnih surovin, da bomo lahko hitreje in učinkoviteje pridobivali tudi materiale, ki bodo nadomestili fosilna goriva. Da bo ta infrastruktura delovala, moramo zbirati izrabljeno elektroniko, kot so litijeve baterije, telefoni in druge naprave. Za njen razvoj pa moramo najprej dobro poznati načine



reciklaže. Izgradnja takšne infrastrukture zahteva veliko finančnih sredstev; v EU je ta podpora skoraj zagotovljena, v drugih državah pa ni tako zanesljiva. Poleg tega potrebujemo delavce, ki bodo nadzorovali procese reciklaže, prevažali odpadke v in iz tovarn ter reciklirane materiale dostavljali proizvodnji, ki jih potrebuje.

Zdaj vemo, kaj moramo narediti za uspešno reciklažo na industrijskem nivoju. Tako razmišljajo tudi odločevalci, zato si poglejmo, kakšne strategije vpeljujejo. Strategija EU veleva, da bi bilo do leta 2030 četrtina kritičnih surovin za proizvodnjo recikliranih. To je želena prihodnost. Pričakovana prihodnost je, da bomo še naprej kopali nove surovine, stare naprave pa zavrgli. Drugačna prihodnost je lahko kakršnakoli, samo ne taka kot je pričakovana.

Če želimo ustvarjati boljšo prihodnost, moramo predvsem paziti na dve stvari. Prva je, da ohranjamo okolje za naslednje generacije, da se bodo lahko razvijale, ne pa popravljale naših napak. Druga pa je, da med državami ne pride do konfliktov med želenimi prihodnostmi, saj bi to lahko vodilo do vojn, ki bi se jim lahko izognili, če bi se usedli za mizo, razložili primarne interese in se dogovorili za skupen cilj. Ko bi se dogovorili za skupen cilj, bi morali ugotoviti tudi, kako ga bomo uresničili. Da bi bil ta proces lažji, začnimo pri cilju in pojdimo nazaj do sedanjosti. *Primer*: EU do leta 2030 načrtuje, da bo četrtina kritičnih surovin recikliranih. Kaj se mora uresničiti, da se to zgodi? Najprej moramo postaviti infrastrukturo za recikliranje in ozaveščati ljudi o pomembnosti recikliranja kritičnih surovin.

Da bi izvedeli, kakšne rezultate bi prineslo recikliranje kritičnih surovin, moramo poznati podatek, koliko EU letno porabi za nakup kritičnih surovin in koliko za njihov prevoz. S tem bi ugotovili, koliko naj bi na dolgi rok prihranili. Da dobimo rezultate o onesnaževanju zaradi rudarjenja kritičnih surovin, moramo ugotoviti, koliko energije se porabi za nastanek enega kilograma kovine v obeh primerih, kako daleč se prevaža v obeh primerih in kakšni so stranski produkti procesa pridobivanja. Ko bo EU začela pridobivati četrtino kritičnih surovin za proizvodnjo z reciklažo, se cena ne bo zmanjšala za eno četrtino, ampak se bo pocenila za toliko, kolikor bo prevoz cenejši, saj bo pot surovin krajša. Morda se bo tudi cena surovin znižala, ker bo proces recikliranja cenejši.

Reakcije

Da bomo dosegli boljšo prihodnost, potrebujemo znanje kemije. Na podlagi zbranih virov si oglejmo nekaj enostavnih primerov redoks reakcij litija, bakra in kobalta, saj so te kovine sestavni deli baterij in so ključni za zeleni prehod (Manfreda, 2015).

Največ je govora o litiju, saj je ključen za baterije in s tem tudi za zeleni prehod. Litijeva spojina $LiCoO_2$ se nahaja v baterijah in lahko jo recikliramo v litijev sulfat, Li_2SO_4, ki se uporablja na številnih področjih, med njimi v energetiki (sončne celice), medicini in drugih panogah. Litijev sulfat lahko recikliramo po naslednjem zapisu:

$$2\ LiCoO_2 + 3\ H_2SO_4 + H_2O_2 \rightarrow Li_2SO_4 + 2\ CoSO_4 + 4\ H_2O + O_2.$$

Stranska produkta sta zgolj kisik in voda, zato razen porabe energije ni povzročenega nobenega dodatnega onesnaževanja.

Bakrov sulfat lahko recikliramo s pomočjo železa, ki se spoji z sulfatnim ionom in dobimo čisti baker:

$$Fe + CuSO_4 \rightarrow FeSO_4 + Cu.$$

Železov sulfat, $FeSO_4$, se uporablja za odstranjevanje mahu, tako da je ponovno uporaben. Baker, ki je tudi produkt reakcije, se uporablja v vsej elektroniki.



Kobalt se prav tako uporablja v litijevih baterijah in je zato tudi ključen za zeleni prehod. Njegovo spojino kobaltov sulfat, $CoSO_4$, recikliramo s pomočjo cinka, ki je reaktivnejši v primerjavi kobalta in se zamenja z njim.

$$Zn + CoSO_4 \rightarrow ZnSO_4 + Co.$$

Cinkov sulfat, $ZnSO_4$, ni odpadek – uporaben je v kmetijstvu, industriji in medicini.

Akcija

Kaj pa lahko naredimo že sedaj, da se bo takšna prihodnost res uresničila? Poleg znanja je potrebno tudi konkretno delo. Za začetek lahko pogledamo doma, koliko naprav imamo, ki jih sploh ne uporabljamo več. Sem spadajo telefoni, računalniki, gospodinjski aparati, monitorji in vse druge elektronske naprave. Nato se seznanimo, kje v naši okolici zbirajo elektronske odpadke, in naprave odpeljemo tja. Lahko spodbudimo še prijatelje, znance, da naredijo isto. Poleg tega se lahko povežemo s podjetji, ki zbirajo tovrstne odpadke, in predlagamo, da na šoli organizirajo nekaj podobnega kot zbiranje papirja – tokrat bi zbirali staro elektroniko. Tako bi bilo zbiranje veliko bolj dostopno in bi se v akcijo lahko vključilo več ljudi.

Odpadno elektroniko lahko odpeljemo na zbirna mesta ob trgovinah, ko bodo ta vzpostavljena. Lahko pa jo odpeljemo tudi neposredno do podjetij, kot je na primer BLOK d.o.o. Podjetje se ukvarja z mehansko predelavo odpadne električne in elektronske opreme (OEEO). Z drobljenjem, sortiranjem in senzorskim ločevanjem iz odpadkov pridobivajo različne materialne frakcije. Med njimi so kovine, kot so baker, aluminij in železo, ter frakcije, ki vsebujejo plemenite kovine. Te materiale nato pripravijo za nadaljnjo predelavo v metalurških obratih. Podjetja ZEOS, Interzero, Slopak, Trigana in Recikel zastopajo proizvajalce električnih in elektronskih naprav. V njihovem imenu plačujejo stroške zbiranja, prevoza in recikliranja odpadnih naprav.

Doma imamo en star telefon, en monitor in tri stare računalnike, vse naprave so starejše od 10 let. Povprašal sem tudi sošolce in skupaj s sedmimi sošolci zbral 50 starih elektronskih naprav. V Republiki Sloveniji je bilo leta 2026 registriranih 412.534 gospodinjstev z otroki (Razpotnik & Žnidaršič, 2021). Povprečno število starih naprav pri mojih sošolcih je 6,25. Če predpostavimo, da to velja za vsa gospodinjstva z otroki, dobimo približno 2.578.338 naprav. Podrobnejša raziskava še poteka, načrtovana je med šolskim letom. Poročanje o delu pa načrtujemo tudi v prihodnje.

Stopili smo v stik s podjetjem BLOK d.o.o., ki nas je povabilo, da prinesemo našo staro elektroniko in si ogledamo njihov proces reciklaže; o obisku se na šoli že dogovarjamo. Izvedeli smo, da so trenutno edino podjetje v Sloveniji, ki izpolnjuje standard WEEELABEX (b. d.). To jim omogoča sodelovanje v evropskih verigah reciklaže, sprejemanje zahtevnejših tokov odpadkov in zagotavljanje, da se kritične surovine (npr. kobalt, litij, nikelj) resnično vrnejo v krožno gospodarstvo. Učence, starejše od 15 let, ki jih področje zanima, so povabili na poletno delo pri ročnem sortiranju delov elektronike. Za sodelovanje v kasnejših fazah reciklaže je potrebno posebno usposabljanje in certifikat za rokovanje z nevarnimi snovmi. Kljub temu je že samo ročno sortiranje dragocena izkušnja, saj omogoča vpogled v to, do katere mere je mogoče naprave razstaviti ter kje se začnejo kemijsko metalurški procesi.

Zaključek

Recikliranje je ključno za napredek industrije in tehnologije v smeri zelenega prehoda, saj za predelavo sekundarnih surovin porabimo bistveno manj energije kot za rudarjenje in rafiniranje novih. Na primer, za recikliranje litija se lahko porabi tudi do štirikrat manj energije. Poleg tega



izkopavanje novih surovin onesnažuje zrak in pitno vodo, ki jo ljudje v bližini rudnikov vsakodnevno uporabljajo.

Kemijo je zato nujno približati učencem, saj je temeljni del razvoja zelenega prehoda in številnih drugih sodobnih tehnologij. Eden od učinkovitih načinov za doseganje tega cilja je *Šola eksperimentalne kemije*, ki že štiriintrideset let spodbuja učence in dijake ter jim pomaga poglobiti znanje kemije skozi praktične eksperimente. K širjenju in poglabljanju znanja kemije med mladimi bo prispeval tudi omenjen simpozij. Med iskanjem podatkov o kritičnih surovinah smo namreč ugotovili, da je v slovenščini na voljo zelo malo gradiva. Zato bo simpozij pomembno prispeval k širjenju znanja o strateških surovinah tudi med učenci, ki se dogodka ne bodo neposredno udeležili.

Pomembno je, da ciljev zelenega prehoda ne razumemo kot oddaljene obljube, ki jih daje vlada, temveč kot vprašanje, kaj lahko naredim jaz – kaj lahko naredim že danes. Ni nujno, da kot posamezniki vložimo veliko časa; dovolj je že manj kot pol ure, da premislimo, kaj lahko spremenimo. Poglejmo doma in razmislimo, kaj bomo naredili s starimi elektronskimi napravami, telefoni, računalniki, tablicami, gospodinjskimi aparati in drugo elektroniko. Takšnih idej ne smemo obdržati le zase: spodbudimo prijatelje, sorodnike, znance in druge, saj bomo s tem prispevali k večji samozadostnosti EU na področju kritičnih surovin.

Literatura

Evropska komisija, Skupno raziskovalno središče. (b. d.). *Raw Materials Information System (RMIS)*. Pridobljeno 30. avgusta 2026 s https://rmis.jrc.ec.europa.eu/

Evropski parlament & Svet Evropske unije. (2024). *Uredba (EU) 2024/1252 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 11. aprila 2024 o vzpostavitvi okvira za zagotavljanje varne in trajnostne oskrbe s kritičnimi surovinami ter spremembi uredb (EU) št. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 in (EU) 2019/1020*. Pravno-informacijski sistem Republike Slovenije (PISRS). https://pisrs.si/pregledPredpisaEU?celex=32024R1252

Gospodarska zbornica Slovenije, Zbornica elektroindustrije. (2025, 23. april). *ZELEKTRO: Ogled reciklaže OEEO v podjetju BLOK d.o.o.* Pridobljeno 31. avgusta 2026 s https://www.gzs.si/Dogodki/23-04-2025/zelektro-ogled-reciklaze-oeeo-v-podjetju-blok-doo

Kac, E. (2014). *Redke zemlje in njihov vpliv na napredne tehnologije, mednarodno trgovino in logistiko* [Magistrsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za logistiko]. Digitalni knjižnični repozitorij Univerze v Mariboru (DKUM). https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=44713

Logar, B. (2016). *Vsebnost redkih zemelj (REE) v morskih sedimentih Koprskega zaliva* [Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta]. Repozitorij Univerze v Ljubljani. https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=87837

Manfreda, I. (2015). *Pridobivanje in uporaba redkih zemelj* [Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko]. Repozitorij Univerze v Ljubljani. https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=73457

Razpotnik, B., & Žnidaršič, M. (2021, 25. november). *Gospodinjstva in družine, Slovenija, 1. januar 2021*. Statistični urad Republike Slovenije. Pridobljeno 31. avgusta 2026 s https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/9973

Tramšek, M., Gruden, E., & Jeran, M. (2022). Trideset let delovanja Šole eksperimentalne kemije na Institutu »Jožef Stefan«: Trideset let motiviranja mladih generacij in utrjevanja poti naravoslovnega izobraževanja. *Acta Chimica Slovenica, 69*(4), S95–S97. https://doi.org/10.17344/acsi.2022.7868

UNESCO. (2023). *Futures literacy & foresight: Using futures to prepare, plan, and innovate*. https://www.unesco.org/en/futures-literacy/resources

WEEELABEX. (b. d.). *WEEELABEX documents in English*. Pridobljeno 2. septembra 2026 s https://www.weeelabex.org/documents/weeelabex-documents-in-english/



Kritične surovine in človekove pravice: vpliv svetovnih dobavnih verig na kršenje človekovih pravic

Klara Ferlič[1], Ana Rotovnik Omerzu[1]

[1] Gimnazija Celje – Center, Celje

**e-mail: klara.ferlic@gmail.com; ana.rotovnik.omerzu@gcc.si*

Povzetek

Kritične surovine so nujne za razvoj sodobnih tehnologij in zeleni prehod, Evropska unija pa je pri številnih od njih odvisna od uvoza. Prispevek obravnava povezavo med pridobivanjem kritičnih surovin in tveganji za kršitve človekovih ter delavskih pravic. Posebna pozornost je namenjena kobaltu iz Demokratične republike Kongo, kjer različni viri opozarjajo na otroško delo, nevarne delovne razmere in druge socialne posledice rudarjenja. Na podlagi strokovnih in znanstvenih virov je predstavljena tudi odgovornost Evropske unije in podjetij pri oblikovanju bolj etičnih dobavnih verig. Ugotavljam, da zeleni in digitalni prehod ne moreta biti zares trajnostna, če se pri pridobivanju surovin ne upoštevajo tudi človekove in delavske pravice.

Ključne besede: kritične surovine, kobalt, človekove pravice, dobavne verige, Demokratična republika Kongo

Uvod

Kritične surovine, kot so litij, kobalt, nikelj, antimon, magnezij, platina in tantal, so ključnega pomena za razvoj gospodarstva v Evropski uniji ter predstavljajo nepogrešljivo sestavino sodobnih tehnologij. Uporabljajo se v številnih elektronskih in drugih tehnoloških sistemih, zato se z digitalizacijo in zelenim prehodom povečuje povpraševanje po njih (European Commission, 2020). Med pomembnimi dejavniki naraščajočega povpraševanja so digitalizacija, industrializacija, zeleni prehod, omejena razpoložljivost gospodarsko pomembnih nahajališč v Evropi ter rast prebivalstva in življenjskega standarda. Evropska unija zato pri številnih kritičnih surovinah ostaja močno odvisna od uvoza iz tretjih držav, med drugim iz Kitajske, Demokratične republike Kongo, Turčije, ZDA in Čila (Blengini idr., 2020). Pridobivanje surovin v državah izvoznicah pa je lahko povezano z resnimi socialnimi in okoljskimi tveganji, vključno s kršitvami človekovih in delavskih pravic (European Parliament, 2023). Te razmere vse pogosteje sprožajo razprave o etičnosti uvoza kritičnih surovin in odgovornosti akterjev v globalnih dobavnih verigah.

V prispevku bom s pomočjo strokovnih in znanstvenih virov raziskala, kako je evropsko povpraševanje po kritičnih surovinah povezano s tveganji za kršitve človekovih pravic v državah, kjer te surovine pridobivajo. Na primeru Demokratične republike Kongo bom predstavila nekatere težave pri pridobivanju kobalta ter razmislila, kakšno odgovornost imajo pri oblikovanju bolj etičnih dobavnih verig Evropska unija in podjetja.

Kritične surovine in njihov pomen

Evropska komisija kritične surovine opredeljuje kot surovine z velikim gospodarskim pomenom za EU in hkrati visokim tveganjem pri oskrbi (Blengini idr., 2020). Dobavne verige teh surovin so ključne za različne industrijske ekosisteme in sodobne tehnologije, močno pa so povezane tudi z



zelenim prehodom, saj so številne mineralne surovine nujne za proizvodnjo sončnih celic, električnih vozil in vetrnih turbin (International Energy Agency, 2021). Prva ocena kritičnih surovin EU je bila objavljena leta 2011 in je opredelila 14 kritičnih surovin (Blengini idr., 2020). Evropska politika na tem področju se je pozneje še okrepila; Uredba (EU) 2024/1252 danes vzpostavlja okvir za varno, odporno in trajnostno oskrbo Evropske unije s kritičnimi surovinami (European Parliament & Council of the European Union, 2024b). Povpraševanje po mineralnih surovinah za tehnologije čiste energije bo po scenarijih Mednarodne agencije za energijo (IEA) močno naraščalo; v scenariju STEPS se do leta 2040 približno podvoji, v scenariju SDS pa približno početveri (IEA, 2021).

Delovno pravo, kršenje temeljnih človekovih in delovskih pravic

Različni državni sistemi in zakonodaje na področju delovnega prava določajo pravila glede plačil, delovnega časa, delovnih pogodb, socialnih in zdravstvenih pravic ter zaščite delavcev. Njihovo dejansko spoštovanje je odvisno tudi od učinkovitosti nadzornih in institucionalnih mehanizmov posameznih držav. Digitalizacija in zeleni prehod povečujeta potrebe po kritičnih surovinah, Evropska unija pa ostaja močno odvisna od njihovega uvoza. Evropski parlament opozarja, da so ekstraktivne industrije v državah v razvoju lahko povezane s prisilnim in otroškim delom, kršitvami pravic lokalnih in avtohtonih skupnosti ter drugimi socialnimi in okoljskimi posledicami (European Parliament, 2023).

Pritisk na zniževanje stroškov v globalnih dobavnih verigah lahko v okoljih s šibkimi institucijami povečuje tveganje za izkoriščanje delavcev. Pri tem je pomembno razlikovati med splošnimi neustreznimi delovnimi pogoji in prisilnim delom. Po najnovejših globalnih ocenah Mednarodne organizacije dela, organizacije Walk Free in Mednarodne organizacije za migracije je bilo leta 2021 v prisilno delo vključenih približno 27,6 milijona ljudi, med njimi 3,3 milijona otrok (International Labour Organization, Walk Free, & International Organization for Migration, 2022). Gre za svetovno oceno vseh oblik prisilnega dela, zato je ni mogoče neposredno enačiti s prisilnim delom v rudarski industriji ali v državah izvoznicah kritičnih surovin.

Čeprav so temeljne človekove in delavske pravice mednarodno priznane, se njihovo pravno varstvo in dejansko uresničevanje med državami razlikujeta. Mednarodna organizacija dela (ILO) opredeljuje pet temeljnih kategorij načel in pravic pri delu: svobodo združevanja in učinkovito priznanje pravice do kolektivnega pogajanja, odpravo vseh oblik prisilnega ali obveznega dela, učinkovito odpravo otroškega dela, odpravo diskriminacije pri zaposlovanju in delu ter varno in zdravo delovno okolje (ILO, 2022). Povečano povpraševanje po kritičnih surovinah zato ni le gospodarsko vprašanje, ampak lahko pomeni tudi večji pritisk na delovno silo in lokalne skupnosti v rudarskih območjih.

Kršitve pravic v Demokratični republiki Kongo

Demokratična republika Kongo je eden najpomembnejših svetovnih virov kobalta, ki je ključen za litij-ionske baterije in številne elektronske naprave. Amnesty International je v raziskavi dobavne verige kobalta dokumentiral nevarne razmere v obrtniških rudnikih ter delo otrok, starih tudi komaj sedem let. Otroci in odrasli so delali brez ustrezne zaščitne opreme ter bili izpostavljeni kobaltovemu prahu, nevarnosti porušitev rovov in drugim zdravstvenim ter varnostnim tveganjem (Amnesty International, 2016). Novejša znanstvena raziskava Sovacoola (2021), ki temelji na terenskem delu v kongovskem obrtniškem rudarstvu kobalta, prav tako opozarja na otroško delo,



izkoriščanje rudarjev, neenaka razmerja moči in posledice za javno zdravje, pri čemer posebej izpostavlja tudi spolno dimenzijo teh tveganj.

Raziskave, usmerjene neposredno v skupnosti, povezane s pridobivanjem kobalta v Demokratični republiki Kongo, kažejo, da socialnih posledic rudarjenja ni mogoče ocenjevati zgolj na podlagi nacionalnih kazalnikov. Bamana idr. (2021) so pri terenskem delu v provinci Lualaba opozorili na pomanjkanje zanesljivih lokalnih podatkov o zdravju, blaginji in socialnih učinkih rudarjenja ter na potrebo po celovitejšem vrednotenju vplivov novih tehnologij na lokalne skupnosti. To je pomembno tudi pri presoji zelenega prehoda, saj lahko tehnologije, ki imajo okoljske koristi v državah porabnicah, hkrati ustvarjajo ali poglabljajo socialna tveganja v okoljih pridobivanja surovin.

Revščina, neenakost in omejen dostop do izobraževanja so med dejavniki, ki prispevajo k otroškemu delu; Evropski parlament zato poudarja, da mora biti njegovo odpravljanje povezano tudi z reševanjem teh širših socialnih okoliščin (European Parliament, 2023). ILO ocenjuje, da je po svetu več kot milijon otrok vključenih v otroško delo v rudnikih in kamnolomih, pri čemer je problem posebej prisoten v obrtniškem in malem rudarstvu (ILO, 2019). Ta podatek je globalen in ga zato ni mogoče prikazovati kot število otrok, ki delajo samo v Demokratični republiki Kongo. Raziskava Mancini idr. (2021) pa na primeru dveh pobud odgovornega pridobivanja kobalta v provinci Lualaba kaže, da lahko formalizacija in ciljno usmerjeni programi zmanjšujejo otroško delo in izboljšujejo varnost pri delu, vendar hkrati ne rešujejo nujno vseh težav, kot so višina prihodkov rudarjev, oblikovanje cen in neenakost med spoloma. Otroško delo v rudarstvu zato ni le vprašanje nadzora, ampak je povezano tudi s širšimi socialnimi in ekonomskimi razmerami.

Pri primerjavi virov je pomembno upoštevati, da ne govorijo vsi o problemu na enak način. Dokumenti Evropske unije predvsem določajo cilje in pravila za bolj varne in trajnostne dobavne verige, medtem ko poročila mednarodnih organizacij in raziskave s terena pokažejo, kakšne so dejanske razmere za rudarje in njihove družine. Zato samo sprejetje pravil še ne pomeni, da so težave na terenu že odpravljene.

Povezava med EU in kršitvami pravic

Tveganja za kršitve človekovih in delavskih pravic so zaradi razlik v pravnih okvirih, institucionalnih zmožnostih in učinkovitosti nadzora med državami neenakomerno razporejena. Evropska unija je v zadnjih letih sprejela več instrumentov, ki neposredno posegajo na področje trajnosti dobavnih verig: Uredba (EU) 2024/1252 pri projektih kritičnih surovin izrecno vključuje trajnostne prakse in spoštovanje človekovih pravic, Direktiva (EU) 2024/1760 pa za podjetja v svojem področju uporabe uvaja obveznosti skrbnega pregleda glede dejanskih in potencialnih negativnih vplivov na človekove pravice in okolje (European Parliament & Council of the European Union, 2024a, 2024b). Evropski parlament je že leta 2023 v resoluciji o vlogi razvojne politike EU pri preoblikovanju ekstraktivnih industrij poudaril, da evropsko prizadevanje za dostop do kritičnih surovin ne sme ogrožati človekovih pravic, biotske raznovrstnosti ali trajnostnega razvoja držav v razvoju (European Parliament, 2023). Empirična analiza pobud odgovornega pridobivanja kobalta v Demokratični republiki Kongo pa kaže, da lahko takšni programi izboljšajo nekatere vidike, zlasti varnost pri delu in zmanjševanje otroškega dela, vendar ne zajamejo nujno vseh potreb rudarjev in lokalnih skupnosti (Mancini idr., 2021). Takšna ureditev globalnih dobavnih verig zato odpira vprašanje, ali se del ekonomskih, socialnih in okoljskih stroškov evropske potrošnje prenaša v države, kjer se surovine pridobivajo in predelujejo.

Iz tega izhaja tudi vprašanje odgovornosti Evropske unije, podjetij in potrošniškega trga. Kršitev človekovih in delavskih pravic ni mogoče avtomatično pripisati evropski potrošnji, vendar



evropska odvisnost od uvoza ustvarja potrebo po učinkovitem preverjanju socialnih in okoljskih tveganj vzdolž dobavnih verig. Evropski akt o kritičnih surovinah zato med cilji poudarja varnejšo, odpornejšo in bolj trajnostno oskrbo, pri čemer zahteva upoštevanje socialne trajnosti in človekovih pravic pri strateških projektih (European Parliament & Council of the European Union, 2024b). Direktiva o skrbnem pregledu podjetij glede trajnostnosti pa odgovornost podjetij konkretizira z obveznostjo prepoznavanja in obravnave dejanskih ter potencialnih škodljivih vplivov na človekove pravice in okolje v verigi dejavnosti (European Parliament & Council of the European Union, 2024a).

Zaključek

Kritične surovine so pomembne za tehnologije, ki jih uporabljamo vsak dan, in za zeleni prehod, vendar njihovo pridobivanje nima samo gospodarskih koristi. Primer kobalta iz Demokratične republike Kongo kaže, da so lahko z njim povezani otroško delo, nevarne delovne razmere ter težak socialni položaj rudarjev in njihovih družin. Zaradi tega se zdi pomembno, da pri razvoju novih tehnologij ne razmišljamo samo o tem, od kod bomo dobili dovolj surovin, ampak tudi o tem, v kakšnih razmerah so bile pridobljene.

Na podlagi pregledanih virov ugotavljam, da Evropska unija v zadnjih letih uvaja pravila, s katerimi želi povečati varnost oskrbe in hkrati izboljšati trajnost dobavnih verig. To je pomemben korak, vendar pravila sama po sebi ne morejo odpraviti revščine, šibkega nadzora in neenakih razmerij moči v državah izvoznicah. Pri tem imajo odgovornost tudi podjetja, ki surovine kupujejo in uporabljajo, saj lahko z nadzorom dobaviteljev in zahtevami glede delovnih pogojev vplivajo na način pridobivanja surovin.

Menim, da zeleni in digitalni prehod ne moreta biti zares trajnostna, če se njune koristi povečujejo na račun ljudi, ki delajo na začetku dobavne verige. Evropska unija zato ne bi smela skrbeti samo za zanesljiv dostop do kritičnih surovin, ampak tudi za to, da se pri njihovem pridobivanju spoštujejo človekove in delavske pravice. Prav povezovanje tehnološkega napredka s socialno odgovornostjo je po mojem mnenju eden ključnih izzivov prihodnjega razvoja.

Literatura

Amnesty International. (2016). *"This is what we die for": Human rights abuses in the Democratic Republic of the Congo power the global trade in cobalt* (Index AFR 62/3183/2016). https://www.amnesty.org/en/documents/afr62/3183/2016/en/

Bamana, G., Miller, J. D., Young, S. L., & Dunn, J. B. (2021). Addressing the social life cycle inventory analysis data gap: Insights from a case study of cobalt mining in the Democratic Republic of the Congo. *One Earth*, 4(12), 1704–1714. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.11.007

Blengini, G. A., El Latunussa, C., Eynard, U., Torres de Matos, C., Wittmer, D., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Mathieux, F., & Pennington, D. (2020). *Study on the EU's list of critical raw materials (2020): Final report*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2873/11619

European Commission. (2020). *Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability* (COM(2020) 474 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474

European Parliament & Council of the European Union. (2024a). *Directive (EU) 2024/1760 of 13 June 2024 on corporate sustainability due diligence and amending Directive (EU) 2019/1937 and Regulation (EU) 2023/2859. Official Journal of the European Union.* https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1760/oj

European Parliament & Council of the European Union. (2024b). *Regulation (EU) 2024/1252 of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No*



168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

European Parliament. (2023). *European Parliament resolution of 13 December 2023 on the role of EU development policy in transforming the extractive industries for sustainable development in developing countries (2023/2031(INI)) (P9_TA(2023)0465)*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023IP0465

International Energy Agency. (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions.* OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/f262b91c-en

International Labour Organization, Walk Free, & International Organization for Migration. (2022). *Global estimates of modern slavery: Forced labour and forced marriage.* International Labour Organization. https://doi.org/10.54394/CHUI5986

International Labour Organization. (2019). *Child labour in mining and global supply chains.* https://www.ilo.org/publications/child-labour-mining-and-global-supply-chains

International Labour Organization. (2022). *ILO Declaration on Fundamental Principles and Rights at Work and its Follow-up (1998, as amended in 2022).* https://www.ilo.org/resource/conference-paper/ilo-1998-declaration-fundamental-principles-and-rights-work-and-its-follow

Mancini, L., Eslava, N. A., Traverso, M., & Mathieux, F. (2021). Assessing impacts of responsible sourcing initiatives for cobalt: Insights from a case study. *Resources Policy,* 71, 102015. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102015

Sovacool, B. K. (2021). When subterranean slavery supports sustainability transitions? Power, patriarchy, and child labor in artisanal Congolese cobalt mining. *The Extractive Industries and Society,* 8(1), 271–293. https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.11.018



Strateške surovine v energetiki: materiali, kritične surovine in krožnost vetrnih elektrarn

Mateja Aleksandra Kegel[1,*], Marko Jeran[2]

[1] AAE Gamit, d.o.o., Rečica ob Savinji
[2] Institut »Jožef Stefan«, Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana

**e-mail: mateja@aae-gamit.si*

Povzetek

Prehod v nizkoogljično energetiko ni samo tehnološki in energetski prehod, temveč vse bolj tudi materialni prehod. Vetrne elektrarne za proizvodnjo električne energije ne potrebujejo goriva, njihova izgradnja pa zahteva znatne količine betona, jekla, železa, bakra, aluminija, polimerov in kompozitnih materialov, pri določenih tehnologijah generatorjev pa tudi elemente redkih zemelj. Med njimi so zlasti neodim, prazeodim, disprozij in terbij, ki imajo zaradi uporabe v permanentnih magnetih pomemben strateški pomen. V prispevku je predstavljena osnovna sestava sodobne vetrne turbine, materialne potrebe posameznih komponent ter razlika med običajnimi konstrukcijskimi materiali, kritičnimi surovinami in elementi redkih zemelj. Posebna pozornost je namenjena življenjskemu ciklu materialov in možnostim njihove ponovne uporabe oziroma recikliranja. Danes je mogoče ponovno uporabiti ali reciklirati približno 90–95 % mase sistema sodobne vetrne turbine, pri čemer se delež razlikuje glede na konstrukcijo turbine, vključevanje temeljev v izračun ter uporabljeno metodologijo. Največji tehnološki izziv ostajajo kompozitni materiali lopatic in učinkovito pridobivanje redkih zemelj iz permanentnih magnetov, čeprav se tudi na teh področjih vse hitreje razvijajo konkretne industrijske rešitve.

Ključne besede: vetrne elektrarne, strateške surovine, redke zemlje, recikliranje, krožno gospodarstvo

Uvod

Energetski prehod ni zgolj prehod od fosilnih k obnovljivim virom energije, temveč tudi prehod k večji materialni intenzivnosti energetskih tehnologij. Razvoj vetrnih in sončnih elektrarn, baterijskih sistemov ter električnih omrežij povečuje povpraševanje po bakru, aluminiju, niklju, manganu, elementih redkih zemelj in drugih surovinah, katerih dobavne verige so pogosto geografsko koncentrirane (IEA, 2021). Evropska unija razlikuje strateškimi in kritične surovine in slednje opredeljuje predvsem z gospodarskim pomenom materiala in tveganjem njegove dobave, medtem ko strateške surovine predstavljajo materiale, ključne za zeleni in digitalni prehod ter obrambno in vesoljsko industrijo. Uredba (EU) 2024/1252 med strateške surovine med drugim uvršča baker, aluminij in elemente redkih zemelj za permanentne magnete. Pri tem pa se spreminja tudi razumevanje energetske varnosti. Ta ni več vezana zgolj na dostop do energentov, temveč vse bolj tudi na dostop do materialov, brez katerih tehnologij za proizvodnjo energije ni mogoče izdelati. Skupno raziskovalno središče Evropske komisije (JRC) v analizi prihodnjega razvoja ugotavlja, da bi se lahko povpraševanje po elementih redkih zemelj za vetrne turbine do leta 2030 povečalo za približno tri- do petkrat (Carrara idr., 2025).

Materiali, ki sestavljajo vetrno turbino

Sodobno vetrno turbino sestavljajo temelj, stolp, rotor z lopaticami in pestom, gondola, pogonski sistem, generator, električna oprema ter sistemi za nadzor in krmiljenje (**Slika 1**). Osnovno delovanje turbine temelji na pretvorbi kinetične energije vetra v mehansko rotacijsko energijo rotorja in nato preko generatorja v električno energijo (Kegel idr., 2025). Največji masni delež kopenske vetrne elektrarne predstavljata beton in jeklo. Po podatkih JRC znaša materialna intenzivnost betona približno 300–500 t/MW, jekla 90–130 t/MW in litega železa 16–22 t/MW. Kompozitni materiali predstavljajo približno 6–9 t/MW. Bistveno manjše količine predstavljajo baker, aluminij, cink, mangan, krom, nikelj in molibden. Njihova materialna intenzivnost se glede na konstrukcijo turbine giblje približno med 150 in 1.900 kg/MW za aluminij, 650 in 6.200 kg/MW za baker, 5.150 in 5.750 kg/MW za cink, 650 in 950 kg/MW za mangan, 410 in 510 kg/MW za krom, 370 in 490 kg/MW za nikelj ter 90 in 110 kg/MW za molibden (Carrara idr., 2025; Mc Govern, 2024). Baker se uporablja predvsem v generatorskih navitjih in ožičenju, transformatorjih ter sistemih ozemljitve, njegova poraba pa je močno odvisna od tehnične zasnove turbine.



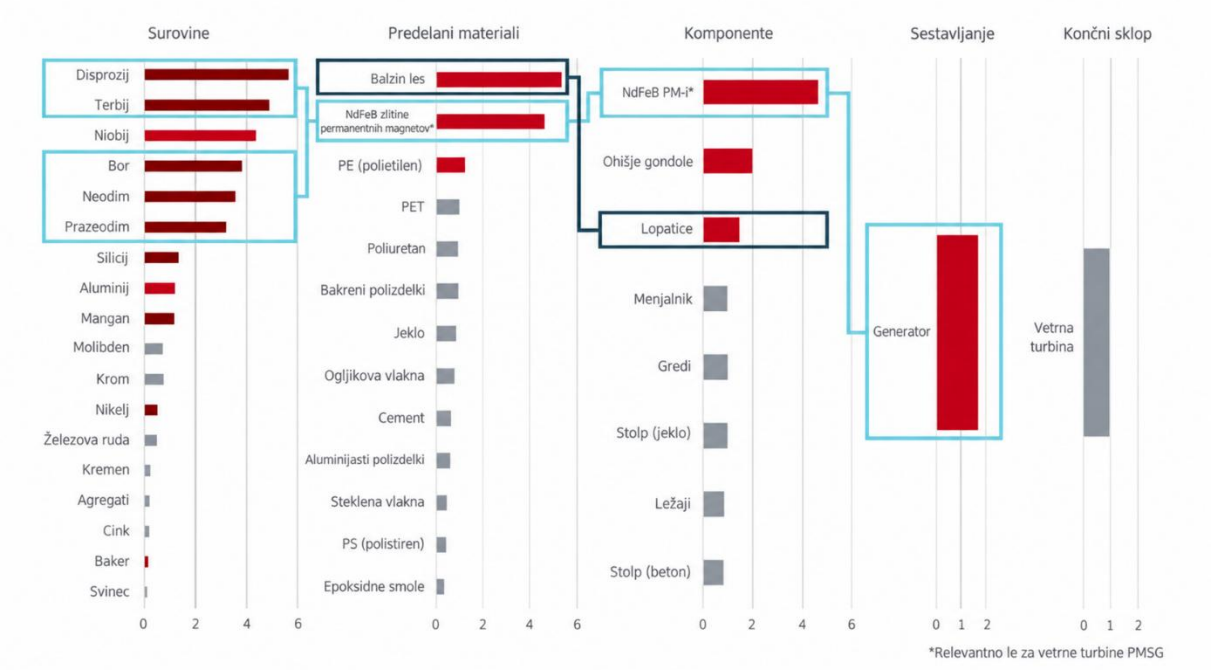
Slika 1: Prikaz vetrnice – ustvarjeno z UI; tehnična struktura povzeta po Kegel idr. (2025) in JRC (2024).

Elementi redkih zemelj in permanentni magneti

Poseben strateški pomen imajo elementi redkih zemelj, kot so neodim (Nd), prazeodim (Pr), disprozij (Dy) in terbij (Tb). Uporabljajo se predvsem v visokozmogljivih permanentnih magnetih tipa NdFeB. A ob tem je pomembno poudariti, da elementi redkih zemelj niso nujna sestavina vseh vetrnih turbin. Njihova uporaba je odvisna predvsem od tehnologije generatorja. Turbine z elektromagnetno vzbujanimi ali določenimi asinhronskimi generatorji jih uporabljajo malo ali sploh ne, medtem ko so lahko količine pri permanentno-magnetnih sinhronskih generatorjih bistveno večje. Uporaba neodima se pri različnih tehnologijah giblje približno med 6 in 210 kg/MW, pri določenih direktno gnanih generatorjih pa so količine permanentnih magnetov še bistveno večje (Carrara idr., 2025). Disprozij in terbij se magnetnim zlitinam dodajata predvsem zaradi ohranjanja magnetnih lastnosti pri višjih temperaturah. Kot v nadaljevanju prikazuje **Slika 2**, JRC prav dobavno verigo redkih zemelj, NdFeB zlitin, permanentnih magnetov in generatorjev

uvršča med najbolj izpostavljene dele dobavne verige vetrnih turbin. Visoko tveganje je zaznano že pri posameznih elementih redkih zemelj in se nadaljuje v nadaljnjih fazah predelave ter proizvodnje komponent.

Strateški problem teh materialov ni predvsem njihova geološka redkost, temveč izrazita koncentracija predelave in proizvodnje. Po podatkih Adamas Intelligence (2024), ki jih povzema JRC, Kitajska zagotavlja približno 64 % svetovne proizvodnje pri rudarjenju redkih zemelj, njen delež pa v nadaljnjih, tehnološko zahtevnejših fazah dobavne verige naraste na 92 % pri proizvodnji oksidov, 92 % pri kovinah in zlitinah, 91 % pri NdFeB zlitinah in prahovih ter 89 % pri proizvodnji NdFeB permanentnih magnetov. Evropski delež je pri rudarjenju praktično ničen, v vseh nadaljnjih fazah pa znaša manj kot 1 % svetovnega trga (Adamas Intelligence, 2024; Carrara idr., 2025). **Slika 2** tako dopolnjuje navedene tržne deleže, saj pokaže, kako se takšna koncentracija dobave odraža v konkretnem tveganju za evropsko vetrno industrijo.



Slika 2: Podrobna ocena tveganja dobave posameznih elementov v dobavni verigi vetrnih turbin, s poudarkom na dobavni verigi redkih zemelj in permanentnih magnetov ter balzinega lesa in lopatic. Vir: Carrara idr. (2025), prirejeno po Carrara idr. (2023).

Podatki kažejo tudi, da problem za Evropo ni le dostop do same rude, temveč predvsem pomanjkanje lastnih zmogljivosti za njeno predelavo in proizvodnjo končnih izdelkov z višjo dodano vrednostjo. JRC pri tem opozarja na pomemben razvoj: leta 2010 je Kitajska predstavljala približno 97 % svetovnega rudarjenja in koncentracije redkih zemelj ter 75 % proizvodnje magnetov, danes pa je njen delež pri rudarjenju nižji, medtem ko ostaja skoraj popolnoma dominantna v poznejših fazah verige (Carrara idr., 2025). To kaže na premik od nadzora nad samim pridobivanjem surovin k nadzoru nad predelavo, proizvodnjo magnetov in drugih tehnološko zahtevnejših komponent. Kitajska poleg tega obvladuje tudi približno 52 % svetovnega trga generatorjev za vetrne turbine, kar dodatno povečuje industrijsko in tehnološko ranljivost evropskega sektorja (Carrara idr., 2025).



Razgradnja in krožno gospodarjenje

Običajna projektirana življenjska doba vetrnih turbin znaša približno 20–25 let, pri ustreznem vzdrževanju, spremljanju stanja ključnih komponent in izvedbi potrebnih tehničnih posegov pa jo je mogoče tudi podaljšati. Po koncu prvotno načrtovanega obdobja obratovanja je možnih več scenarijev: podaljšanje življenjske dobe, ponovna uporaba posameznih komponent, premestitev turbine na drugo lokacijo, t. i. repowering oz. zamenjava starejših naprav z novejšimi ter popolna razgradnja (Mc Govern idr., 2025).

Z obstoječimi tehnologijami je mogoče danes ponovno uporabiti oziroma reciklirati približno 90–95 % mase sistema vetrne turbine, pri čemer se delež razlikuje glede na konstrukcijo turbine, vključitev temeljev ter uporabljeno metodologijo vrednotenja (Carrara idr., 2025). Največji delež predstavljajo materiali, za katere že obstajajo dobro razviti tokovi recikliranja, predvsem jeklo, lito železo, baker in aluminij. Beton iz temeljev se lahko po ustrezni obdelavi in drobljenju uporabi kot sekundarni gradbeni material, posamezne komponente generatorjev, menjalnikov in druge strojne opreme pa se lahko obnovijo, ponovno uporabijo ali materialno predelajo. Najzahtevnejši del razgradnje še vedno predstavljajo lopatice rotorja, izdelane predvsem iz kompozitov steklenih ali ogljikovih vlaken in polimerne matrice. Prav lastnosti, zaradi katerih so lopatice med obratovanjem izredno trdne in trajne, po koncu življenjske dobe otežujejo ločevanje posameznih materialov. Med možnostmi so mehansko recikliranje, uporaba zdrobljenih kompozitov v cementni industriji, piroliza, solvoliza ter ponovna namensko prilagojena uporaba celih lopatic ali njihovih segmentov (Christoffel idr., 2025).

Da razvoj na tem področju hitro napreduje, kaže tudi primer družbe Vestas. V svojem letnem poročilu za leto 2025 podjetje navaja, da je mogoče pri njihovih turbinah reciklirati približno 85–97 % materialov, pri čemer je reciklabilnost celotne turbine pri aktualnih modelih dosegla 97 %. Leta 2025 je Vestas dosegel tudi 94-odstotno reciklabilnost rotorja, cilj pa ostaja 100-odstotno reciklabilen rotor do leta 2030 in proizvodnja vetrnih turbin brez odpadkov (angl. zero-waste wind turbines) do leta 2040 (Vestas Wind Systems A/S, 2026).

Drugi pomemben izziv predstavlja recikliranje permanentnih magnetov. Zaradi relativno visokih koncentracij neodima, prazeodima, disprozija in terbija predstavljajo odsluženi generatorji potencialno pomemben sekundarni vir strateških surovin. Sedanja stopnja dejanskega recikliranja ostaja nizka, vendar imajo velike energetske naprave pomembno prednost: njihova lokacija, sestava in upravljavec so znani, zato so pogoji za organizirano zbiranje, demontažo in pridobivanje materialov bistveno boljši kot pri razpršeni potrošniški elektroniki (Mc Govern idr., 2025). Ključni razvojni cilj se zato iz zgolj povečevanja deleža tehnično reciklabilne mase počasi premika proti krožnemu načrtovanju vetrnih turbin, pri katerem se že ob zasnovi razmišlja o tem, kako bo mogoče materiale in komponente čez dvajset ali trideset let razstaviti, ponovno uporabiti in vrniti v proizvodni proces.

Zaključek

Materialna sestava vetrnih elektrarn kaže, da največji del njihove mase predstavljajo običajni konstrukcijski materiali, predvsem beton in jeklo, medtem ko so strateške surovine in elementi redkih zemelj količinsko bistveno manj zastopani. Njihov pomen pa je zaradi uporabe v generatorjih, električni infrastrukturi in permanentnih magnetih bistveno večji. Pri ocenjevanju materialne intenzivnosti vetrne energije zato ni pomembna samo količina posameznega materiala, temveč tudi njegova strateška vloga in predvsem vprašanje, kako zanesljiva je njegova dobava. Ključni problem vetrne tehnologije tako ni velika absolutna poraba redkih zemelj, ampak predvsem odvisnost od zelo specifičnih dobavnih verig, še posebej pri njihovi predelavi in



proizvodnji permanentnih magnetov. Prav tukaj se kaže ena večjih ranljivosti evropske energetske in tudi industrije nasploh. Po drugi strani pa je pomembno, da je velik del mase vetrne turbine že danes mogoče reciklirati oz. ponovno uporabiti, kar odpira tudi možnost, da odslužene turbine v prihodnosti postanejo pomemben vir sekundarnih surovin.

Nadaljnji razvoj vetrne tehnologije tako zahteva stabilnejše in bolj razpršene dobavne verige, večjo uporabo sekundarnih surovin ter razvoj komponent, ki jih bo po koncu življenjske dobe mogoče lažje razstaviti, ponovno uporabiti ali reciklirati. Poseben izziv ostajajo kompozitni materiali in permanentni magneti, vendar se tudi na teh področjih razvijajo konkretne tehnološke rešitve. Tudi slovenski raziskovalci so že sodelovali v projektih ponovne uporabe kompozitnih materialov konkretno iz vetrnih lopatic. Prihodnost, ko bodo lopatice zaživele v obliki ponovne uporabe, morda tudi kot pohištvo v pisarni ali domu, je bližje, kot si predstavljamo.

Krožno gospodarjenje s strateškimi surovinami tako ni samo okoljsko vprašanje, temveč vse bolj tudi vprašanje energetske varnosti in evropske industrijske neodvisnosti. Če želimo, da bo energetski prehod dolgoročno vzdržen, bo pomembno ne le, kje bomo potrebne materiale pridobili, temveč tudi, koliko jih bomo po koncu njihove prve uporabe znali ohraniti v gospodarstvu in ponovno uporabiti.

Literatura

Carrara, S., Baldassarre, B., Jakimów, M., Kuzov, T., Mc Govern, L., Nohl, L., Ierides, M., & Christou, M. (2025). *Deep dive on critical raw materials for wind turbines in the EU*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/5665594

Christoffel, T., Khalifa, S., Berry, D., Lee Ennis, B., Wang, P., Marquis, M., Sproul, E., Das, S., Alnaggar, M., Brooks, A., Korey, M., Jackson, A., Eberle, A., Oteri, F., Walzberg, J., Kreider, M., Paranthaman, P., Kemp, J., Wang, H., … Rallabandi, V. (2025). *Recycling wind energy systems in the United States, Part 1: Providing a baseline for America's wind energy recycling infrastructure for wind turbines and systems*. U.S. Department of Energy. https://doi.org/10.2172/2498327

International Energy Agency. (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

Kegel, M. A., Zerobin, S., Suer, M., Tratnik, J., Erd, J., & Jeran, M. (2025). Impact of wind turbines on human health and safety. *Proceedings of Socratic Lectures, 12*(II), 60–71. https://doi.org/10.55295/PSL.12.2025.II6

Mc Govern, L., Tapoglou, E., & Georgakaki, A. (2024). *Material requirements for wind turbines*. European Commission. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC139701

Mc Govern, L., Tapoglou, E., & Georgakaki, A. (2025). *Material streams from wind energy decommissioning to 2050*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/0326924

Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. (2024). *Official Journal of the European Union*. http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

Vestas Wind Systems A/S. (2026). *Annual report 2025*. https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/investor/reports-and-presentations/financial/2025/fy-2025/Vestas%20Annual%20Report%202025.pdf



Vloga radionuklidov redkih zemelj v sodobni nuklearni medicini pri obravnavi onkoloških bolezni

Andrej Doma[1,2], Luka Irenej Pečan[3], Marko Jeran[4,*]

[1] Onkološki inštitut Ljubljana, Oddelek za nuklearno medicino, Ljubljana, Slovenija
[2] Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Ljubljana, Slovenija
[3] BioStratexa, Farmakoekonomika, vrednotenje zdravstvenih tehnologij in dostop zdravil do trga, Piran, Slovenija
[4] Institut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana, Slovenia

**e-mail: luka.irenej@pecan.si; marko.jeran@ijs.si*

Povzetek

Elementi redkih zemelj zaradi svojih specifičnih kemijskih in jedrskofizikalnih lastnosti predstavljajo pomembno skupino elementov v razvoju sodobne nuklearne medicine. Njihova sposobnost tvorbe stabilnih kompleksov s kelatorji in povezovanja s tarčnimi molekulami omogoča razvoj radiofarmakov, ki lahko ionizirajoče sevanje usmerijo neposredno v tumorsko tkivo. Med najpomembnejšimi terapevtskimi radionuklidi so lutecij-177 (^{177}Lu), itrij-90 (^{90}Y), samarij-153 (^{153}Sm), holmij-166 (^{166}Ho) in vse bolj tudi terbij-161 (^{161}Tb). V klinični praksi je ^{177}Lu danes eden najpomembnejših radionuklidov, zlasti pri zdravljenju napredovalega raka prostate in dobro diferenciranih nevroendokrinih tumorjev. Poseben pomen ima pri tem teranostični pristop, pri katerem lahko z diagnostičnim radiofarmakom najprej ugotovimo prisotnost in razporeditev tarče, nato pa z ustreznim terapevtskim radionuklidom isto tarčo uporabimo za zdravljenje. Takšen pristop omogoča natančnejšo izbiro bolnikov ter spremljanje razporeditve radiofarmaka in odziva bolezni na zdravljenje. Različne fizikalne lastnosti radionuklidov omogočajo njihovo prilagajanje značilnostim bolezni, saj so lahko radionuklidi z daljšim dosegom sevanja primernejši za večja tumorska žarišča, radionuklidi z zelo kratkim dosegom pa za mikrometastatsko bolezen. V tem okviru je ^{161}Tb posebej obetaven zaradi kombinacije beta sevanja in nizkoenergijskih elektronov, ki lahko povzročijo zelo lokalizirane poškodbe tumorskih celic. Nadaljnji razvoj področja bo zato temeljil na povezovanju novih radionuklidov, ustreznih tarčnih molekul, natančne dozimetrije in teranostičnih metod. Cilj takšnega razvoja je prehod od enotnega pristopa k zdravljenju raka k bolj natančnemu in posameznemu bolniku prilagojenemu tarčnemu radionuklidnemu zdravljenju.

Ključne besede: redke zemlje, nuklearna onkologija, izotopi, toksičnost, teranostika, zdravljenje

Uvod

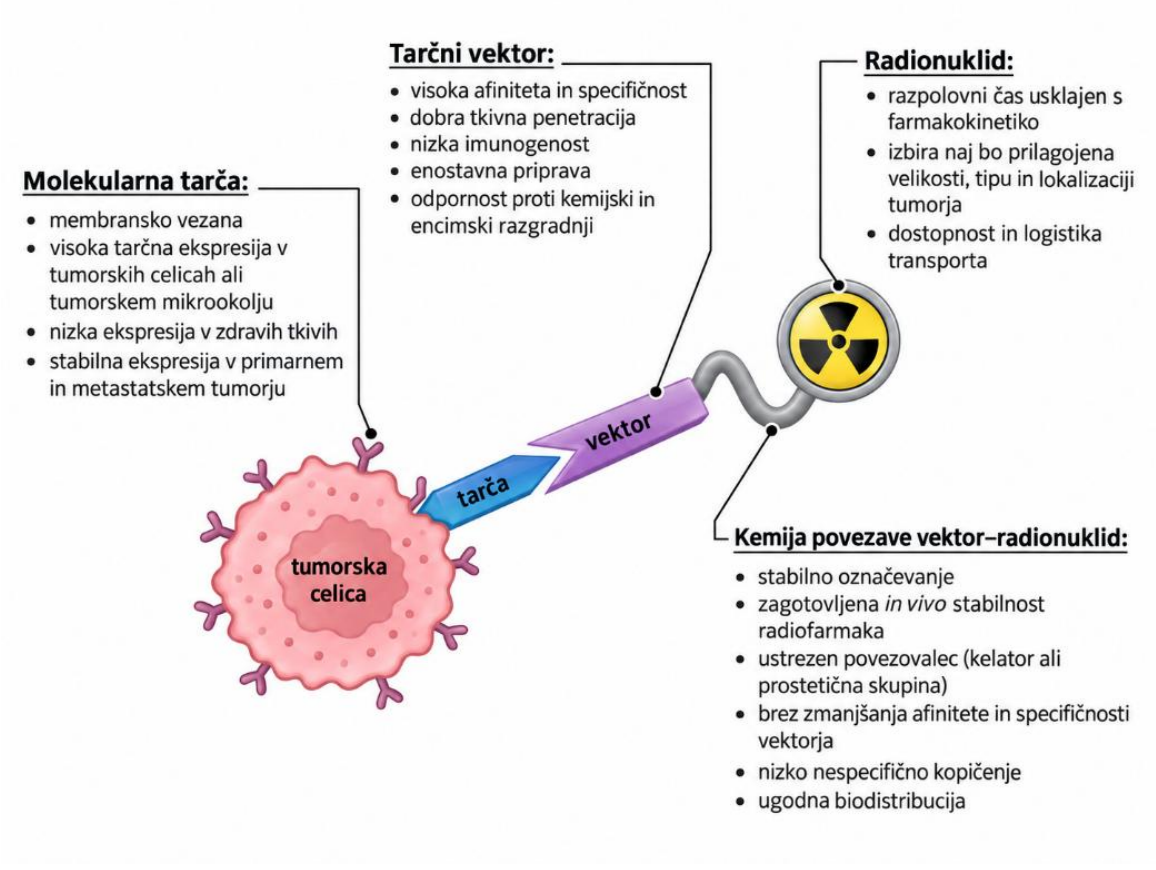
Elementi redkih zemelj obsegajo sedemnajst kemijskih elementov periodnega sistema, in sicer skandij, itrij, lantan ter štirinajst lantanoidov z atomskimi števili od 58 do 71 (Gurin idr., 2022; Gurin idr., 2023). Izraz »redke zemlje« ne nakazuje izjemne naravne redkosti teh elementov, temveč izhaja iz zgodovinskih okoliščin njihovega odkritja in težavnosti ločevanja med seboj (Wang & Li, 2022). Njihove kemijske lastnosti so za medicino privlačne predvsem zaradi tesne medsebojne sorodnosti: elementi redkih zemelj tvorijo kationske komplekse s podobnimi koordinacijskimi lastnostmi, kar omogoča, da jih zamenjujemo znotraj istega kemijskega okvira brez spremembe biološkega vedenja konjugata (Sadler idr., 2022; Joaqui-Joaqui idr., 2025). Biološke lastnosti ionov redkih zemelj so podobne lastnostim kalcijevih ionov, kar pojasnjuje njihovo afiniteto do bioloških sistemov in uporabnost v medicinskem raziskovanju (Wang & Li, 2022). Sposobnost teh elementov, da tvorijo kemijske vezi z organskimi molekulami, vključno s

peptidi naravnega in sintetičnega izvora, predstavlja osnovo za razvoj novih zdravil za tarčno zdravljenje rakavih obolenjev (Gurin idr., 2022).

Radioaktivni izotop ali radionuklid je atom z nestabilnim jedrom, ki presežek jedrske energije sprošča z radioaktivnim razpadom, pri čemer se oddaja ionizirajoče sevanje, ki ga lahko izkoristimo za medicinske namene (Gurin idr., 2023). Pri razpadu radionuklida nastajajo različne vrste sevanja – delci beta, delci alfa, pozitroni, fotoni gama ali Augerjevi elektroni – ki se med seboj razlikujejo po dosegu v tkivu in linearnem prenosu energije (Stokke idr., 2022; Herrero Álvarez idr., 2021). Globlje prodorne vrste sevanja, kot so žarki gama in pozitroni, se uporabljajo predvsem v diagnostičnem slikanju, medtem ko se pri terapevtskih aplikacijah uporabljajo predvsem delci beta, delci alfa in Augerjevi elektroni, ki povzročajo nepopravljive poškodbe DNK in s tem celično smrt (Melis idr., 2022; Morgan idr., 2023). Izbira ustreznega radionuklida je odvisna od vrste, velikosti in lokacije tumorja, saj lastnosti, ki so prednostne za eno aplikacijo, lahko pomenijo pomanjkljivost pri drugi (Stokke idr., 2022).

Nuklearna medicina je definirana kot uporaba radionuklidov v diagnostične in terapevtske namene (Herrero Álvarez idr., 2021), pri čemer radiofarmak običajno sestavljajo trije sestavni deli: radionuklid za slikanje ali zdravljenje, vektorska molekula, ki radionuklid dostavi do celic, ki izražajo specifično molekularno tarčo, ter kelator, ki tvori stabilno kemijsko vez med radionuklidom in vektorsko molekulo (**Shema 1**) (Koole idr., 2024). Vektorska molekula je lahko majhna organska molekula, peptid ali beljakovina, ki mora po konjugaciji z radionuklidom ohraniti afiniteto in selektivnost za svojo tarčo (Koole idr., 2024). Ker je večina terapevtskih radionuklidov kovinske narave, je za njihovo stabilno vezavo na biološki del nujna uporaba bifunkcionalnih kelatorjev, ki kovinski ion močno koordinirajo in hkrati omogočajo kovalentno povezavo s tarčno molekulo (Melis idr., 2022). Kelator mora zagotavljati visoko termodinamsko stabilnost in kinetično inertnost kompleksa, da prepreči sproščanje radionuklida v organizmu, kar bi zmanjšalo učinkovitost zdravila in povečalo izpostavljenost zdravih tkiv sevanju (Kostelnik & Orvig, 2018; Melis idr., 2022).

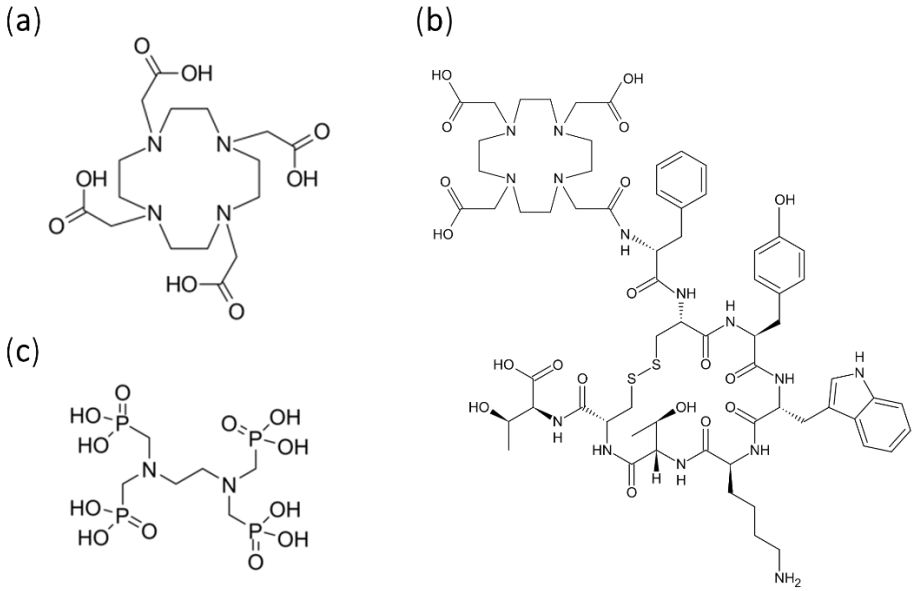
Tarčno radionuklidno zdravljenje raka temelji na načelu, da radiofarmak prepozna specifično tarčo na tumorskih celicah ali v tumorskem mikrookolju, radionuklid pa nato lokalno oddaja ionizirajoče sevanje, ki poškoduje tumorske celice in povzroči njihovo smrt (Stec & Wilson, 2025; Morgan idr., 2023). Cilj je čim bolj selektivno dostaviti sevanje na ravni tumorja, pri čemer se obremenitev zdravih tkiv čim bolj omeji (Lepareur idr., 2023). Prednost sistemskega pristopa je, da zdravilo po intravenskem dajanju doseže tudi oddaljene tumorske zasevke, kar omogoča zdravljenje razsejanega raka, ki bi bil s klasičnim zunanjim obsevanjem težko dosegljiv (Lepareur idr., 2023). Razumevanje kompleksnih molekularnih mehanizmov biologije raka in napredek radiobiologije sta omogočila razvoj vse bolj specifičnih radiofarmakov, s čimer se področje tarčnega radionuklidnega zdravljenja pomika k natančnejši in bolj individualizirani obravnavi bolnikov (Lepareur idr., 2023). V tem okviru so radionuklidi elementov redkih zemelj zaradi svojih ugodnih jedrskofizikalnih lastnosti in medsebojne kemijske zamenljivosti postali pomemben predmet raziskav za razvoj novih radiofarmakov v sodobni nuklearni medicini (Gurin idr., 2022; Gurin idr., 2023).



Shema 1: Ključni dejavniki pri načrtovanju tarčno usmerjenega radiofarmaka. Shema prikazuje glavne zahteve za izbiro ustrezne molekularne tarče, tarčnega vektorja, radionuklida ter kemije povezave med vektorjem in radionuklidom. Učinkovit radiofarmak zahteva visoko in selektivno izraženo tarčo v tumorskem tkivu, visoko afiniteto in specifičnost vektorja z dobro tkivno penetracijo, ustrezno usklajen razpolovni čas radionuklida s farmakokinetiko vektorja ter stabilno označevanje z nizkim nespecifičnim kopičenjem v zdravih tkivih.

Sodobna nuklearna medicina v onkologiji in primeri iz domače prakse

Številni elementi redkih zemelj so zaradi svojih ugodnih kemijskih lastnosti in sposobnosti tvorbe stabilnih kompleksov s kelatorji, zlasti z DOTA (**Slika 1**), ter zaradi primernih sevalnih lastnosti nekaterih njihovih radioaktivnih izotopov v zadnjih desetletjih postali pomembni za razvoj sodobne medicine. V nuklearni medicini se radioaktivni izotopi redkih zemelj uporabljajo predvsem za tarčno zdravljenje. Pri tem se radioizotop veže na molekulo, ki selektivno prepozna antigen ali receptor na površini tumorskih celic. Po vezavi in internalizaciji radioaktivno tarčno zdravilo (radiofarmak) oddaja ionizirajoče sevanje neposredno v tumorskem tkivu, medtem ko je obremenitev zdravih organov s sevanjem sorazmerno majhna in ne povzroči pomembnih stranskih učinkov.



*Slika 1: Organske molekule kot kelatorji za uporabo v nuklearni medicini pri onkologiji: (**a**) DOTA; IUPAC: 2,2',2'',2'''-(1,4,7,10-tetraazaciklododekan-1,4,7,10-tetrail)tetraocetna kislina, (**b**) DOTATATE; IUPAC: DOTA-(Tyr³)-oktreotat tj. peptid, sestavljen iz osmih aminokislin, s kovalentno vezanim bifunkcionalnim kelatorjem DOTA in (**c**) EDTMP oz. etilendiamin-*N,N,N',N'*-tetra(metilenfosfonska kislina); IUPAC: {etan-1,2-diilbis[nitrilobis(metilen)]}tetrakis(fosfonska kislina).*

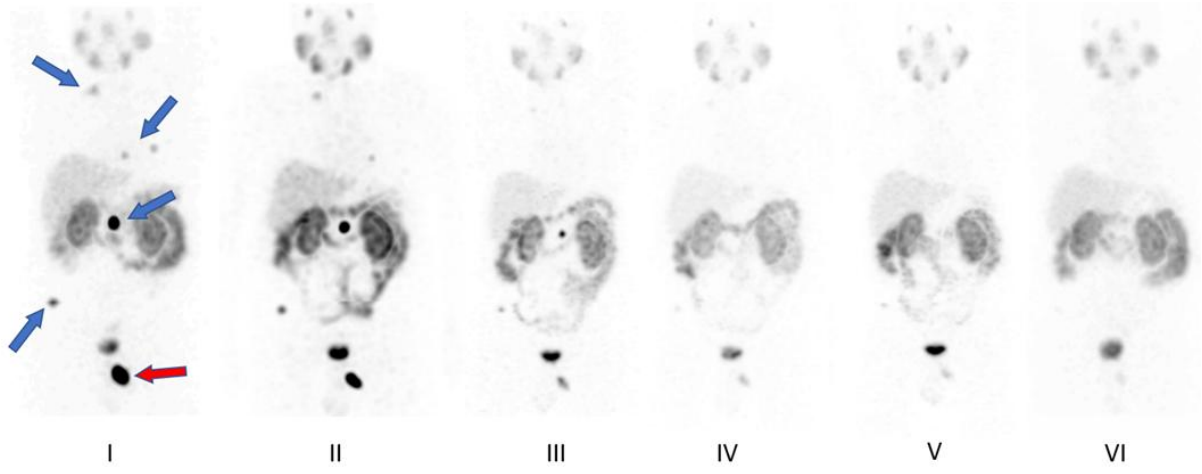
Med najpomembnejšimi izotopi elementi redkih zemelj so lutecij (^{177}Lu), samarij (^{153}Sm), terbij (^{161}Tb), holmij (^{166}Ho) in itrij (^{90}Y).

Samarij (^{153}Sm), predvsem v obliki ^{153}Sm-EDTMP, se je v preteklosti veliko in uspešno uporabljal za paliativno lajšanje bolečin pri bolnikih s kostnimi metastazami, predvsem pri raku prostate in dojke. Ta radiofarmak se je vezal v področja osteoblastne aktivnosti v kostnih zasevkih. Njegovo beta sevanje je omogočalo dolgotrajno lokalno delovanje v metastazah in zmanjšanje bolečin. Zaradi neugodnega vpliva na delovanje kostnega mozga so ga nadomestila druga, učinkovitejša zdravila (Fischer & Kampen, 2012).

Danes je med terapevtskimi radionuklidi v ospredju lutecij (^{177}Lu). Lutecij oddaja predvsem beta delce, ki lahko poškodujejo in uničijo rakave celice, hkrati pa ima dovolj dolg razpolovni čas, da se ga lahko varno pripravi, dostavi in uporabi za zdravljenje. Oddaja tudi majhno količino gama sevanja, kar omogoča spremljanje njegove razporeditve v telesu s posebno kamero (George & Samuel, 2023).

Posebej pomembna je uporaba lutecija pri raku prostate. PSMA je beljakovina, ki je v velikih količinah prisotna na površini celic raka prostate, medtem ko je njegova ekspresija v zdravih tkivih omejena (Maes idr., 2024). Molekulo, ki se veže na PSMA na rakavih celicah, označimo z radioaktivnim lutecijem in tako se radioaktivno zdravilo iz krvi selektivno kopiči v rakavem tkivu (**Slika 2**). Pri ^{177}Lu je glavni terapevtski učinek posledica sevanja β^-. Elektroni pri prehodu skozi tkivo povzročajo ionizacijo in nastanek prostih radikalov, kar vodi do poškodb DNA, vključno z enojnimi in dvojnimi prelomi DNA. Dvojni prelomi so posebej pomembni, ker jih celica težje popravi in vodijo v smrt tumorskih celic. Ker gre za sistemsko zdravljenje, se doseže tudi majhne in oddaljene metastaze, ki z zunanjim obsevanjem ali kirurgijo niso dostopne (Sartor idr., 2021; Al-Khanaty idr., 2026).

Drugo pomembno področje uporabe lutecija je zdravljenje dobro diferenciranih nevroendokrinih tumorjev. Številne nevroendokrine tumorske celice imajo na površini izražene receptorje za somatostatin (Barbieri idr., 2013), na katere se veže z lutecijem (^{177}Lu) označena molekula ^{177}Lu-DOTATATE. Ko zdravilo vnesemo v telo, se veže na receptorje na tumorskih celicah in tako radioaktivnost pripelje neposredno do tumorja in zasevkov. Sevanje lutecija nato poškoduje tumorske celice in lahko povzroči njeno odmrtje, zmanjša velikost tumorjev in v primerjavi z drugimi vrstami zdravljenj pomembno podaljša čas brez napredovanja bolezni (Becx idr., 2022).



Slika 2: Serija scintigramov po terapiji z ^{177}Lu-PSMA. ^{177}Lu-PSMA je radionuklidna terapija, pri kateri se z ^{177}Lu označen ligand PSMA selektivno veže na celice karcinoma prostate, ki izražajo PSMA (Prostate Specific Transmembrane Antigen, angl. za prostato specifičen membranski antigen), ter z beta sevanjem povzroči lokalen citotoksičen učinek. Zdravljenje običajno poteka v šestih ciklih v razmiku več tednov, cilj pa je zmanjšanje tumorske mase, lajšanje simptomov in podaljšanje preživetja pri bolnikih z napredovalim metastatskim rakom prostate. Posnetki (I–VI) prikazujejo porazdelitev radiofarmaka po posameznih ciklih terapije. Modre puščice označujejo vezavo radiofarmaka izhodiščno (I) v zasevke v več rebrih, desno v medenici in v prsnem vretencu, ki na posnetkih po nadaljnjih ciklih zdravljenja (II–VI) povsem izginejo. Rdeča puščica označuje zasevek nizko v medenici, kjer se kopičenje radiofarmaka kljub zdravljenju le malo zmanjša, kar ustreza delnemu terapevtskemu odzivu tega zasevka. Slikovno gradivo je bilo pridobljeno na Onkološkem inštitutu Ljubljana v okviru klinične obravnave bolnika.

V prihodnosti se pričakuje nadaljnji razvoj z več izotopi elementov redkih zemelj (**Tabela 1**). Terbij (^{161}Tb) se uveljavlja kot obetaven radionuklid, katerega glavna prednost pred doslej uveljavljenim lutecijem (^{177}Lu) je v fizikalnih lastnostih razpada: ^{161}Tb poleg srednjeenergijskega sevanja β^- (podobno kot ^{177}Lu) oddaja tudi številne nizkoenergijske konverzijske in Augerjeve elektrone z zelo kratkim dosegom v tkivu (nekaj mikrometrov). Zaradi slednjega pride do bolj lokaliziranega prenosa energije na ravni posamezne celice in njenega jedra, kar poveča linearni prenos energije in s tem verjetnost dvojnih prelomov DNA v tarčnih celicah, hkrati pa zmanjša obsevanje sosednjih zdravih celic. Terbij (^{161}Tb) bi lahko izboljšal učinkovitost zdralvjenja pri mikrometastazah karcinoma prostate, kar že potrjujejo zgodnje klinične študije (Müller idr., 2023). Slabost terbija je trenutno predvsem njegova omejena dostopnost. Proizvodnja terbija je zahtevnejša in manj razširjena kot pri luteciju, zato še ni tako široko dostopen za rutinsko klinično uporabo kot lutecij.

Holmij (^{166}Ho) se preizkuša pri lokalnem zdravljenju jetrnih lezij v obliki radioaktivnih mikrosfer ali perkutano in intraoperativno pri skeletnih tumorjih. Zaradi kratkega dosega beta delcev in visoke specifične aktivnosti mikrosfer pride do visoke lokalne absorbirane doze v tumorju z minimalnim obsevanjem okolnega zdravega tkiva (Klaassen idr., 2019).



Pomemben terapevtski radionuklid je tudi itrij (^{90}Y). Gre za čistega β^- sevalca, kar pomeni, da pri svojem razpadu oddaja elektrone z relativno visoko energijo. Ti imajo v tkivu daljši doseg in lahko zato obsevajo tudi celice v neposredni okolici mesta, kamor se je radioaktivno zdravilo vezalo. Zaradi omenjenega je ^{90}Y posebej primeren za zdravljenje večjih tumorskih sprememb, kjer lahko daljši doseg sevanja omogoči obsevanje večjega dela tumorja. ^{90}Y se je uveljavil predvsem pri radioembolizaciji jetrnih tumorjev, kjer se mikrosfere, označene z ^{90}Y, podobno kot pri holmiju (^{166}Ho), vbrizgajo v arterije, ki prehranjujejo tumor. Mikrosfere se zaradi posebnosti krvnega obtoka jeter zadržujejo v tumorskih žilah in tam oddajajo sevanje β^- (Tong idr., 2016). ^{90}Y se uporablja tudi v nekaterih oblikah ciljnega radionuklidnega zdravljenja, na primer pri zdravljenju nevroendokrinih tumorjev (Uccelli idr., 2021). V primerjavi z ^{177}Lu ima ^{90}Y večjo energijo sevanja β^- in daljši doseg, vendar skoraj ne oddaja uporabnega gama sevanja, zato je slikovni prikaz zahtevnejši (**Tabela 1**).

Tabela 1: Pregled radionuklidov elementov redkih zemelj, ki se pogosto uporabljajo v nuklearni medicini, ter tistih, ki so obetavni za prihodnjo uporabo. Oznake: beta razpad – β^-; beta delec – β in gama žarek – γ.

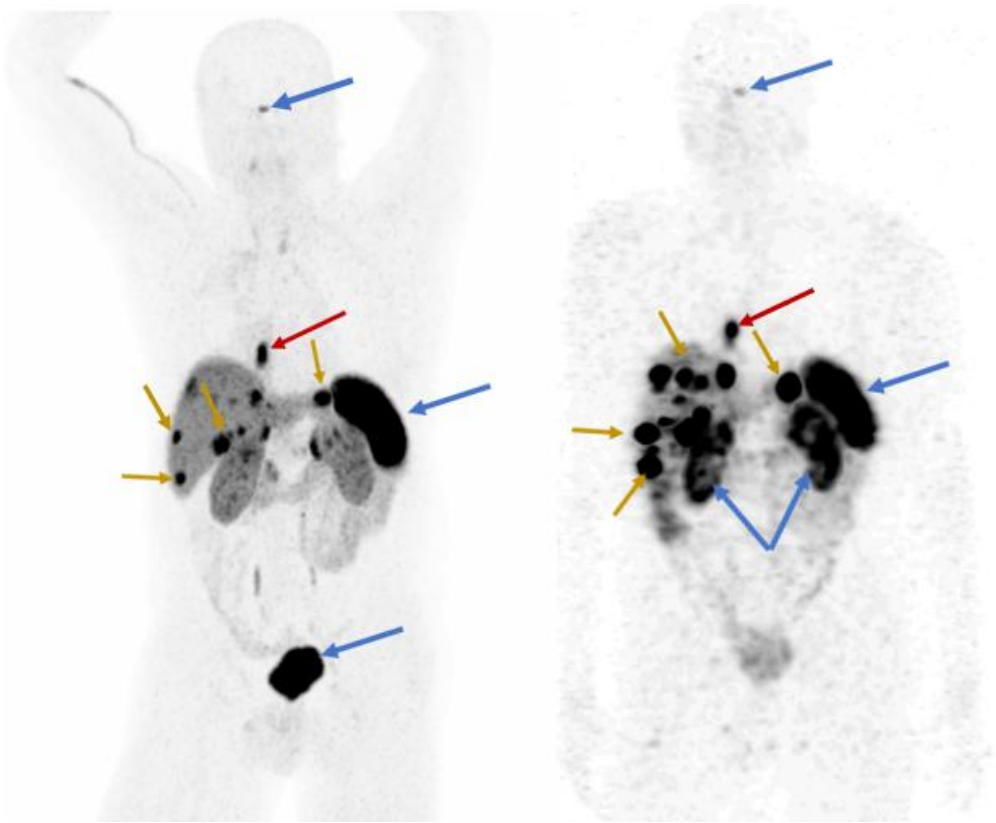
Radionuklid	Razpolovni čas	Glavni način razpada	Energija β^- in doseg v mehkih tkivih	Dodatno sevanje (pomembno za slikanje)
^{177}Lu	6,7 dni	β^- (100%)	β = 133 keV; *doseg: največ 2 mm*	γ: 113 keV (6,4%) in 208 keV (10,4%)
^{161}Tb	6,9 dni	β^- (100%)	β = 154 keV; *doseg: 0,2 – 0,3 mm*	številni nizkoenergijski konverzijski in Augerjevi elektroni
^{166}Ho	26,8 ur	β^- (100%)	β = 666 keV; *doseg: 2 – 3 mm (največ 10 mm)*	γ: 80,6 keV (6,6%)
^{90}Y	2,7 dni	β^- (100%)	β = 940 keV; *doseg: 4 mm (največ 11 mm)*	skoraj brez γ

Teranostika

Pri tarčnem radionuklidnem zdravljenju sta diagnostika in zdravljenje tesno povezana, kar poznamo pod izrazom teranostika. Pred zdravljenjem s posebnim slikanjem celega telesa preverimo, ali tumorske celice dovolj močno izražajo določeno tarčo, na katero bomo usmerili zdravljenje; pri raku prostate je to PSMA, pri nevroendokrinih tumorjih pa receptorji za somatostatin. Če je tarča na tumorju prisotna v zadostni meri, lahko pričakujemo, da se bo nanjo vezalo tudi terapevtsko radioaktivno zdravilo (Stokkel idr., 2025).

Prednost teranostike je, da lahko isto tarčo ob vezavi različnih izotopov uporabimo najprej za iskanje bolezni in nato za njeno zdravljenje (**Slika 3**). Z diagnostičnim radioaktivnim sledilcem (galij, ^{68}Ga) najprej prikažemo, kje v telesu so tumorske celice in kako močno izražajo tarčo. Na podlagi omenjenega lahko ocenimo, ali je bolnik primeren za zdravljenje. Nato isto oz. zelo podobno molekulo označimo s terapevtskim radionuklidom (npr. ^{177}Lu, ^{161}Tb), in jo uporabimo za ciljno obsevanje tumorskih celic. V primeru, da tumor tarč ne izraža v zadostni meri, lahko od zdravljenja odstopimo, saj že v naprej vemo, da ne bo učinkovito. Slikanje pa se ne konča z

začetkom zdravljenja: s preiskavami pred, med in po zdravljenju lahko spremljamo, kako se bolezen odziva na zdravljenje, ali se je kopičenje zdravila v tumorjih po posameznih ciklih radionuklidnega zdravljenja zmanjšalo ter ali so po končanem zdravljenju ostala področja, v katerih je še prisotno živo tumorsko tkivo (Burkett idr., 2023). Teranostika tako povezuje odkrivanje bolezni, izbiro bolnikov, zdravljenje in spremljanje uspešnosti zdravljenja v enoten pristop.



Slika 3: Teranostika – diagnostični (levo) in terapevtski (desno) posnetek vezave radiofarmaka na somatostatinske receptorje pri bolniku z dobro diferenciranim karcinoidom pljuč. Z rdečo puščico je prikazan primarni pljučni tumor; rumene puščice prikazujejo zelo številne zasevke v jetrih; z modro puščico je prikazan fiziološki privzem v hipofizi, vranici, ledvicah in urinu v mehurju. Zaradi ugodnejšega energijskega spektra pozitronskega sevalca galija (^{68}Ga) so posnetki diagnostične pozitronske emisijske tomografije v kombinaciji z računalniško tomografijo (PET/CT) po aplikaciji ^{68}Ga-DOTATOC (levo) precej bolj jasni, slika je manj zrnata, natančno se lahko določi razporeditev radiofarmaka v spremembah, velikih vsaj 5 mm. Posnetek terapevtskega radiofarmaka ^{177}Lu-DOTATATE je zaradi sevalnih lastnosti izotopa slabše kakovosti, vendar se razporeditev radioaktivnosti na obeh posnetkih ujema, zato lahko že na podlagi izhodiščnih diagnostičnih posnetkov celotnega telesa natančno predvidimo vezavo in razporeditev terapevtskega radiofarmaka. Slikovno gradivo je bilo pridobljeno na Onkološkem inštitutu Ljubljana v okviru klinične obravnave bolnika.

Zaključek

Radionuklidi elementov redkih zemelj imajo v sodobni nuklearni medicini pomembno mesto. Ker njihove kemijske sorodnosti omogočajo stabilno vključevanje v sorodne tarčne molekule in kelatne sisteme, njihove različne razpadne lastnosti odpirajo možnosti za diagnostično in terapevtsko uporabo v okviru istega ali zelo podobnega radiofarmacevtskega koncepta (Sadler idr., 2022; Koole idr., 2024; Gurin idr., 2022). V klinični praksi je med obravnavanimi radionuklidi trenutno najbolj uveljavljen ^{177}Lu, zlasti kot nosilec uspešno prevedenih teranostičnih pristopov pri dobro



diferenciranih nevroendokrinih tumorjih in napredovalem raku prostate, kar je dodatno utrdilo vlogo tarčnega radionuklidnega zdravljenja kot pomembnega dela sodobne onkologije (Al-Ibraheem idr., 2026; Zhang idr., 2025; Lepareur idr., 2023; Morgan idr., 2023).

Prihodnost področja najverjetneje ne bo temeljila zgolj na enem samem »optimalnem« radionuklidu, temveč na premišljeni izbiri radionuklida glede na velikost tumorskih žarišč, biološke značilnosti tarče, porazdelitev bolezni in pričakovano obremenitev zdravih tkiv (Lepareur idr., 2023; Primac idr., 2025; Sadler idr., 2022; Yeong idr., 2014). V tem okviru je ^{161}Tb posebej zanimiv kot obetavna nadaljnja razvojna možnost, saj poleg beta sevanja oddaja tudi nizkoenergijske elektrone, ki bi lahko bili koristni pri majhnih tumorskih žariščih in mikrometastatski bolezni, vendar njegova širša klinična vrednost še ni dokončno potrjena in ostaja predmet tekočih raziskav (Müller idr., 2018; Al-Ibraheem idr., 2026; Koole idr., 2024).

Ena ključnih ugotovitev je tudi, da bo nadaljnji napredek odvisen ne le od novih radionuklidov, temveč od sposobnosti, da zdravljenje resnično prilagodimo posameznemu bolniku. Teranostika pri tem ni le povezava med diagnostiko in terapijo, ampak praktičen okvir za izbor bolnikov, oceno izraženosti tarče, načrtovanje zdravljenja ter spremljanje porazdelitve radiofarmaka in odziva bolezni med zdravljenjem in po njem (Bodei idr., 2022; Zhang idr., 2025; Koole idr., 2024). Kljub temu se v večini okolij zdravljenje še vedno pogosto opira na standardne ali empirične aktivnosti, čeprav med bolniki obstajajo velike razlike v biodistribuciji, privzemu v tumorju, očistku in izpostavljenosti kritičnih organov (Lawhn-Heath idr., 2022; Piwowarska-Bilska idr., 2022; Al-Ibraheem idr., 2026; Yusufaly idr., 2025).

Glavne omejitve področja zato ostajajo pomanjkanje rutinske personalizirane dozimetrije, omejena standardizacija med centri, negotovosti pri kvantifikaciji doze, nepopolno razumevanje radiobiološkega odziva ter še vedno nezadostni biomarkerji za napoved odziva, toksičnosti in odpornosti (Bodei idr., 2022; Shanmugiah & Kim, 2026; Karimi idr., 2026). Dodaten praktični izziv predstavljajo proizvodnja, čiščenje in zanesljiva dobava ustreznih radionuklidov, kar je pri nekaterih manj uveljavljenih izotopih še vedno pomembna ovira za prehod iz raziskovalnega okolja v širšo klinično uporabo (Sadler idr., 2022; Müller idr., 2018). Poleg tehnoloških vprašanj bo za širšo uveljavitev nujno tudi tesnejše sodelovanje med nuklearno medicino, medicinsko fiziko, radiokemijo in klinično onkologijo ter ustrezno usposabljanje strokovnjakov za vse bolj kompleksno načrtovanje in izvajanje teh terapij (Shanmugiah & Kim, 2026; Bodei idr., 2022; Filippi idr., 2020).

Zato se zdi najpomembnejše končno sporočilo, da razvoj tarčnega radionuklidnega zdravljenja pomeni prehod od enotnega terapevtskega modela k vedno bolj molekularno usmerjenemu in individualiziranemu zdravljenju raka (Sun idr., 2022; Lepareur idr., 2023; Gandhi idr., 2025). Radionuklidi redkih zemelj bodo pri tem verjetno ostali pomemben del prihodnjega razvoja, vendar bo njihov dejanski klinični potencial v največji meri odvisen od tega, kako uspešno bo mogoče povezati ustrezno izbiro tarče, radionuklida, dozimetrije in bolnika v enoten, znanstveno utemeljen terapevtski pristop (Sadler idr., 2022; Shanmugiah & Kim, 2026; Yusufaly idr., 2025; Yeong idr., 2014).

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa *P1-0045* in projekta občanske znanosti *O1-0327*, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).



Literatura

Al-Ibraheem, A., Moghrabi, S., Al-Houwari, R. M., Al-Qasem, S., Abdulrahman, M., Alzorgan, N., Al-Qatawna, L. S., Al-Hammouri, Q., Ghanameh, M., Ruzzeh, S., & Abdlkadir, A. S. (2026). Future of radiotheranostics. *BMJ Oncology, 5*(2), e001073. https://doi.org/10.1136/bmjonc-2026-001073

Al-Khanaty, A., Chen, D., Walbaum, J., Hennes, D., Delgado, C., Dinneen, E., Eapen, R., Hofman, M. S., Azad, A. A., Murphy, D. G., Lawrentschuk, N., & Perera, M. (2026). Guideline of guidelines: Lutetium-177 PSMA radioligand therapy in advanced prostate cancer. *BJU International, 138*(3), 359–369. https://doi.org/10.1111/bju.70283

Barbieri, F., Bajetto, A., Pattarozzi, A., Gatti, M., Würth, R., Thellung, S., Corsaro, A., Villa, V., Nizzari, M., & Florio, T. (2013). Peptide receptor targeting in cancer: The somatostatin paradigm. *International Journal of Peptides, 2013*, 926295. https://doi.org/10.1155/2013/926295

Becx, M. N., Minczeles, N. S., Brabander, T., de Herder, W. W., Nonnekens, J., & Hofland, J. (2022). A clinical guide to peptide receptor radionuclide therapy with ^{177}Lu-DOTATATE in neuroendocrine tumor patients. *Cancers, 14*(23), 5792. https://doi.org/10.3390/cancers14235792

Bodei, L., Herrmann, K., Scott, A. M., & Lewis, J. S. (2022). Radiotheranostics in oncology: Current challenges and emerging opportunities. *Nature Reviews Clinical Oncology, 19*, 534–550. https://doi.org/10.1038/s41571-022-00652-y

Burkett, B. J., Bartlett, D. J., McGarrah, P. W., Lewis, A. R., Johnson, D. R., Berberoğlu, K., Pandey, M. K., Packard, A. T., Halfdanarson, T. R., Hruska, C. B., Johnson, G. B., & Kendi, A. T. (2023). A review of theranostics: Perspectives on emerging approaches and clinical advancements. *Radiology: Imaging Cancer, 5*(4), e220157. https://doi.org/10.1148/rycan.220157

Filippi, L., Chiaravalloti, A., Schillaci, O., Cianni, R., & Bagni, O. (2020). Theranostic approaches in nuclear medicine: Current status and future prospects. *Expert Review of Medical Devices, 17*, 331–343. https://doi.org/10.1080/17434440.2020.1741348

Fischer, M., & Kampen, W. U. (2012). Radionuclide therapy of bone metastases. *Breast Care, 7*(2), 100–107. https://doi.org/10.1159/000337634

Gandhi, N., Alaseem, A., Deshmukh, R., Patel, A., Alsaidan, O., Fareed, M., Alasiri, G. A., Patel, S., & Prajapati, B. G. (2025). Theranostics in nuclear medicine: The era of precision oncology. *Medical Oncology, 42*. https://doi.org/10.1007/s12032-025-03061-0

George, S. C., & Samuel, E. J. J. (2023). Developments in ^{177}Lu-based radiopharmaceutical therapy and dosimetry. *Frontiers in Chemistry, 11*, 1218670. https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1218670

Gurin, A., Chakrova, Y., Medvedeva, Z., & Soloninkina, S. G. (2022). Prospects for the development of nuclear medicine in the Republic of Kazakhstan: Reactor isotopes of rare earth elements for therapy. *NNC RK Bulletin*, (2), 46–52. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-46-52

Gurin, A., Chakrova, Y., Medvedeva, Z., Zakharov, V., & Kulakova, Y. (2023). Analysis of the production of rare-earth isotopes at the WWR-K research reactor: Promising therapeutic radionuclides. *NNC RK Bulletin*, (4), 40–46. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-40-46

Herrero Álvarez, N., Bauer, D., Hernández-Gil, J., & Lewis, J. S. (2021). Recent advances in radiometals for combined imaging and therapy in cancer. *ChemMedChem, 16*. https://doi.org/10.1002/cmdc.202100135

Joaqui-Joaqui, M. A., Sands, G. G., Śmiłowicz, D., Gork, M. J., Aluicio-Sarduy, E., Barnhart, T. E., Engle, J. W., & Boros, E. (2025). A trifunctional, rare-earth theranostic chelator platform to enable diagnostic nuclear imaging, surgical resection, and radiotherapy. *Journal of the American Chemical Society, 147*, 45303–45314. https://doi.org/10.1021/jacs.5c15147

Karimi, H., Shaffer, T., Stauff, E., Kandula, V. V. R., Kecskemethy, H. H., Averill, L., & Yue, X. (2026). Alpha and beta emitters in translational nuclear medicine: Clinical advances, challenges, and future direction. *International Journal of Molecular Sciences, 27*(5), 2290. https://doi.org/10.3390/ijms27052290



Klaassen, N. J. M., Arntz, M. J., Gil Arranja, A., Roosen, J., & Nijsen, J. F. W. (2019). The various therapeutic applications of the medical isotope holmium-166: A narrative review. *EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry, 4*, 19. https://doi.org/10.1186/s41181-019-0066-3

Koole, M., Deroose, C. M., Baete, K., Cocolios, T., Duchemin, C., Ooms, M., & Cleeren, F. (2024). Terbium radionuclides for theranostic applications in nuclear medicine: From atom to bedside. *Theranostics, 14*, 1720–1743. https://doi.org/10.7150/thno.92775

Kostelnik, T. I., & Orvig, C. (2019). Radioactive main group and rare earth metals for imaging and therapy. *Chemical Reviews, 119*(2), 902–956. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00294

Lawhn-Heath, C., Hope, T., Martinez, J., Fung, E. K., Shin, J., Seo, Y., & Flavell, R. (2022). Dosimetry in radionuclide therapy: The clinical role of measuring radiation dose. *The Lancet Oncology, 23*(2), e75–e87. https://doi.org/10.1016/S1470-2045(21)00657-4

Lepareur, N., Ramée, B., Mougin-Degraef, M., & Bourgeois, M. (2023). Clinical advances and perspectives in targeted radionuclide therapy. *Pharmaceutics, 15*(6), 1733. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15061733

Maes, J., Gesquière, S., De Spiegeleer, A., Maes, A., & Van de Wiele, C. (2024). Prostate-specific membrane antigen biology and pathophysiology in prostate carcinoma, an update: Potential implications for targeted imaging and therapy. *International Journal of Molecular Sciences, 25*(17), 9755. https://doi.org/10.3390/ijms25179755

Melis, D. R., Burgoyne, A., Ooms, M., & Gasser, G. (2022). Bifunctional chelators for radiorhenium: Past, present and future outlook. *RSC Medicinal Chemistry, 13*(3), 217–245. https://doi.org/10.1039/D1MD00364J

Morgan, K. A., Rudd, S. E., Noor, A., & Donnelly, P. S. (2023). Theranostic nuclear medicine with gallium-68, lutetium-177, copper-64/67, actinium-225, and lead-212/203 radionuclides: Focus review. *Chemical Reviews, 123*(20), 12004–12035. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00456

Müller, C., Domnanich, K. A., Umbricht, C. A., & van der Meulen, N. P. (2018). Scandium and terbium radionuclides for radiotheranostics: Current state of development towards clinical application. *The British Journal of Radiology, 91*, 20180074. https://doi.org/10.1259/bjr.20180074

Müller, C., van der Meulen, N. P., & Schibli, R. (2023). Opportunities and potential challenges of using terbium-161 for targeted radionuclide therapy in clinics. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 50*, 3181–3184. https://doi.org/10.1007/s00259-023-06316-y

Piwowarska-Bilska, H., Kurkowska, S., & Birkenfeld, B. (2022). Individualization of radionuclide therapies: Challenges and prospects. *Cancers, 14*(14), 3418. https://doi.org/10.3390/cancers14143418

Primac, I., Tabury, K., Tasdogan, A., Baatout, S., & Herrmann, K. (2025). The molecular blueprint of targeted radionuclide therapy. *Nature Reviews Clinical Oncology, 22*, 869–894. https://doi.org/10.1038/s41571-025-01069-z

Sadler, A., Hogan, L., Fraser, B. H., & Rendina, L. (2022). Cutting edge rare earth radiometals: Prospects for cancer theranostics. *EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry, 7*, 19. https://doi.org/10.1186/s41181-022-00173-0

Sartor, O., de Bono, J., Chi, K. N., Fizazi, K., Herrmann, K., Rahbar, K., Tagawa, S. T., Nordquist, L. T., Vaishampayan, N., El-Haddad, G., Park, C. H., Beer, T. M., Armour, A., Pérez-Contreras, W. J., DeSilvio, M., Kpamegan, E., Gericke, G., Messmann, R. A., Morris, M. J., & Krause, B. J. (2021). Lutetium-177–PSMA-617 for metastatic castration-resistant prostate cancer. *New England Journal of Medicine, 385*(12), 1091–1103. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2107322

Shanmugiah, J., & Kim, J. S. (2026). Personalised dosimetry in nuclear medicine: Bridging physics, biology and AI for next generation radiopharmaceutical therapy. *Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 60*, 221–249. https://doi.org/10.1007/s13139-026-00988-8

Stec, G. J., & Wilson, J. J. (2025). Coordination chemistry of emerging Meitner-Auger electron-emitting radiometals for targeted radionuclide therapy. *Coordination Chemistry Reviews, 542*, 216764. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216764



Stokke, C., Kvassheim, M., & Blakkisrud, J. (2022). Radionuclides for targeted therapy: Physical properties. *Molecules, 27*(17), 5429. https://doi.org/10.3390/molecules27175429

Stokkel, M. P. M., Gotthardt, M., Herrmann, K., & Gnanasegaran, G. (2025). Theranostics in perspective: White paper. *Journal of Nuclear Medicine, 66*(7), 1007–1011. https://doi.org/10.2967/jnumed.125.269776

Sun, J., Huangfu, Z., Yang, J., Wang, G., Hu, K., Gao, M., & Zhong, Z. (2022). Imaging-guided targeted radionuclide tumor therapy: From concept to clinical translation. *Advanced Drug Delivery Reviews, 190*, 114538. https://doi.org/10.1016/j.addr.2022.114538

Tong, A. K. T., Kao, Y. H., Too, C. W., Chin, K. F. W., Ng, D. C. E., & Chow, P. K. H. (2016). Yttrium-90 hepatic radioembolization: Clinical review and current techniques in interventional radiology and personalized dosimetry. *British Journal of Radiology, 89*, 20150943. https://doi.org/10.1259/bjr.20150943

Uccelli, L., Boschi, A., Cittanti, C., Martini, P., Panareo, S., Tonini, E., Nieri, A., Urso, L., Caracciolo, M., Lodi, L., Carnevale, A., Giganti, M., & Bartolomei, M. (2021). ^{90}Y/^{177}Lu-DOTATOC: From preclinical studies to application in humans. *Pharmaceutics, 13*(9), 1463. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091463

Wang, J., & Li, S. (2022). Applications of rare earth elements in cancer: Evidence mapping and scientometric analysis. *Frontiers in Medicine, 9*, 946100. https://doi.org/10.3389/fmed.2022.946100

Yeong, C., Cheng, M.-H., & Ng, K. (2014). Therapeutic radionuclides in nuclear medicine: Current and future prospects. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 15*, 845–863. https://doi.org/10.1631/jzus.B1400131

Yusufaly, T., Roncali, E., Brosch-Lenz, J., Uribe, C., Jha, A. K., Currie, G. M., Dutta, J., El-Fakhri, G., McMeekin, H., Pandit-Taskar, N., Schwartz, J., Shi, K., Strigari, L., Zaidi, H., Saboury, B., & Rahmim, A. (2025). Computational nuclear oncology toward precision radiopharmaceutical therapies: Current tools, techniques, and uncharted territories. *Journal of Nuclear Medicine, 66*(4), 509–515. https://doi.org/10.2967/jnumed.124.267927

Zhang, S., Wang, X., Gao, X., Chen, X., Li, L., Li, G., Liu, C., Miao, Y., Wang, R., & Hu, K. (2025). Radiopharmaceuticals and their applications in medicine. *Signal Transduction and Targeted Therapy, 10*, 1. https://doi.org/10.1038/s41392-024-02041-6

Iridijeve(III) koordinacijske spojine kot alternativa cisplatinu za zdravljenje rakavih tumorjev

Zarja Uranjek[1,2]

[1] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Ljubljana
[2] Institut »Jožef Štefan«, Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana

**e-mail: zu0669@student.uni-lj.si*

Povzetek

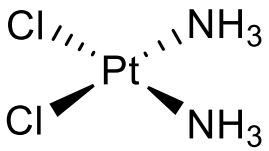
Rakava obolenja predstavljajo resen zdravstveni problem sodobne družbe, zato potekajo številne raziskave novih in učinkovitejših zdravil. Pomembne protitumorske učinkovine so tudi koordinacijske spojine, med katerimi je najbolj znan cisplatin. Njegovo uporabo omejujejo neželeni učinki in razvoj odpornosti, zato se iščejo primerne alternative. Ena izmed možnosti je zamenjava platine z drugim kovinskim centrom, na primer iridijem (Ir), ki ima podobne kemijske in fizikalne lastnosti ter omogoča tvorbo številnih biološko aktivnih koordinacijskih spojin. V prispevku so predstavljene lastnosti Ir(III) kompleksov ter vpliv njihove strukture, ligandov, stabilnosti in reaktivnosti na protitumorsko delovanje.

Ključne besede: koordinacijska kemija, cisplatin, platinska skupina, iridij, protitumorsko delovanje

Uvod

Organokovinske koordinacijske spojine so uporabne pri zdravljenju rakavih tumorjev zaradi njihovih elektronskih in strukturnih lastnosti. Pogosto so te nekakšna »predzdravila«, ki se v aktivno obliko pretvorijo šele v telesu ali po dosegu ciljnega mesta v njem. Aktivirajo se na različne načine, na primer z disociacijo labilnega liganda, odpiranjem kelatnih obročev, spremembo oksidacijskega stanja kovinskega centra ali z uporabo zunanjih dražljajev, kot so svetloba, sevanje, ultrazvok in toplota (Yusoh idr., 2025).

Ena izmed najbolj uporabljenih koordinacijskh spojin za zdravljenje raka je *cis*-diamindikloridoplatin(II) oz. cisplatin (**Slika 1**).



Slika 1: Strukturna formula cisplatina.

Kljub njegovi učinkovitosti uporabo omejujejo razvoj odpornosti na zdravljenje in številni neželeni učinki, med drugim nefrotoksičnost, kardiotoksičnost in hepatotoksičnost. Zato potekajo številne raziskave, usmerjene v razvoj učinkovitejših in manj toksičnih alternativ. Razvoj poteka tako na področju novih zdravil na osnovi platine kot tudi koordinacijskih spojin drugih kovin. Možni pristopi vključujejo modifikacijo platinskega kovinskega centra, uporabo spremljevalnih učinkovin

ter razvoj analogov na osnovi drugih kovin (Mandal, 2025). Pri zadnjem pristopu se raziskujejo koordinacijske spojine drugih kovin, ki bi lahko predstavljale alternativo platinskim zdravilom. Njihovo strukturno raznolikost je mogoče doseči s spreminjanjem kovinskega centra, ligandov in interakcij med njimi, kar omogoča razvoj spojin z različnimi lastnostmi in mehanizmi delovanja (Yusoh idr., 2025).

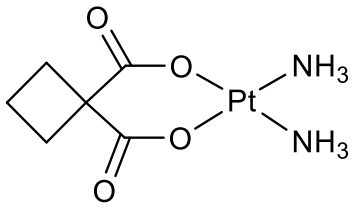
Novejše raziskave preučujejo iridij kot možen kovinski center za razvoj alternativ platinskim protitumorskim učinkovinam. Iridij skupaj s platino, rutenijem, rodijem, paladijem in osmijem uvrščamo med kovine platinske skupine. Gre za šest redkih in plemenitih kovin s podobnimi fizikalnimi in kemijskimi lastnostmi, ki se v naravi pogosto pojavljajo skupaj (Mandal, 2025). V oceni kritičnih surovin Evropske unije iz leta 2023 so bile kovine te skupine (razen osmija) obravnavane kot kritične surovine (Grohol & Veeh, 2023). Kritične surovine imajo velik gospodarski pomen in so ključne za številne industrijske panoge ter sodobne tehnologije, pomembno vlogo pa imajo tudi pri razvoju čistih tehnologij (European Commission, b. d.).

Zdravljenje raka na osnovi platine

Zdravila na osnovi platine ostajajo temelj zdravljenja nekaterih tumorjev, med drugim raka jajčnikov, testisov in nedrobnoceličnega raka pljuč. V takih primerih so odobrena tako v obliki monoterapije kot za uporabo v kombinacijskih shemah. Pomembno omejitev zdravljenja predstavlja razvoj odpornosti na platinske učinkovine, zaradi česar so številne raziskave usmerjene v razvoj novih kombinacijskih pristopov, še posebej usmerjenega zdravljenja in imunoterapije (Yusoh idr., 2025).

Prvi je cisplatin sintetiziral Michele Peyrone leta 1844, vendar je njegovo protitumorsko delovanje odkril Barnett Rosenberg šele leta 1965. Leta 1978 se je cisplatin začel uporabljati tudi v klinični praksi pod komercialnim imenom Platinol. Mehanizem njegovega delovanja je dobro raziskan in ga lahko v grobem razdelimo na štiri korake: celični vnos, aktivacijo, vezavo na DNK in celični odziv, ki vodi v apoptozo. Po vstopu v celico poteka akvacija cisplatina, pri kateri se kloridna liganda zamenjata z molekulami vode. Nastali akva kompleksi so močni elektrofili in lahko reagirajo z donorskimi dušikovimi atomi v nukleinskih kislinah. Glavna tarča cisplatina je torej DNK, pri čemer se kompleks veže predvsem na *N*-atome gvanina in adenina ter tvori različne mono- in bifunkcionalne adukte. Takšne poškodbe DNK sprožijo celične procese, ki lahko vodijo v apoptozo. Pri zdravljenju s cisplatinom se lahko razvije pridobljena odpornost, kar zmanjšuje učinkovitost terapije in je eden izmed razlogov za razvoj analogov cisplatina druge in tretje generacije (Mandal, 2025; Yusoh idr., 2025).

Karboplatin je eden izmed prvih analogov cisplatina (**Slika 2**). Razvit je bil z namenom zmanjšanja njegove toksičnosti in je bil v klinično prakso uveden leta 1981. Z njegovo uporabo so zmanjšali nekatere neželene učinke cisplatina, vendar jih niso popolnoma odpravili. Zato postajajo vse bolj aktualne raziskave zdravil na osnovi drugih kovin (Mandal, 2025).



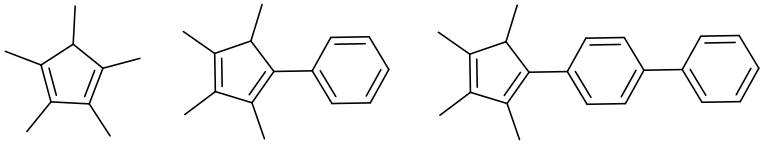
Slika 2: Strukturna formula karboplatina.



Iridij kot alternativa platini

Iridij je primerna zamenjava platine zaradi podobnih kemijskih in fizikalnih lastnosti. Zanimiv je tudi zaradi različnih oksidacijskih stanj, koordinacijskih števil in geometriji ter katalitskih lastnosti, zaradi česar lahko tvori številne strukturno in funkcionalno različne koordinacijske spojine. Te z optimizacijo ligandov tvorijo široko izbiro spojin z biološkimi aktivnostmi kot so antibakterijsko delovanje, zaviranje angiogeneze ter lajšanje bolečin pri poškodbah hrbtenjače. Uporabljajo se tudi kot reagenti za biološko slikanje. Posebej pomembna je možnost prilagajanja njihove lipofilnosti, stabilnosti, celičnega privzema in mehanizma delovanja. Bolj lipofilni in stabilni kompleksi praviloma lažje prehajajo skozi celično membrano in se v celicah kopičijo v večji meri, medtem ko lahko preveč reaktivni ali nestabilni kompleksi reagirajo še preden dosežejo svojo tarčo (Mandal, 2025; Wang idr., 2020). Številni Ir(III) kompleksi izkazujejo močno citotoksičnost proti tumorskim celicam, pri nekaterih pa je bila opažena tudi večja selektivnost za rakave kot za zdrave celice. Njihovo delovanje pogosto vključuje nastajanje reaktivnih kisikovih zvrsti (ROS), motnje delovanja mitohondrijev, zaustavitev celičnega cikla ter indukcijo apoptoze (Mandal, 2025).

Pri sintezi uporabnih iridijevih koordinacijskih spojin je treba doseči ustrezno ravnotežje med stabilnostjo in reaktivnostjo. Ker številne kovinske učinkovine delujejo kot »predzdravila«, mora biti substitucija ligandov dovolj počasna, da kompleks doseže tarčno mesto, vendar hkrati dovolj hitra, da se tam lahko aktivira in reagira z biološko tarčo. Ir(III) je v oktaedričnem polju praviloma nizkospinski d^6 ion in zato kinetično inerten. Takšna inertnost je lahko prednost, saj poveča stabilnost koordinacijske spojine v biološkem okolju. Lahko pa je preveč inerten in se na tarčnem mestu ne aktivira. Zato je pomembna izbira ligandov. π-vezani arenski in ciklopentadienilni ligandi pomembno vplivajo na fizikalne in kemijske lastnosti spojin, predvsem na njegovo lipofilnost in posledično na prehod skozi celično membrano ter kopičenje v celici. Negativno nabiti ciklopentadienilni ligandi, kot je pentametilciklopentadienil (Cp*) dobro stabilizirajo Ir(III) koordinacijske spojine, ker tvorijo močne Ir–C vezi. Strukturna formula Cp*H in njegovih modifikacij s substituentami so prikazane na **Sliki 3**.



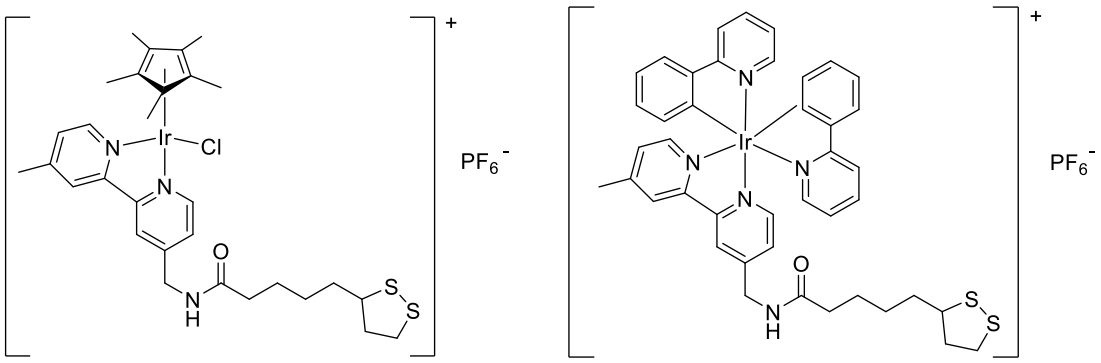
*Slika 3: Strukture – od leve proti desni: Cp*H, CpxphH, CpxbiphH.*

Dokazano je bilo, da so Ir(III) koordinacijske spojine s Cp* ali funkcionaliziranim Cp* in kelatnimi ligandi, kot so 1,10-fenantrolin (phen), 2,2'-bipiridin (bpy), etilendiamin (en) in *N,O*-vezan pikolinat (pico), termodinamsko stabilni. Če pa imajo takšne spojine še kloridni ligand, so lahko pri substitucijskih reakcijah hkrati kinetično labilne, saj lahko hitro hidrolizirajo. Nastale akva-spojine so praviloma reaktivnejše od ustreznih klorido spojin, zato lahko hidroliza vezi Ir–*Cl* predstavlja pomemben aktivacijski korak, podobno kot pri cisplatinu. Substituenti na ciklopentadienilnem obroču in kelatnem ligandu lahko močno vplivajo na kemijske in biološke lastnosti kompleksov (Liu idr., 2011).

Vpliv substituentov na biološko aktivnost je dobro viden pri polsendvičnih Ir(III) kompleksih s že prej omenjenimi kelatnimi ligandi. Koordinacijska spojina $[IrCl(\eta^5\text{-}Cp^{xbipi})(phen)]^+$ ima veliko biološko aktivnost. Raziskovalci so to pripisali prisotnosti večjih in bolj hidrofobnih aromatskih substituent (Cp^{xbipi}), ki poveča lipofilnost kompleksa To je skladno z njegovim večjim kopičenjem v celicah in posledično večjo citotoksičnostjo. V celici poteče substitucija kloridnega iona z

molekulo vode, tako se spojina aktivira. Nato pride do koordinacije dušikovega atoma gvaninskih ostankov v DNK. Poleg te interakcije je možna še interkalacija obsežnega aromatskega dela Cp^{xbipi} med bazne pare. Kombinacija učinkovitega celičnega privzema, aktivacije s hidrolizo in interakcij z DNA tako pomembno prispeva k visoki citotoksičnosti te Ir(III) koordinacijske spojine (Liu idr., 2011).

Dober primer vpliva strukture kompleksa na njegovo protitumorsko aktivnost predstavljata tudi dve Ir(III) koordinacijski spojini, ki vsebujeta funkcionalizirano α-lipojsko kislino (**Slika 4**).



Slika 3: Ir(III) koordinacijska spojina z labilno Ir–Cl vezjo in druga z bolj inertno Ir–C vezjo.

Prva spojina ima polsendvično strukturo in vsebuje labilno vez Ir–*Cl*, ki v vodnem okolju zlahka hidrolizira. Zaradi manjše stabilnosti lahko kompleks reagira z biološkimi nukleofili, na primer z glutationom, še preden doseže tarčno mesto. Druga spojina je ciklometalirana, pri čemer močne vezi Ir–*C* prispevajo k večji stabilnosti koordinacijske sfere. Posledično je kompleks stabilnejši v vodnem mediju, bolj lipofilen in se učinkoviteje kopiči v celicah. Primerjava obeh spojin tako pokaže, kako lahko sprememba koordinacijske strukture bistveno vpliva na stabilnost, reaktivnost, celični privzem in biološko aktivnost iridijeve koordinacijske spojine (Wang idr., 2020).

Zaključek

Razvoj novih kovinskih protitumorskih učinkovin je usmerjen predvsem v iskanje spojin, ki bi ohranile visoko učinkovitost cisplatina, hkrati pa zmanjšale njegove omejitve, kot so nastanek odpornosti in toksičnost. Iridijeve koordinacijske spojine so pri tem zanimive zaradi velike strukturne prilagodljivosti in možnosti natančnega uravnavanja njihovih fizikalnih in kemijskih lastnosti. Z izbiro ustreznih ligandov je mogoče vplivati na stabilnost, reaktivnost, lipofilnost in celični privzem koordinacijskih spojin ter s tem na njihovo biološko delovanje.

Primeri obravnavanih spojin kažejo, da lahko že manjše spremembe v koordinacijskem okolju močno vplivajo na njihovo biološko aktivnost. Nekateri Ir(III) kompleksi izkazujejo visoko citotoksičnost in dobro selektivnost proti tumorskim celicam, vendar je večina raziskav za zdaj omejena predvsem na *in vitro* študije. Za oceno njihove dejanske uporabnosti pri zdravljenju raka bodo zato potrebne nadaljnje *in vivo* in klinične raziskave.

Literatura

European Commission. (b. d.). *Critical raw materials*. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en



Grohol, M., & Veeh, C. (2023). *Study on the critical raw materials for the EU 2023: Final report*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2873/725585

Liu, Z., Habtemariam, A., Pizarro, A. M., Fletcher, S. A., Kisova, A., Vrana, O., Salassa, L., Bruijnincx, P. C. A., Clarkson, G. J., Brabec, V., & Sadler, P. J. (2011). Organometallic half-sandwich iridium anticancer complexes. *Journal of Medicinal Chemistry*, *54*(8), 3011–3026. https://doi.org/10.1021/jm2000932

Mandal, A. (2025). Iridium complexes in cancer treatment: A promising complement to Cis-platin – A mini review. *Journal of Organometallic Chemistry*, *1040*, 123814. https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2025.123814

Wang, M.-M., Xue, X.-L., Sheng, X.-X., Su, Y., Kong, Y.-Q., Qian, Y., Bao, J.-C., Su, Z., & Liu, H.-K. (2020). Unveiling the anti-cancer mechanism for half-sandwich and cyclometalated Ir(III)-based complexes with functionalized α-lipoic acid. *RSC Advances*, *10*(9), 5392–5398. https://doi.org/10.1039/C9RA10357K

Yusoh, N. A., Ahmad, H., Vallis, K. A., & Gill, M. R. (2025). Advances in platinum-based cancer therapy: Overcoming platinum resistance through rational combinatorial strategies. *Medical Oncology*, *42*(7), 262. https://doi.org/10.1007/s12032-025-02812-3



Elementi redkih zemelj v jabolkih: prisotnost v tleh, porazdelitev v rastlini in njihov vpliv nanjo

Florijan Rauter[1,2], Taj Žmitek Pravst[1,2], Patricija Lap[2], Maja Ponikvar–Svet[2], Gašper Tavčar[2], Katja Žmitek[3,4], Igor Pravst[3,4], Anita Kušar[3,4], Martina Oder[5], Marko Jeran[2,*]

[1] Biotehniški izobraževalni center, Gimnazija in veterinarska šola, Ljubljana
[2] Institut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana
[3] Inštitut za nutricionistiko, Ljubljana
[4] Fakulteta za aplikativne vede, Ljubljana
[5] Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta, Oddelek za sanitarno inženirstvo, Ljubljana

**e-mail: floki789rau@gmail.com; taj.zmitek.pravst@icloud.com; marko.jeran@ijs.si*

Povzetek

Lantanoidi oz. elementi redkih zemelj so skupina kemijskih elementov, ki se naravno pojavljajo v kamninah, mineralih in tleh, hkrati pa se zaradi svojih specifičnih lastnosti vse pogosteje uporabljajo v sodobnih tehnologijah. Zaradi njihove naravne prisotnosti in naraščajoče uporabe se povečuje tudi zanimanje za njihov vpliv na okolje, rastline in prehransko verigo. Namen pregleda literature je bil oceniti prisotnost lantanoidov v tleh ter njihov privzem, prenos in kopičenje v rastlinah in drugih organizmih, s posebnim poudarkom na užitnih delih. Pregled raziskav kaže, da prisotnost lantanoidov v tleh sama po sebi ne pomeni njihovega pomembnega kopičenja v užitnih delih rastlin. Njihov privzem je odvisen od koncentracije in kemijske oblike elementov v tleh ter drugih lastnosti tal, medtem ko se po rastlini praviloma ne razporejajo enakomerno. Koncentracije so pogosto najvišje v koreninah in se proti nadzemnim oziroma užitnim delom zmanjšujejo. Podobno omejeno kopičenje v užitnih delih je bilo ugotovljeno tudi pri drugih rastlinah. Na vsebnost lantanoidov lahko poleg naravne prisotnosti v tleh vplivajo tudi antropogeni viri, med katerimi so lahko pomembna fosfatna gnojila. Pregled ugotovitev tako kaže, da je prenos lantanoidov iz tal v rastline in njihovo morebitno kopičenje v prehranski verigi kompleksen proces, ki je odvisen od številnih okoljskih in bioloških dejavnikov.

Ključne besede: elementi redkih zemelj, lantanoidi, jabolka, rastline, biološka aktivnost

Uvod

Lantanoidi so skupina elementov redkih zemelj (REE), ki imajo zaradi svojih značilnih kemijskih lastnosti pomembno vlogo v različnih tehnoloških in industrijskih področjih. V naravi niso prisotni kot posamezni, izolirani elementi, temveč se pojavljajo predvsem v mineralih in kamninskem materialu, kar pomeni da so posledično prisotni tudi v tleh. Njihova prisotnost v tleh predstavlja izhodišče za njihovo morebitno vključevanje v biogeokemijske procese in privzemanje v žive organizme. Zaradi povečane uporabe redkih zemelj se povečuje tudi zanimanje za njihovo obnašanje v okolju. V raziskavi Falandysz idr. (2024) je bilo pokazano, da je povečana in raznolika uporaba REE lahko eden od virov njihovega sproščanja v okolje. Redke zemlje so lahko prisotne v talnem substratu, iz katerega jih organizmi lahko izčrpajo. Njihova prisotnost v okolju zato odpira vprašanje, v kolikšni meri se lahko prenesejo v rastline in živila s sestavinami rastlinskega izvora. Pri sadnem drevju je to vprašanje posebej zanimivo, saj je plod del rastline, ki ga človek zaužije. Jabolko je zato primeren model za razumevanje poti elementov iz tal do užitnega dela rastline.



Raziskava Squadrone idr. (2020) omogoča vpogled v dejansko vsebnost redkih zemelj v jabolčnih plodovih in v sposobnost njihovega prenosa iz tal.
Cilj tega prispevka je predstaviti, kako se lantanoidi pojavljajo v okolju, kako lahko pridejo v tla ter kako lahko potujejo iz tal v rastlino in naprej v plod jablane. Pri tem so uporabljena spoznanja iz raziskav na jablanah ter dopolnilni podatki o citrusih, zelenjadnicah in gobah, ki pomagajo razumeti splošne značilnosti vnosa in razporeditve REE v živih organizmih.

Lantanoidi

Elementi redkih zemelj so v naravi prisotni v kamninah, glinah in vrhnjih plasteh tal. Med lantanoide, ki se najpogosteje obravnavajo pri okoljskih raziskavah, sodijo lantan (La), cerij (Ce), prazeodim (Pr), neodim (Nd), samarij (Sm), evropij (Eu), gadolinij (Gd), terbij (Tb), disprozij (Dy), holmij (Ho), erbij (Er), tulij (Tm), iterbij (Yb) in lutecij (Lu). V širši skupini REE se pogosto upoštevata tudi skandij (Sc) in itrij (Y) (Falandysz idr., 2024; Turra idr., 2019).
Za razumevanje njihovega privzemanja v rastline je pomembno, da so REE prisotne že v naravnem okolju. Njihova koncentracija v tleh je povezana z geološko sestavo in z lastnosti mineralov, iz katerih so nastala.

Lantanoidi v tleh in njihov vnos v kmetijski sektor

Elementi, ki se nahajajo v tleh, so lahko v različni meri dostopni rastlinam, njihov privzem v koreninski sistem pa je odvisen od njihove oblike in lastnosti rastnega okolja. Poseben primer predstavljajo fosfatna gnojila. Turra idr. (2019) so proučevali vnos REE v rastline citrusov po uporabi superfosfatnega gnojila. Avtorji ugotavljajo, da se lahko v nekaterih fosfatnih gnojilih REE pojavljajo v koncentracijah, ki so za en do dva velikostna reda višje od koncentracij v običajnih kmetijskih zemljiščih. Njihova raziskava je pokazala, da je uporaba superfosfatnega gnojila povzročila povečanje vsebnosti REE v rastlinskih tkivih. To pomeni, da lahko gnojenje vpliva na količino redkih zemelj v rastlinah. Vendar povečana koncentracija v tleh še ne pomeni, da bo enaka količina prešla v užitni del rastline. Med tlemi in plodom obstajajo številni procesi, ki določajo, kolikšno količino elementa bo rastlina dejansko izčrpala in kam se bo nato razporedil.

Količina lantanoidov v posameznih delih rastline

Privzem lantanoidov iz tal v rastlino se začne pri koreninskem sistemu. Ko so elementi v obliki, ki je dostopna rastlini, lahko preidejo iz talne raztopine v korenine. Nadaljnja pot elementov po rastlini pa ni nujno enakomerna. To jasno kažejo podatki raziskave avtorjev Fiket in Medunić (2023), kjer je bila analizirana razporeditev REE v šestih vrstah zelenjadnic. Raziskava je zajela korenine in čebulice, stebla ter liste. Ugotovljen je bil značilen vzorec, pri katerem so bile koncentracije REE praviloma najvišje v koreninah. Vsebnost se je nato zmanjševala v smeri proti listom, steblom in drugim rastlinskim delom (Fiket & Medunić, 2023).
Takšen vzorec je pomemben tudi pri razumevanju sadnih rastlin. Če se pomemben delež privzetih elementov zadrži v koreninskem sistemu, bo količina elementov, ki doseže oddaljene nadzemlne dele, manjša.

Prisotnost lantanoidov v jabolčnih plodovih

Neposreden podatek o prisotnosti lantanoidov v jabolkih ponuja raziskava Squadrone idr. (2020). Raziskovalci so v jabolkih iz severozahodne Italije analizirali 40 elementov. Raziskava je zajela štiri kultivarje jablan iz skupin Red Delicious in Gala, pri določanju elementov pa je bila uporabljena metoda ICP–MS. Rezultati so pokazali, da so bile koncentracije REE v jabolkih zanemarljive.



Hkrati so bili izračunani bioakumulacijski faktorji, ki so pokazali izjemno nizko sposobnost privzemanja analiziranih elementov iz tal v plod (Squadrone idr., 2020).
To je pomembna ugotovitev za razumevanje naslova tega prispevka. Prisotnost lantanoidov v tleh namreč sama po sebi še ne pomeni njihovega pomembnega kopičenja v jabolku. Med koreninami, rastlinskimi tkivi in plodom poteka selektiven proces prenosa, zaradi katerega je končna vsebnost v plodu lahko zelo majhna.
Squadrone idr. (2020) so poleg navedenega ugotovili, da je bil celoten večelementni kemijski profil jabolk povezan s tlemi njihovega izvora. To pove, da imajo tla pomembno vlogo pri elementarni sestavi pridelka, vendar se posamezni elementi v plodu ne pojavljajo nujno v enakih koncentracijah, kot so prisotni v tleh.

Vpliv povečane vsebnosti lantanoidov na rastline

Poleg vprašanja, koliko lantanoidov preide v rastlino, je pomembno tudi vprašanje, kako lahko vplivajo na njeno rast in delovanje. Yin idr. (2021) so proučevali vpliv različne podlage za gojenje agrumov (citrusov) koncentracij lantana na sadike citrusnih podlag (agrumov). Rezultati so pokazali, da je bil odziv odvisen od koncentracije lantana. Pri koncentracijah do 0,5 mmol/L je bila rast sadik stimulirana, medtem ko je bila pri koncentracijah nad 1 mmol/L rast inhibirana. Pri višjih koncentracijah so se pojavili tudi znaki toksičnosti, pri 4 mmol/L pa so bile pri nekaterih rastlinah opazne spremembe listov, vključno z rumenenjem in pokanjem žil. Pri nekaterih citrusih se je pri visokih koncentracijah zmanjšala tudi vsebnost klorofila in karotenoidov (Yin idr., 2021). Ti rezultati kažejo, da je vpliv lantanoidov na rastline odvisen od njihove koncentracije. Njihova prisotnost v okolju zato sama po sebi nima nujno biološkega učinka.

Razprava

Rezultati dosedanjih raziskav dokazujejo, da je pri obravnavi lantanoidov v prehrani potrebno jasno ločiti med njihovo prisotnostjo v okolju in njihovo dejansko koncentracijo v užitnem delu rastlin. Tla lahko vsebujejo REE, vendar se med prehajanjem le-teh v rastline in njihovim razporejanjem po rastlinskih delih koncentracije praviloma močno zmanjšajo. V raziskavi Squadrone idr. (2020) so bile koncentracije REE v plodovih rastline (jabolkih) zanemarljive, zaradi česar na podlagi te raziskave ni mogoče govoriti o pomembnem kopičenju lantanoidov v proučevanih plodovih. Ker so bili analizirani konkretni vzorci iz severozahodne Italije, rezultata brez dodatnih raziskav ni mogoče neposredno posplošiti na vse sorte in vse rastne razmere. Da gre pri tem za širši, ne le lokalno omejen pojav, potrjujejo tudi podatki pri zelenjadnicah in gobah, kjer so bile koncentracije REE v užitnih delih dosledno nižje od koncentracij v tleh oziroma substratu (Falandysz idr., 2024; Fiket & Medunić, 2023). Biološko izključevanje se torej kaže kot mehanizem, ki presega meje ene same rastlinske vrste ali celo kraljestva (rastline in glive). Vendar pa je navedene ugotovitve potrebno tolamačiti kritično in ne kot dokončno zagotovilo.
Vse omenjene raziskave so bile opravljene na tleh z razmeroma običajno oz. zmerno vsebnostjo REE. Nobena izmed njih ni neposredno testirala razmer na močno degradiranih ali onesnaženih območjih kot so območja v bližini rudarjenja redkih zemeljskih elementov, intenzivne industrijske dejavnosti ali odpadov, kjer so lahko koncentracije REE v tleh za velikostne rede višje. Prav zato je pri pridelavi hrane na takih območjih potrebna posebna previdnost, saj zmogljivost korenin, da lantanoide zadržijo in preprečijo njihov prenos v plod, ni neomejena. To potrjuje raziskava Yin idr. (2021), ki je dokazala, da povišane koncentracije lantana pri agrumnih podlagah zavirajo rast in razvoj korenin ter poganjkov. Varnost jabolk in podobnega sadja pred lantanoidi ni odvisna od lastnosti rastline same, temveč je rezultat ravnovesja med koncentracijo v okolju in zmogljivostjo zadrževanja lantanoidov v koreninah rastline. Ta ugotovitev odpira tudi širša vprašanja. Naraščajoča svetovna poraba redkih zemelj v elektroniki in obnovljivih virih energije pomeni, da se bo njihovo sproščanje v okolje, bodisi preko rudarjenja, atmosferskih usedlin ali prek fosfatnih



gnojil (Turra idr., 2019) v prihodnosti verjetno le še povečevalo. Trenutno zanemarljive koncentracije v jabolkih niso nujno trajne ugotovitve, temveč dokazujejo trenutno stanje. Kmetijstvo na območjih z degradiranimi ali onesnaženimi tlemi zato zahteva več kot le zaupanje v to, da bo rastlina sama zaščitila pridelek pred lantanoidi. Potrebno je redno spremljanje kakovosti tal, saj se lahko enaka rastlinska vrsta na različno obremenjenih talnih površinah obnaša drugače.

Zaključek

Lantanoidi so naravno prisotni v kamninah in tleh, od koder lahko pri določenih pogojih vstopajo v rastline. Poleg geološke sestave tal k prehajanju lantanoidov v rastline prispevajo tudi zunanji dejavniki, predvsem fosfatna gnojila (Turra idr., 2019). Ko elementi pridejo v stik s koreninskim sistemom, jih rastlina lahko privzame, vendar njihov nadaljnji prenos po rastlini ni enakomeren, redke zemlje se praviloma v največji meri zadržujejo v koreninah, kar so pokazale raziskave na zelenjadnicah (Fiket & Medunić, 2023) in gobah (Falandysz idr., 2024). Pri jablanah je bil prenos lantanoidov po rastlini do plodu omejen, zaradi česar so bile v plodovih izmerjene le zanemarljive koncentracije REE (Squadrone idr., 2020). Vendar ta sposobnost uravnavanje koncentracije REE v rastlini ni absolutna, temveč je koncentracijsko odvisen pojav. Raziskava Yin idr. (2021) dokazuje, da lahko povišane koncentracije lantana pri agrumih zavirajo rast in razvoj rastline, kar pove, da lahko dovolj visoka okolijska obremenitev to sposobnost oslabi ali preseže. Ker se svetovna poraba redkih zemelj zaradi tehnološkega razvoja povečuje, trenutno ugotovljena nizka tveganja ne pomenijo trajne potrditve, temveč rezultat, ki ga je treba redno preverjati, zlasti na območjih z degradiranimi ali industrijsko obremenjenimi tlemi.

Zahvala

Raziskava je bila izvedena v okviru temeljnih raziskovalnih programov *»Prehrana in javno zdravje«* (P3-0395) in *»Anorganska kemija in tehnologija«* (P1-0045), ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS), ter raziskovalnega projekta *»NutriPlant«* (L7-50154), ki ga financirata ARIS in Ministrstvo za kmetijstvo Republike Slovenije. Del raziskave je bil izveden tudi v okviru projekta občanske znanosti *»Opolnomočenje skupnosti: širjenje državljanske znanosti za trajnostno upravljanje z elementi redkih zemelj«* (O1-0327), ki ga financira ARIS.

Literatura

Falandysz, J., Kilanowicz, A., Fernandes, A. R., & Zhang, J. (2024). Rare earth contamination of edible vegetation: Ce, La, and summed REE in fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *108*(1), 268. https://doi.org/10.1007/s00253-024-13087-5

Fiket, Ž., & Medunić, G. (2023). Dataset of rare earth elements distribution in soils and vegetables. *Results in Earth Sciences*, *1*, 100004. https://doi.org/10.1016/j.rines.2023.100004

Squadrone, S., Brizio, P., Stella, C., Mantia, M., Pederiva, S., Giordanengo, G., Pistone, G., & Abete, M. C. (2020). Distribution and bioaccumulation of trace elements and lanthanides in apples from Northwestern Italy. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, *62*, 126646. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126646

Turra, C., De Nadai Fernandes, E. A., Bacchi, M. A., Sarriés, G. A., & Reyes, A. E. L. (2019). Uptake of rare earth elements by citrus plants from phosphate fertilizers. *Plant and Soil*, *437*(1–2), 291–299. https://doi.org/10.1007/s11104-019-03979-1

Yin, H., Wang, J., Zeng, Y., Shen, X., He, Y., Ling, L., Cao, L., Fu, X., Peng, L., & Chun, C. (2021). Effect of the rare earth element lanthanum (La) on the growth and development of citrus rootstock seedlings. *Plants*, *10*(7), 1388. https://doi.org/10.3390/plants10071388



Uporaba jajčnih lupin kot naravnega adsorbenta za bakrove (Cu^{2+}) ione

David Pavlović[1], Aleksandra Ferenc[1]

[1] Šolski center Celje, Srednja šola za kemijo, elektrotehniko in računalništvo, Celje

**e-mail: david.pavlovic2211@gmail.com; aleksandra.ferenc@sc-celje.si*

Povzetek

Bakrovi ioni (Cu^{2+}) so pogost onesnaževalec vodnih okolij, saj se v vode sproščajo iz industrijskih procesov, rudarske dejavnosti in korozije kovinskih materialov. Namen raziskave je bil proučiti možnost uporabe jajčnih lupin kot naravnega adsorbenta za odstranjevanje bakrovih ionov iz vodnih raztopin. Jajčne lupine smo razdelili na tri skupine: nežgane, žgane pri 700 °C in žgane pri 900 °C. Po adsorpciji smo v raztopini preostalo koncentracijo bakrovih ionov določili s spektrofotometrijo. Rezultati so pokazali, da so vse vrste jajčnih lupin uspešno odstranjevale bakrove ione, največji izkoristek adsorpcije pa so dosegle kalcinirane lupine. Uspešnost adsorpcije je pri nežganih lupinah znašala 74,48 %, pri lupinah žganih na 700 °C 99,18 %, pri lupinah žganih na 900 °C pa 99,26 %. Raziskava potrjuje, da so jajčne lupine učinkovit, cenovno dostopen in okolju prijazen adsorbent za odstranjevanje bakrovih ionov iz vode.

Ključne besede: bakrovi ioni, Cu^{2+}, onesnaženje, adsorpcija, jajčne lupine, kalcinacija

Uvod

Bakrovi ioni (Cu^{2+}) spadajo med najpogostejše kovinske onesnaževalce vodnih sistemov. V okolje lahko prehajajo iz industrijskih procesov, rudarske dejavnosti, galvanizacije, proizvodnje električnih komponent ter zaradi korozije bakrenih cevi. V manjših koncentracijah je baker esencialen element za žive organizme, vendar lahko povišane koncentracije povzročajo negativne vplive na vodne ekosisteme in zdravje ljudi (Synevo Slovenija, b. d.; Toksične težke kovine, b. d.). Zaradi tega je razvoj učinkovitih in cenovno dostopnih metod odstranjevanja bakrovih ionov iz vode pomembno področje sodobne okoljske kemije.

Med različnimi postopki odstranjevanja kovinskih ionov je adsorpcija ena najpogosteje uporabljenih metod, saj omogoča učinkovito vezavo onesnaževal na površino adsorbenta (International Adsorption Society, b. d.; Adsorption, b. d.). V zadnjih letih se vedno več pozornosti namenja uporabi odpadnih naravnih materialov, ki predstavljajo trajnostno alternativo komercialnim adsorbentom. Med takšne materiale sodijo tudi jajčne lupine, ki nastajajo kot odpadek v gospodinjstvih in prehranski industriji.

Glavna sestavina jajčnih lupin je kalcijev karbonat ($CaCO_3$), ki predstavlja približno 95 % njihove mase. Poleg tega vsebujejo manjše količine magnezijevega karbonata, kalcijevega fosfata in organskih snovi (Chemical compositions of egg shells, b. d.; Hincke idr., 2012). Zaradi svoje kemijske sestave ter porozne strukture lahko jajčne lupine vežejo kovinske ione iz vodnih raztopin in jih tako odstranijo iz vode.

Namen raziskave je bil proučiti učinkovitost jajčnih lupin pri odstranjevanju bakrovih ionov iz vodnih raztopin ter ugotoviti vpliv kalcinacije na adsorpcijsko sposobnost materiala. Primerjali smo adsorpcijo na nežganih jajčnih lupinah ter na lupinah, žganih pri temperaturah 700 °C in 900 °C. Preostalo koncentracijo bakrovih ionov po adsorpciji smo določili s spektrofotometrijo.



Teoretične osnove jajčnih lupin

Jajčna lupina je naravni kompozitni material, katerega osnovna naloga je zaščita vsebine jajca in omogočanje izmenjave plinov z okolico. Sestavljena je iz več plasti, pri čemer največji delež predstavlja mineralni del v obliki kristalov kalcijevega karbonata. Lupina vsebuje tudi več tisoč mikroskopskih por, ki ji dajejo porozno strukturo. Ta poroznost je pomembna tudi pri adsorpciji, saj povečuje površino materiala, ki je na voljo za vezavo ionov (Hincke idr., 2012; International Adsorption Society, b. d.).

Kalcijev karbonat v jajčni lupini lahko sodeluje pri ionski izmenjavi, pri kateri kalcijevi ioni prehajajo v raztopino, bakrovi ioni pa se vežejo na površino adsorbenta. Poleg tega se bakrovi ioni lahko vežejo na organske skupine v lupinah ali pa tvorijo slabo topne spojine, ki ostanejo na površini materiala. Zaradi teh procesov se koncentracija bakrovih ionov v raztopini zmanjša.

Kalcinacija jajčnih lupin

Za izboljšanje adsorpcijskih lastnosti smo dve skupini jajčnih lupin kalcinirali pri različnih temperaturah. Kalcinacija je postopek segrevanja materiala na visoko temperaturo, pri katerem pride do kemijskih sprememb (Calcination, b. d.). Pri jajčnih lupinah poteka razpad kalcijevega karbonata po zapisu na **Reakciji 1**.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \qquad (\textit{Reakcija 1})$$

Pri tem nastaneta kalcijev oksid oziroma živo apno in ogljikov dioksid, ki se sprošča v okolico. Nastali kalcijev oksid je bistveno bolj reaktiven od izhodiščnega kalcijevega karbonata. Ko pride kalcijev oksid v stik z vodo, nastane kalcijev hidroksid (Kalcijev oksid, b. d.) (**Reakcija 2**).

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \qquad (\textit{Reakcija 2})$$

Zaradi večje poroznosti in bazičnosti kalciniranih lupin se poveča njihova sposobnost odstranjevanja bakrovih ionov iz raztopine. Kalcinirane lupine ne delujejo le kot adsorbent, temveč lahko povzročajo tudi obarjanje bakrovih spojin, kar dodatno poveča učinkovitost odstranjevanja bakra.

Spektrofotometrično določanje bakrovih(II) ionov

Za določanje koncentracije bakrovih(II) ionov po adsorpciji smo uporabili spektrofotometrijo. Metoda temelji na merjenju absorpcije svetlobe pri določeni valovni dolžini. Večja kot je koncentracija obarvane spojine v raztopini, več svetlobe absorbira (Spektrofotometrija, b. d.; Edinburgh Instruments, 2021).

Pred merjenjem smo raztopinam dodali amonijak, pri čemer je nastal intenzivno modro obarvan kompleks bakrovih ionov in amonijaka (Kompleksna spojina, b. d.). Intenzivnost modre barve je bila odvisna od koncentracije bakra v raztopini. Na podlagi absorbance standardnih raztopin smo izdelali umeritveno krivuljo in z njeno pomočjo določili koncentracije bakrovih(II) ionov v vzorcih po adsorpciji (Edinburgh Instruments, 2021).



Eksperimentalni postopek

Jajčne lupine smo najprej oprali in posušili. Nato smo jih razdelili na tri enake dele. Prvi del je ostal brez obdelave, drugi del smo kalcinirali pri temperaturi 700 °C, tretji del pa pri 900 °C. Po žarjenju smo vse vzorce hranili v eksikatorju, da niso absorbirali vlage iz zraka.

Pripravili smo osnovno raztopino bakrovega(II) sulfata(VI) s koncentracijo 10 g/L. Za pripravo raztopine smo v destilirani vodi raztopili 10,00 g bakrovega(II) sulfata in raztopino dopolnili do volumna 1 L. Iz osnovne raztopine smo pripravili še standardne raztopine za izdelavo umeritvene krivulje s koncentracijami od 0 do 10 g/L v 100 mL merilnih bučkah in jim pred razredčitvijo do oznake dodali 5,0 mL koncentrirane raztopine amonijaka.

Po 20,00 g posušenih in žganih jajčnih lupin smo zatehtali v tri erlenmajerice. V eno smo zatehtali nežgane lupine, v drugo žgane na 700°C in v zadnjo žgane na 900°C. V vsako erlenmajerico smo na lupine dodali še 100,0 mL osnovne raztopine bakrovih ionov brez dodanega amonijaka. Vzorce smo pet ur stresali na stresalniku, da smo izboljšali adsorpcijo.

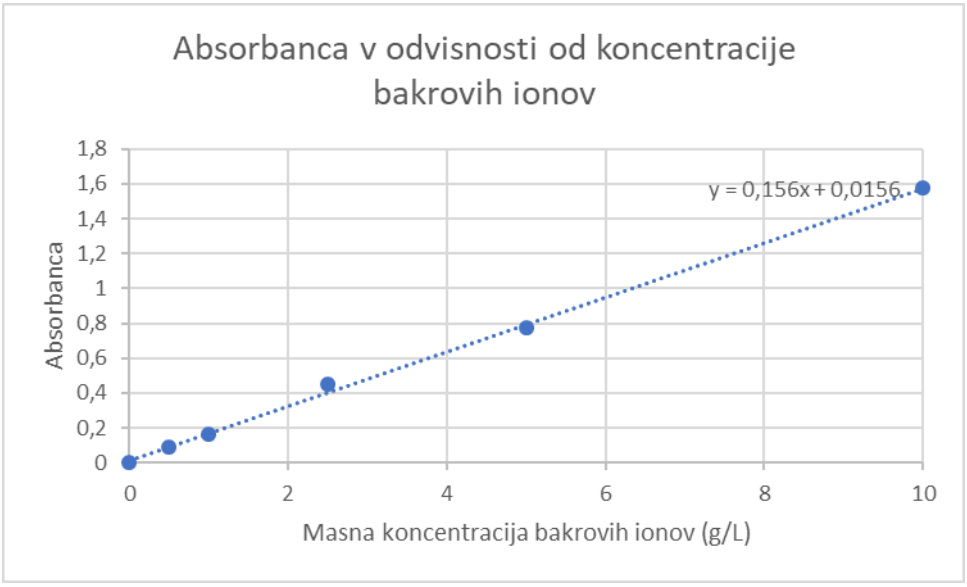
Po končani adsorpciji smo raztopine filtrirali, da smo odstranili jajčne lupine z vezanim bakrom ter filtratom dodali po 5,0 mL koncentrirane raztopine amonijaka. Standardne raztopine smo prenesli v steklene kivete in jim izmerili absorbanco pri valovni dolžini 610 nm, podatke smo uporabili za izris umeritvene krivulje.

Na koncu smo vsebine prenesli v kivete (vključno s filtrati) in jim izmerili absorbanco ter s pomočjo umeritvene krivulje odčitali koncentracije preostalega bakra v raztopini.

Meritve in izračuni

Tabela 1: Meritve absorbanc.

Koncentracija bakrovih ionov (g/L)	Absorbanca
0	0
0,5	0,092
1	0,164
2,5	0,452
5	0,774
10	1,576
Brez žganja	0,409
Žgano na 700°C	0,012
Žgano na 900°C	0,004



Slika 1: Absorbanca v odvisnosti od koncentracije Cu(II) ionov. Enačba premice grafa: y = 0,156 x + 0,0156.

Račun koncentracije vzorčnih raztopin:

$$y = k \times x + n \;\; => \;\; x = \frac{y-n}{k}$$

Račun za koncentracijo v vzorcu z lupinami brez žganja:

$$x_1(brez\,žganja) = \frac{0{,}409-0{,}0156}{0{,}156} = 2{,}522\ \frac{g}{L}.$$

Račun za koncentracijo v vzorcu z lupinami, žganimi na 700 °C:

$$x_2(žgano\ na\ 700\ °C) = \frac{0{,}012-0{,}0156}{0{,}156} = 0{,}082\ \frac{g}{L}.$$

Račun za koncentracijo v vzorcu z lupinami žganimi na 900 °C:

$$x_3(žgano\ na\ 900\ °C) = \frac{0{,}004-0{,}0156}{0{,}156} = 0{,}074\ \frac{g}{L}.$$

Računi za izkoristek adsorpcije:

$$\eta(adsorpcije) = \left(1 - \frac{\gamma(osnovne\ raztopine)}{\gamma(filt.\,vzorca)}\right) \times 100\ \%.$$

Račun za izkoristek adsorpcije z lupinami brez žganja:

$$\eta(adsorpcije) = \left(1 - \frac{2{,}552\ \frac{g}{L}}{10\ \frac{g}{L}}\right) \times 100 = 74{,}48\ \%.$$



Račun za izkoristek adsorpcije z lupinami žganimi na 700 °C:

$$\eta(adsorpcije) = \left(1 - \frac{0{,}082\ \frac{g}{L}}{10\ \frac{g}{L}}\right) \times 100 = 99{,}18\ \%.$$

Račun za izkoristek adsorpcije z lupinami žganimi na 900 °C:

$$\eta(adsorpcije) = \left(1 - \frac{0{,}074\ \frac{g}{L}}{10\ \frac{g}{L}}\right) \times 100 = 99{,}26\ \%.$$

Rezultati in razprava

Pri spektrofotometričnih meritvah smo določili absorbanco filtratov (**Tabela 1**) in na podlagi enačbe premice umeritvene krivulje (**Slika 1**) izračunali koncentracije preostalih bakrovih ionov. Izmerjene koncentracije po adsorpciji so znašale:

- nežgane lupine: 2,522 g/L,
- lupine žgane pri 700 °C: 0,082 g/L,
- lupine žgane pri 900 °C: 0,074 g/L.

Iz teh rezultatov smo izračunali izkoristke adsorpcije:

- nežgane jajčne lupine: 74,48 %,
- jajčne lupine žgane pri 700 °C: 99,18 %,
- jajčne lupine žgane pri 900 °C: 99,26 %.

Rezultati eksperimentalnega dela jasno kažejo, da kalcinacija močno izboljša sposobnost odstranjevanja bakrovih ionov. Pri nežganih lupinah je ostalo v raztopini približno četrtina začetne koncentracije bakrovih ionov medtem, ko sta kalcinirana vzorca odstranila praktično vse prisotne bakrove ione. Razlog za boljše rezultate je povečana poroznost materiala ter nastanek kalcijevega oksida in kalcijevega hidroksida, ki omogočata učinkovitejšo vezavo in izločanje bakrovih ionov.

Med poskusom smo opazili tudi, da se je intenziteta barve v raztopini bakrovega sulfata bistveno zmanjšala po adsorpciji Cu^{2+} na jajčne lupine, kar dodatno potrjuje uspešno vezavo bakrovih ionov na njihovo površino.

Zaključek

Raziskava je pokazala, da so jajčne lupine učinkovit naravni adsorbent za odstranjevanje bakrovih ionov (Cu^{2+}) iz vodnih raztopin. Vsi preučevani vzorci so uspešno vezali bakrove ione, pri čemer so kalcinirane jajčne lupine dosegle izjemno visoke izkoristke adsorpcije, ki so presegli 99 %. Rezultati potrjujejo, da kalcinacija pomembno izboljša adsorpcijske lastnosti lupin, saj poveča njihovo poroznost in reaktivnost.

Poseben pomen raziskave je v možnosti ponovne uporabe odpadnih jajčnih lupin kot poceni in trajnostnega materiala za čiščenje onesnaženih voda. Zaradi visoke učinkovitosti odstranjevanja bakrovih ionov bi bilo mogoče zmlete jajčne lupine v prihodnosti vključevati v filtrirne vložke, adsorpcijske kolone ali večstopenjske sisteme za pripravo tehnološke in odpadne vode. Takšni

filtri bi lahko našli uporabo predvsem v manjših industrijskih obratih, laboratorijih in drugih okoljih, kjer se pojavljajo raztopine z nizkimi koncentracijami bakrovih ionov.

Za praktično uporabo bi bilo treba raziskati še življenjsko dobo adsorbenta, možnost regeneracije uporabljenih lupin ter učinkovitost odstranjevanja bakrovih ionov pri različnih pH-vrednostih, temperaturah in koncentracijah. Kljub temu dobljeni rezultati kažejo, da imajo jajčne lupine velik potencial kot okolju prijazen material za razvoj cenovno dostopnih sistemov za filtriranje vode in zmanjševanje obremenjevanja okolja z bakrovimi ioni.

Literatura

Adsorption. (b. d.). *Encyclopaedia Britannica*. https://www.britannica.com/science/adsorption

Adsorption. (b. d.). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption

Amaral, M. (2022, Junij 15). *Inside chemistry – Absorption vs adsorption*. Cotes. https://www.cotes.com/en/blog/inside-chemistry-absorption-vs-adsorption cotes.com

Calcination. (b. d.). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Calcination

Chumlong, A., Wanvisa, K., Acharaporn, K., & Panyawathanakit, P. (2007). *Removal of lead from battery manufacturing wastewater by egg shell*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Chemical-compositions-of-egg-shells_tbl1_26469281

Edinburgh Instruments. (2021, Julij 8). *The Beer-Lambert law*. https://www.edinst.com/resource/the-beer-lambert-law/ Edinburgh Instruments

Eggshell: Benefits and harms for health. (b. d.). *Decorexpro Food Hub*. https://foodhub.decorexpro.com/sl/jaichnaja-skorlupa-polza-i-vred-dlja-zdorovja/

Filtracija. (b. d.). *Wikipedia*. https://sl.wikipedia.org/wiki/Filtracija

Hincke, M. T., Nys, Y., Gautron, J., Mann, K., Rodríguez-Navarro, A. B., & McKee, M. D. (2012). The eggshell: Structure, composition and mineralization. *Frontiers in Bioscience, 17*(4), 1266–1280. https://doi.org/10.2741/3985

International Adsorption Society. (b. d.). *What is adsorption?* https://www.int-ads-soc.org/what-is-adsorption/

Kalcijev oksid. (b. d.). *Wikipedia*. https://sl.wikipedia.org/wiki/Kalcijev_oksid

Kompleksna spojina. (b. d.). *Wikipedia*. https://sl.wikipedia.org/wiki/Kompleksna_spojina

Spektrofotometrija. (b. d.). *Wikipedia*. https://sl.wikipedia.org/wiki/Spektrofotometrija

Synevo Slovenija. (b. d.). *Težke kovine*. https://www.synevo.si/tezke-kovine

Toksične težke kovine. (b. d.). *Wikipedia*. https://sl.wikipedia.org/wiki/Toksi%C4%8Dne_te%C5%BEke_kovine

Why aren't the copper(II) ions in $CuSO_4$ precipitated by hydroxide ions from water? (b. d.). *Chemistry Stack Exchange*. https://chemistry.stackexchange.com/questions/41694/why-arent-the-copperii-ions-in-cuso4-precipitated-by-hydroxide-ions-from-wate



Ocena bioloških učinkov vodotopnih ionov redkih zemelj na mikroorganizme v luči trajnostnega razvoja novih materialov

Eva Merklin[1,2], Anej Kramer[1,2], Rok Podlipec[3], Patricija Lap[2], Jasna Kastivnik[4], Gašper Tavčar[2], Maja Ponikvar-Svet[2], Marko Jeran[2,*]

[1] Biotehniški izobraževalni center Ljubljana, Gimnazija in veterinarska šola, Ljubljana
[2] Institut »Jožef Stefan«, Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana
[3] Institut »Jožef Stefan«, Odsek za fiziko trdne snovi, Ljubljana
[4] OreTech, Vrhnika

**e-mail: eva.merklin@amis.net, krameranej1@gmail.com, marko.jeran@ijs.si*

Povzetek

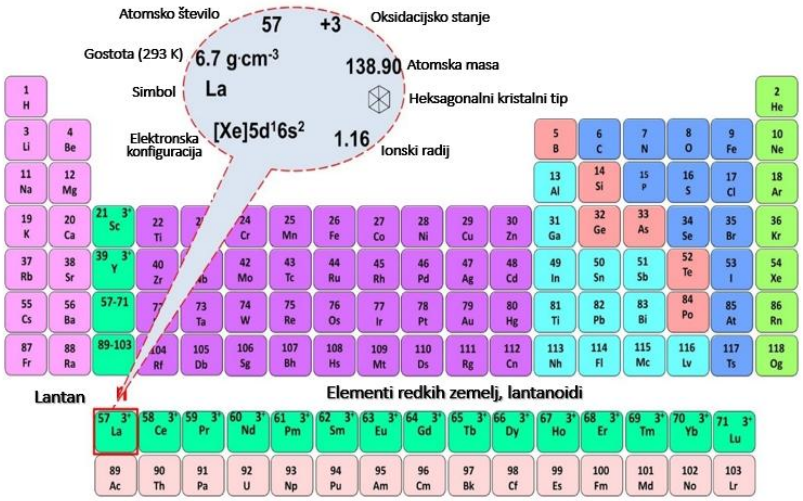
V zadnjih desetletjih se je uporaba elementov redkih zemelj močno povečala, predvsem v visokotehnoloških aplikacijah, elektroniki, zeleni energiji in laserski tehnologiji. Mednje spada tudi lantan, ki se uporablja v baterijah, metalurgiji in medicini. Njegovi biološki učinki so slabo raziskani, znano pa je, da je respiratorno toksičen in lahko povzroči pnevmokoniozo. V raziskavi je bil proučevan vpliv lantana na rast in razmnoževanje kvasovke *Saccharomyces cerevisiae* (*S. cerevisiae*) ter bakterij človeške mikroflore kože in ustne votline z namenom ocene njegovih možnih bioloških učinkov. Bakterije so bile na prisotnost lantana občutljivejše od kvasovke *S. cerevisiae*. Izrazit zaviralni učinek na rast bakterij je bil opažen pri koncentraciji 20 mg/mL, pri kvasovkah pa pri 50 mg/mL. Pri najvišji koncentraciji (500 mg/mL) je bila pri vseh preučevanih organizmih opažena izrazita inhibicija rasti. Nadaljnje analize so pri *S. cerevisiae* pokazale tudi tvorbo biofilma, kar lahko nakazuje na zaščitni odziv na prisotnost lantanovih(III) ionov. Rezultati kažejo, da ima lantan pri višjih koncentracijah zaviralni učinek na preučevane mikroorganizme, ter prispevajo k boljšemu razumevanju bioloških učinkov elementov redkih zemelj in njihovih možnih okoljskih tveganj.

Ključne besede: lantan, mikroorganizmi, kroženje snovi, okolje, trajnostni razvoj

Uvod

Elementi redkih zemelj (REE) so skupina 15 kemijskih elementov, ki se v periodnem sistemu nahajajo pod imenom lantanoidi, med nje pa zaradi podobnih fizikalno-kemijskih lastnosti spadata še itrij (Y) in skandij (Sc) (**Slika 1**) (de Medeiros idr., 2025). REE se vse pogosteje uporabljajo v različnih tehnoloških aplikacijah, na primer v laserski, metalurški in telekomunikacijski industriji, vedno večji pa je tudi njihov geopolitični pomen (de Medeiros idr., 2025; Jadhav idr., 2025). Najpogosteje jih najdemo v premogovem pepelu in rudniških odpadnih vodah, vendar je izolacija REE iz teh virov zahtevna. Zato so glavni primarni viri teh elementov fosfatni in karbonatni minerali, kot so bastnezij, monazit in ksenotim (Cotruvo, 2019). Povečano rudarjenje teh elementov je povzročilo onesnaževanje okolja in morebitno grožnjo zdravju človeka, četudi je profil toksičnosti REE še precej nepopisan list. Znano je, da lahko povzročijo nepravilnosti delovanja organov in sistemov, posledično pa še spremembe v genetiki, epigenetiki in signalnih poteh (Wang idr., 2024). Izpostavljenost lahko povzroči nevrotoksičen odziv, ki aktivira apoptotične in/ali vnetne poti, prekomerno proizvodnjo reaktivnih kisikovih spojin (*angl.* ROS) in podobnih spojin, ki lahko vodijo v poškodbe nevronov in kognitivnih primanjkljajev (motnje učenja in spomina) (Magdas idr., 2025). Lahko pride tudi do oksidativnega stresa – povečanja ravni

prostih radikalov, ki poškodujejo pomembne makromolekule, kot je tudi DNA, in posledično povzročijo nastanek mutacij. V končni fazi je moža tudi apoptoza – programirana celična smrt (Wang idr., 2024).



Slika 1: Periodni sistem z označenimi REE (turkizna barva) in lantanom z njegovimi osnovnimi kemijskimi lastnostmi (Jadhav idr.,2025).

Med REE uvrščamo tudi lantan (La) (**Slika 2**), ki smo ga uporabili pri našem raziskovalnem delu. To je element z vrstnim številom 57 in relativno atomsko maso 138,91 $gmol^{-1}$ (Jadhav idr., 2025). Njegovo ime izhaja iz grške besede »*lanthaneim*«, ki pomeni biti skrit (Jadhav idr., 2025), kar odraža njegovo redko prisotnost v zemeljski skorji, ki je 0,0018 % (TheChemicalElements, 2020). Lantan je srebrno-bela, mehka kovina (Jadhav idr., 2025), ki ima tališče pri 920 °C in vrelišče pri 3454 °C (Neikov idr., 2019). Kristal lantana ima dvojno heksagonalno gosto zloženo strukturo in koordinacijsko število 12 (Jadhav idr., 2025). Pogosto se uporablja za izboljšavo ločljivosti na kamerah, pri obdelavi kovin, radiometričnem ločevanju rud in kamnin ter na področju medicinskih raziskav, predvsem glede težav s presnovo kalcija (TheChemicalElements, 2020). Biološka vloga tega elementa je še relativno neznana, pri ljudeh lahko povzroča parenhimsko bolezen, imenovano pnevmokonioza, ki jo sproži vdihovanje njegovega prahu, najpogosteje ob delu v rudnikih, ipd. (Cullinan & Reid, 2013). Zaradi slednjega je vdihovanje lantanovega prahu za človeka toksično (močno draženje pljuč, pnevmokonioza), povzroča pa tudi kognitivno zaostalost v obliki motenj učenja in spomina (Magdas idr., 2025). Raziskave so pokazale tudi, da so nekatere vrste vulkanskih bakterij odvisne od ionov REE, ki ga absorbirajo iz okolice s pomočjo lanmodulina (Cortuvo idr., 2018).



Slika 2: Lantanova ruda (Stantford materials, 2026).



Vpliv REE smo proučevali na kvasovkah *Saccharomyces cerevisiae* in bakterijah človeškega izvora, in sicer tiste, ki so prisotne na najbolj izpostavljenih delih našega telesa – ustni (nosni) votlini in na dlaneh (koži), kar je pomembno tudi za proučevanje vpliva REE na človeka. *S. cerevisiae*, znane tudi kot pekovski kvas, so fakultativno anaerobne enocelične glive, ki lahko preživijo na območjih z ali brez kisika tako, da spreminjajo svoj metabolizem glede na pogoje (Botstein & Fink, 2011). So tudi ene izmed najpomembnejših modelnih organizmov moderne biotehnologije, predvsem zaradi svoje prilagodljivosti in odpornosti ter enostavne genske sestave (Botstein & Fink, 2011). Poleg kvasovk smo proučevali tudi bakterije ust in dlani. V ustni votlini velja velika biotska raznolikost, ki se spreminja glede na lokacijo, sprememba njihovega števila oz. vrste pa pomeni začetek bolezni zob in ust kot so karies, gingivitis (vnetje dlesni) in druge periodontalne bolezni (Palmer, 2014). Najpogosteje prisotni rodovi so *Streptococcus, Actinomyces, Prevotella, Fusobacterium* in *Corynebacterium*, velika večina bakterij v zdravih ustih pa je Gram pozitivnih (Palmer, 2014), kar je pomembno za razlago naših rezultatov. Podobno kot v ustih, je zaradi ugodnih pogojev tudi kožna mikroflora precej bogata, vendar se hitro in neprestano spreminja (Chiller idr., 2001). Koža spodbuja rast predvsem priskledniških bakterij, ker se tako ščiti pred »napadom« patogenih, škodljivih organizmov (Chiller idr., 2001). Večina bakterij, prisotnih na koži je Gram pozitivnih in aerobnih, obstajajo pa tudi Gram negativni (*Acinetobacter*) kot tudi anaerobni rodovi (*Propionibacterium acnes*) na manj izpostavljenih predelih (Chiller idr., 2001). Najpogosteje prisotni rodovi na koži so *Streptococcus, Corynebacterium, Propionibacterium, Dermabacter, Brevibacterium* (Chiller idr., 2001).

Zanimivost tako bakterij kot kvasovk pa je tvorba sluzastih struktur, ki jih imenujemo biofilmi. Mikroorganizmi jih uporabljajo za zaščito pred sunkovitimi spremembami okolja (pH, temperatura, prisotnost strupov ipd.), prav tako pa se v njih razvije nekakšna prehrambna mreža, ponekod tudi simbiotski odnosi (Brückner & Mösch, 2012). Biofilmi nastanejo s tvorbo posebnih lepljivih beljakovin, imenovanih adhezini, ki jih izločajo bakterije, ko zaznajo znatno spremembo v okolju (Verstrepen & Klis, 2006). Biofilm je sestavljen iz več različnih makromolekul, in sicer proteinov in polisaharidov (ogljikovih hidratov), katerih zmes se imenuje zunajcelični (ekstracelularni) matriks. Ta zagotavlja strukturo in lajša komunikacijo med celicami ter sodelovanje med njimi (Verstrepen & Klis, 2006). Biofilmi se v naravi pogosto pojavijo na površini sadja ali zelenjave (Brückner & Mösch, 2012), naših zobeh oziroma ustni votlini (Bowden in Hamilton, 1998) in onesnaženi vodi, kar smo dokazali s našim raziskovalnim delom.

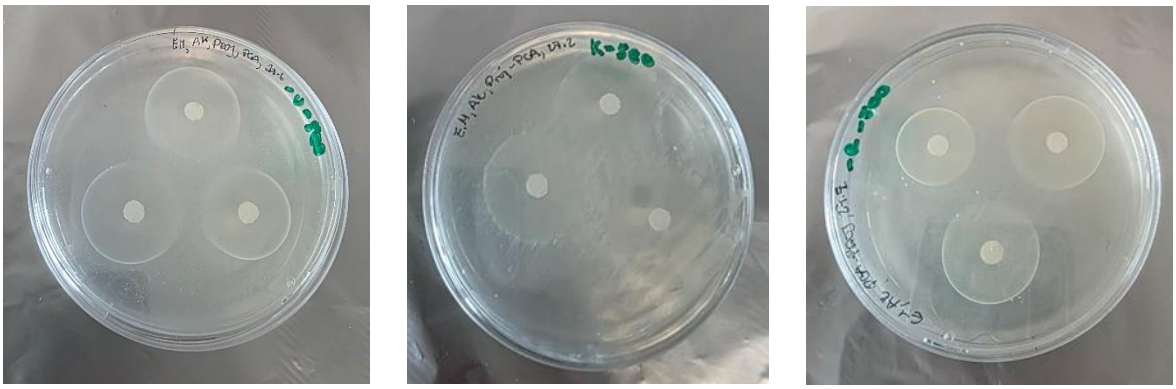
Metode dela

Za proučevanje vpliva lantanovih(III) ionov na modelni organizem *S. cerevisiae* ter na bakterije človeškega izvora so bile uporabljene različne metode. Pri kvasovkah sta bili uporabljeni metoda difuzije na trdno gojišče in spektrofotometrija, bakterije človeške mikroflore pa so bile preučevane z metodo difuzije na trdno gojišče (difuzijski antibiogram). Difuzijski antibiogram je kvantitativna oz. kvalitativna metoda za proučevanje občutljivosti mikroorganizmov na potencialno toksične snovi, v tem primeru na raztopine lantanovih(III) ionov različnih koncentracij. Mikroorganizmi se na gojišče nanesejo s konfluentnim razmazom. V primeru toksičnega učinka se okoli nanosa pojavijo inhibicijske cone, katerih velikost omogoča oceno stopnje zaviranja rasti mikroorganizmov. Meritve optične gostote so bile izvedene z napravo Hach-Lange DR3900, mikroskopska analiza vzorcev pa z invertnim svetlobnim mikroskopom Nikon ECLIPSE Ti2.

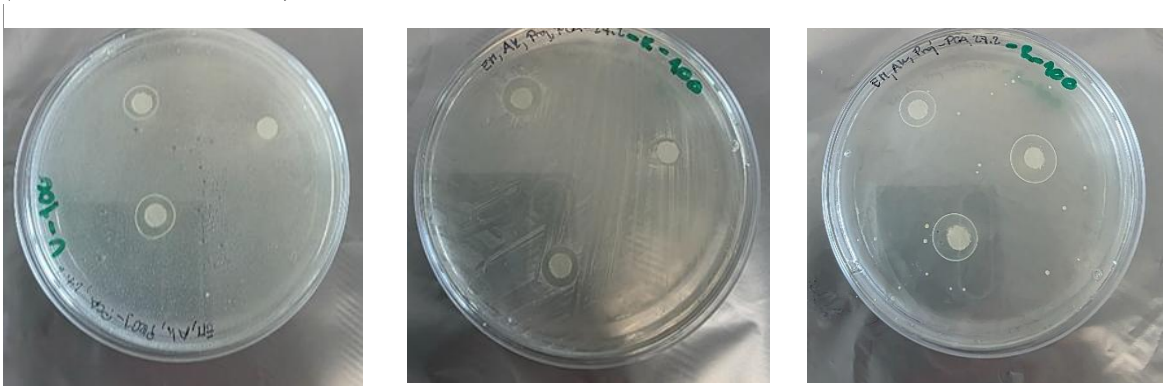
Rezultati in diskusija

Skozi potek raziskovalnega dela je bilo ugotovljeno, da so imeli lantanovi(III) ioni precejšnji vpliv na rast in razmnoževanje modelnih organizmov. Ob izvedbi difuzije na trdno gojišče je bilo

ugotovljeno, da so bile *S. cerevisiae* najmanj občutljive na dodan REE, najbolj pa bakterije, nacepljene iz ustne votline (**Slika 3** in **Slika 4**). Difuzijski antibiogrami so podali antibiotičen in antimikotičen učinek, ki smo si ga razlagali z dejstvom, da imajo ioni lantana močnejši vpliv na rast Gram pozitivnih bakterij (Balusamy idr., 2012), večina bakterij kože ter zdrave ustne votline pa je Gram pozitivnih (Chiller idr., 2001). Poleg tega imajo prej omenjene bakterije zaradi prisotnosti teihojskih kislin negativno nabito celično steno, ki še dodatno privlači trivalentne lantanove(III) ione (Balusamy idr., 2012; Navarre & Schneewind, 1999). Lantanovi(III) ioni veljajo za inhibitorje kalcijevih ionov, ker le-te zamenjajo v vezavnih mestih encimov, stafilokoknih nukleaz, in s tem okvarijo metabolizem bakterije (Balusamy idr., 2012).

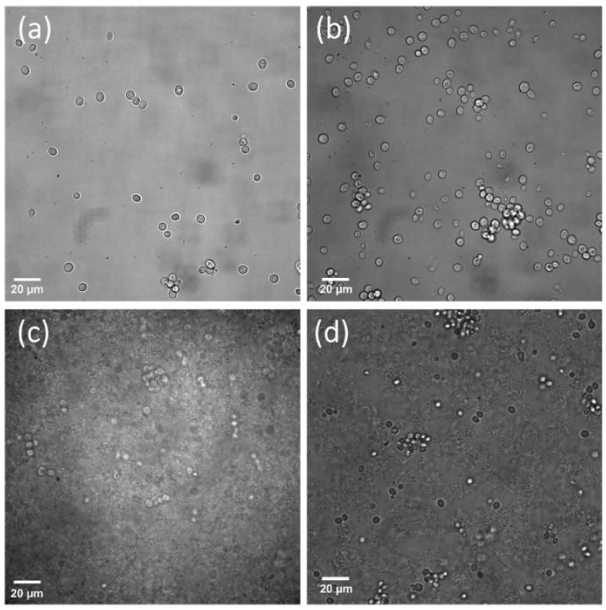


Slika 3: Prikaz inhibicijskih con pri bakterijah ustne votline, S. cerevisiae *in bakterij rok pri 500 mg/mL (v navedenem vrstnem redu).*



Slika 4: Prikaz inhibicijskih con pri bakterijah ustne votline, S. cerevisiae *in bakterij rok pri 100 mg/mL (v navedenem vrstnem redu).*

Poleg difuzije na trdno gojišče je bila v okviru 72 ur spremljana tudi optična gostota kulture *S. cerevisiae*, izpostavljene različnim koncentracijam lantanovih(III) ionov. Pri nižjih koncentracijah ni bilo bistvenih razlik glede na kontrolo, medtem ko je pri srednjih koncentracijah po 24 urah sledila izrazita rast, ki je nato stagnirala. Pri najvišji koncentraciji je bila rast manj izrazita. Mikroskopska analiza je pokazala tudi tvorbo biofilma kot odziv na prisotnost lantanovih(III) ionov. Na **Sliki 5(a)** so vidne plavajoče celice enakih dimenzij, prisotni pa so tudi manjši skupki. Po dodatku najnižje koncentracije ionov (**Slika 5(b)**) so bili že opazni prvi zametki biofilma, v obliki večjih skupkov. Pri koncentraciji 20 mg/mL, prikazani na **Sliki 5(c)**, so prikazani skupki celic, ki so se tako najbrž zaščitili pred močnejšim vplivom lantanovih(III) ionov. Pri koncentraciji 200 mg/mL (**Slika 5(d)**) pa smo opazili manjše skupke in celice bolj heterogenih oblik. Opazili smo tudi kompaktno tridimenzionalno strukturo – biofilm.



Slika 1: Prikaz kvasnega biofilma pod mikroskopom. (a) Kontrolni vzorec; (b) vzorec z 2 mg/mL La(III); (c) vzorec z 20 mg/mL La(III) in (d) vzorec z 200 mg/mL La(III).

Kot je bilo omenjeno že v uvodu, mikroorganizmi biofilm tvorijo v odgovor drastičnim spremembam v okolju, ki bi jim lahko ogrozile preživetje (Verstrepen & Klis, 2006). Iz navedenega je mogoče sklepati, da so lantanovi(III) ioni na kvasovke delovali kot okoljski stresor – nekaj, kar bi jim onemogočilo obstoj. Tvorba biofilma se začne z izločanjem adhezinov, ko pa slednji dozorijo, se začne le še pospešeno razmnoževanje kvasovk in nato vzpostavitev stabilnih interakcij v skupnosti (Verstrepen & Klis, 2006; Brückner & Mösch, 2012). Bližina celic znotraj biofilma jim omogoča lažje presnovno sodelovanje in souporabo hranil, kar poveča njihovo preživelost. Hkrati pa rast znotraj biofilma spodbuja fenotipsko raznolikost potomcev, kar vodi do višje odpornosti na izpostavljeno snov v kasnejših generacijah (Verstrepen & Klis, 2006; Brückner & Mösch, 2012). Eksponentno rast celic, ki je bila opazna predvsem pri srednjih koncentracijah, lahko pripišemo lastnosti kvasovk *S. cerevisiae*, da se pod blagim stresom njihove reprodukcijske poti aktivirajo in se posledično začnejo hitro razmnoževati (Botstein & Fink, 2011). Iz postopnega upada eksponentne rasti z višanjem koncentracije pa je mogoče sklepati, da so lantanovi(III) ioni v višjih koncentracijah postali bolj toksični za *S. cerevisiae* in celice uničijo predno bi se lahko le-te uspešno razmnožile.

Nastanek biofilma v obravnavanih vzorcih je spodbudna ugotovitev, saj nakazuje na to, da imajo *S. cerevisiae* dobro zmožnost obrambe proti lantanovim(III) ionom oz. ionom elementov redkih zemlj. Ugotovitev je pomembna, saj se lantan in drugi elementi redkih zemelj vse pogosteje uporabljajo v sodobnih tehnologijah, zlasti v telekomunikacijah, laserski in obrambni tehnologiji ter medicinskih in energetskih raziskavah (de Medeiros idr., 2025). Z ekološkega vidika je tvorba biofilma pri *S. cerevisiae* lahko spodbudna, saj nakazuje na možnost, da bi se mikroorganizmi ob prisotnosti lantana ali drugih lantanoidov lahko odzvali z obrambnimi mehanizmi in tako prispevali k zmanjšanju njihovih škodljivih učinkov v primeru nenamernega izpusta v okolje.



Zaključek

Rezultati raziskave kažejo, da imajo vodotopni ioni lantana pomemben biološki vpliv na preučevane mikroorganizme. Bakterije človeške mikroflore so bile na prisotnost lantana občutljivejše od kvasovk *S. cerevisiae*, saj se je zaviralni učinek pri njih pojavil že pri nižjih koncentracijah, medtem ko so kvasovke pokazale večjo odpornost. Pri višjih koncentracijah so bili prizadeti vsi preučevani mikroorganizmi, kar kaže na potencialno toksičnost lantana. Zanimiva je bila tudi tvorba biofilma pri kvasovkah kot odziv na prisotnost lantana, kar nakazuje na možnost aktiviranja zaščitnih mehanizmov v stresnih razmerah.

Rezultati so pomembni tudi z okoljskega vidika, saj se uporaba elementov redkih zemelj zaradi njihove vloge v sodobnih tehnologijah povečuje, s tem pa tudi možnost njihovega vnosa v okolje. Ker imajo mikroorganizmi ključno vlogo pri kroženju snovi, razgradnji organske snovi in delovanju ekosistemov, bi lahko prisotnost lantana vplivala na sestavo in delovanje mikrobnih združb. Naši rezultati zato poudarjajo potrebo po nadaljnjem raziskovanju vplivov lantana in drugih elementov redkih zemelj na mikroorganizme ter po boljšem razumevanju njihovih dolgoročnih okoljskih učinkov.

Na podlagi ugotovitev lahko sklenemo, da lantan poleg tehnološkega pomena predstavlja tudi potencialni okoljski dejavnik, katerega vpliva na žive sisteme ne smemo zanemariti. Nadaljnje raziskave bodo pomembne za boljše razumevanje interakcij med elementi redkih zemelj in mikroorganizmi ter za oceno morebitnih okoljskih tveganj, povezanih z njihovo vse večjo uporabo.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa P1-0045 in projekta občanske znanosti O1-0327, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

Literatura

Agathokleous, E. (2018). Environmental hormesis, a fundamental non-monotonic biological phenomenon with implications in ecotoxicology and environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 148*, 1042–1053. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.003

Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., & Kirchain, R. E. (2012). Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology, 46*(6), 3406–3414. https://doi.org/10.1021/es203518d

Amyot, M., Clayden, M. G., MacMillan, G. A., Perron, T., & Arscott-Gauvin, A. (2017). Fate and trophic transfer of rare earth elements in temperate lake food webs. *Environmental Science & Technology, 51*(11), 6009–6017. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00739

Anastopoulos, I., Bhatnagar, A., & Lima, E. C. (2016). Adsorption of rare earth metals: A review of recent literature. *Journal of Molecular Liquids, 221*, 954–962. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.076

Balusamy, B., Kandhasamy, Y. G., Senthamizhan, A., Chandrasekaran, G., Subramanian, M. S., & Tirukalikundram, K. S. (2012). Characterization and bacterial toxicity of lanthanum oxide bulk and nanoparticles. *Journal of Rare Earths, 30*(12), 1298–1302. https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60224-5



Benedetto, A., Bocca, C., Brizio, P., Cannito, S., Abete, M. C., & Squadrone, S. (2018). Effects of the rare elements lanthanum and cerium on the growth of colorectal and hepatic cancer cell lines. *Toxicology in Vitro, 46*, 9–18. https://doi.org/10.1016/j.tiv.2017.09.024

Botstein, D., & Fink, G. R. (1988). Yeast: An experimental organism for modern biology. *Science, 240*(4858), 1439–1443. https://doi.org/10.1126/science.3287619

Brückner, S., & Mösch, H.-U. (2012). Choosing the right lifestyle: Adhesion and development in *Saccharomyces cerevisiae*. *FEMS Microbiology Reviews, 36*(1), 25–58. https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00275.x

Chiller, K., Selkin, B. A., & Murakawa, G. J. (2001). Skin microflora and bacterial infections of the skin. *Journal of Investigative Dermatology Symposium Proceedings, 6*(3), 170–174. https://doi.org/10.1046/j.0022-202x.2001.00043.x

Cotruvo, J. A. (2019). The chemistry of lanthanides in biology: Recent discoveries, emerging principles, and technological applications. *ACS Central Science, 5*(9), 1496–1506. https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b00642

Cullinan, P., & Reid, P. (2013). Pneumoconiosis. *Primary Care Respiratory Journal: Journal of the General Practice Airways Group, 22*(2), 249–252. https://doi.org/10.4104/pcrj.2013.00055

de Medeiros, F. F., Wentz, A. P., Castro, B. A. S., Rodrigues, F. D., Alves, S. S., Korn, M. G. A., Bettini, J., dos Anjos, J. P., & Guarieiro, L. L. N. (2025). Rare earth elements: A review of primary sources, applications, business investment, and characterization techniques. *Applied Sciences*, 15(20), 10949. https://doi.org/10.3390/app152010949

Gwenzi, W., Mangori, L., Danha, C., Chaukura, N., Dunjana, N., & Sanganyado, E. (2018). Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants. *Science of the Total Environment*, 636, 299–313. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.235

Hatje, V., Schijf, J., Johannesson, K. H., Andrade, R., Caetano, M., Brito, P., Haley, B. A., Lagarde, M., & Jeandel, C. (2024). The global biogeochemical cycle of the rare earth elements. *Global Biogeochemical Cycles*, 38(6), e2024GB008125. https://doi.org/10.1029/2024GB008125

Jadhav, S. B., Malavekar, D. B., Mohite, R. A., Shaikh, S. B., Kadam, K. V., Pawaskar, P. N., Kim, J. H., & Lee, N.-E. (2025). A critical review of lanthanum and lanthanum-based materials: Synthesis, applications, and challenges. *Rare Metals*, 44(8), 5201–5232. https://doi.org/10.1007/s12598-024-03204-8

Krebs, R. E. (2006). The history and use of our Earth's chemical elements: A reference guide (2. izd.). Greenwood Press.

Lanthanum – The chemical elements. (2020, April 9). *The Chemical Elements*. https://thechemicalelements.com/lanthanum/

MacMillan, G. A., Chételat, J., Heath, J. P., Mickpegak, R., & Amyot, M. (2017). Rare earth elements in freshwater, marine, and terrestrial ecosystems in the eastern Canadian Arctic. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 19(10), 1336–1345. https://doi.org/10.1039/C7EM00082K

Magdas, T. M., Bodolea, C., Gherman, C., Hategan, A. R., Magdas, D. A., David, M., Capras, R. D., & Filip, G. A. (2025). Neurotoxicity of lanthanum salts: A narrative review of mechanistic insights from cellular and animal models. *Molecules*, 30(18), 3748. https://doi.org/10.3390/molecules30183748

Navarre, W. W., & Schneewind, O. (1999). Surface proteins of Gram-positive bacteria and mechanisms of their targeting to the cell wall envelope. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 63(1), 174–229. https://doi.org/10.1128/mmbr.63.1.174-229.1999

Neikov, O. D., Naboychenko, S. S., & Murashova, I. B. (2019). Production of rare metal powders. V O. D. Neikov, S. S. Naboychenko, I. B. Murashova, V. G. Gopienko, I. V. Frishberg, & D. V. Lotsko (ur.), *Handbook of non-ferrous metal powders* (2. izdaja, str. 485–537). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100543-9.00024-5

Palmer, R. J., Jr. (2014). Composition and development of oral bacterial communities. *Periodontology* 2000, 64(1), 20–39. https://doi.org/10.1111/j.1600-0757.2012.00453.x



Sager, M., & Wiche, O. (2024). Rare earth elements (REE): Origins, dispersion, and environmental implications – A comprehensive review. *Environments*, 11(2), 24. https://doi.org/10.3390/environments11020024

Verstrepen, K. J., & Klis, F. M. (2006). Flocculation, adhesion and biofilm formation in yeasts. *Molecular Microbiology*, 60(1), 5–15. https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2006.05072.x

Wang, W., Yang, Y., Wang, D., & Huang, L. (2024). Toxic effects of rare earth elements on human health: A review. *Toxics*, 12(5), 317. https://doi.org/10.3390/toxics12050317

DRUGI PRISPEVKI



Fluorit – kritična surovina

Blaž Antonin[1]

[1] Institut »Jožef Stefan«, Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana

**e-mail: antoninblaz@gmail.com*

Povzetek

Fluor je element, ki se nahaja v številnih farmacevtskih, agrikulturnih ter drugih spojinah. Kot njegov vir se uporablja fluorit, mineral s formulo CaF_2. Čeprav njegova najdišča niso tako redka kot najdišča nekaterih drugih kritičnih materialov, pa njegovega strateškega pomena, tudi zaradi njegove vloge v metalurgiji, ne gre zanemarjati. Pri njegovi proizvodnji prevladuje peščica držav, vseeno pa vsaj nekaj fluorita proizvede precej držav.

Ključne besede: fluor, farmacija, aluminij, metalurgija

Uvod

Težko bi precenili pomen spojin, ki vsebujejo fluor v današnjem svetu. Vsebuje ga kar 20 % farmacevtskih spojin na trgu in isto bi lahko rekli za 50 % kemikalij, ki se uporabljajo v kmetijstvu (Mukherjee idr., 2025). Fluor je najbolj reaktiven element (in posledično precej eksploziven), zato delo z njim in s fluorovodikovo kislino zahteva nekoliko specializirano opremo in znanje. Fluoroogljikove spojine se uporabljajo kot hladilna sredstva v hladilnikih, kjer so od sklenitve montrealskega protokola nadomestili klorofluoroogljikove spojine, ki so prispevale k širjenju ozonske luknje, podobna zamenjava se je zgodila tudi v potisnih plinih za aerosolna razpršila (Noakes, 2002; Zhang & Liang, 2023). Precej široko so uporabljani tudi fluoropolimeri, najbolj znan med njimi pa je teflon. Vidimo torej lahko, da je za industrijo vir fluora zelo pomemben.

Fluorit, imenovan tudi fluorspar je mineral s kemijsko formulo CaF_2. Čist tvori brezbarvne kristale, zaradi prisotnosti nečistoč pa so kristali lahko raznobarvni (Brown idr., b. d.). Čeprav njegova nahajališča niso redka, ima precejšen ekonomski pomen, saj ne služi samo kot vir fluorovodikove kisline, temveč ima vlogo tudi v metalurgiji. O njegovem pomenu veliko pove že dejstvo, da je bil uvrščen že na prvi seznam kritičnih surovin, ki ga je Evropska komisija pripravila leta 2011, na njem pa je ostal na vseh dosedanjih posodobitvah, nazadnje leta 2023 (Grohol, Milan idr., 2023).

Pridobivanje

Nahajališča flourita različnih kakovosti lahko najdemo po vsem svetu, veliko jih tudi še ni bilo odkritih. Največji proizvajalci leta 2023 so bili Kitajska (55,6 %), Mehika (20,5 %) ter Mongolija (7,4 %) (Grohol idr., 2023). Zaloge so tudi v Evropi in sicer v Franciji, Nemčiji, Italiji, Španiji, Ukrajini, na Švedskem in Norveškem. Trenutno je odprtih pet rudnikov v Nemčiji, Italiji in Španiji (Albert & Bertrand, 2025). Največ rudnikov je delovalo v Franciji, vendar so bili zaradi izčrpanja zalog na lokacijah zaprti, kar je zaradi zvišanja stroškov vodilo v zaprtje bližnjega fluorokemijskega obrata, kar kaže na strateški pomen domače proizvodnje te za gospodarstvo pomembne surovine (Lusty idr., 2008).



EU iz tretjih držav (vključno z ZK) uvozi 63 % uporabljenega fluorspara, od tega je največji uvoznik Mehika, iz katere je uvoženo 33 %. Države članice proizvedejo 36 %, od tega kar 23 % Španija (Grohol idr., 2023).

Izkopana ruda mora za nadaljnjo rabo vsebovati vsaj 20 % CaF_2, nato pa se jo očisti, dokler ne doseže zahtevane koncentracije. Najprej se rudo zmelje, nato pa se fluorit z eno od možnih tehnik loči od večine mineralov, ki imajo nižjo gostoto. Tako se doseže čistost 40 % CaF_2. Sledi postopek flotacije, kjer se z uporabo suspenzije z reagenti pridobi material zahtevane čistosti (Aigueperse idr., 2000). Različne uporabe določajo različno zahtevano stopnjo čistosti fluorita. Po najpogostejše uporabljeni klasifikaciji je surovina najvišje čistosti, vsaj 97 %, imenovana kislinska čistost, fluorit z vsaj 80 % CaF_2 pa metalurška stopnja čistosti (Hayes idr., 2017). Kislinska stopnja predstavlja približno dve tretjini uporabljenega fluorita, metalurška čistost pa tretjino (Brown idr., b. d.).

Uporaba

Glavna uporaba fluorita je proizvodnja fluorovodikove kisline (HF). Večina HF se proizvede po fluoritnem postopku, za kar je potreben fluorospar kislinske kakovosti. Fluoritu se pri temperaturi 100–300 °C doda koncentrirana žveplova kislina, pri tem pa nastaja plinast HF z vreliščem 19,5 °C, ki izpareva iz reaktorja in se pri nižjih temperaturah utekočini. V plinu pa so prisotne tudi nečistoče, ki se jih odstrani z destilacijo (Aigueperse idr., 2000). Tako pridobljeni HF se nato uporabi za sintezo fluoriranih spojin, kot so fluorirani polimeri, farmacevtske in agrofarmacevtske spojine ter UF_6, uporabljan pri obogatitvi jedrskega goriva. Za proizvodnjo HF je uporabljenih približno 40 % fluorita (Grohol idr., 2023).

Za pridobivanje HF pa obstaja tudi alternativa, saj je stranski produkt predelave fosfatov, ki so ključni v industriji gnojil. Fosfatna ruda vsebuje do 4 % fluora, ki se izloči v obliki fluorosilicijeve kisline, ta pa je nato pri visoki temperaturi hidrolizirana v silicijevo in fluorovodikovo kislino. Postopek je že uporabljan tudi v industriji. Kljub temu, da je večina kisline proizvedena po klasičnem postopku, predstavlja pomembno alternativo, saj zaloge fluorida v fosfatih presegajo zaloge fluorita (Aigueperse idr., 2000; Dahlke idr., 2016).

Flourospar kislinske kakovosti je uporabljan tudi pri proizvodnji aluminija, za kar se porabi 15 % proizvedenega flourita. Postopek kot vmesni produkt sicer še vedno proizvede HF, s katerim nato tvorimo kriolit. Ekstrakcija aluminija sicer poteka z elektrolizo taline aluminijevega oksida, vendar je njegovo tališče pri okoli 2000 °C, ki pa ga lahko z uporabo mešanice aluminijevega oksida in kriolita znižamo pod 1000 °C, s čimer zmanjšamo porabo energije pri sicer že tako energijsko intenzivnem postopku (Vecchio-Sadus idr., 1995). Uporabljeni fluoridi so v modernih procesih lahko reciklirani in ponovno uporabljeni v procesu (Aarhaug & Ratvik, 2019).

Fluorit se uporablja tudi kot talilo v železarski industriji. 36 % Proizvedenega fluorita se uporablja v predelavi železa in jekla, pri čemer pa zadostuje metalurška stopnja čistosti (Grohol idr., 2023). Žlindri se doda do 5 % fluorspara, ki ji zniža tališče, poveča fluidnost ter pomaga pri odstranjevanju nečistoč, predvsem žvepla in fosforja (Sarkar idr., 2022). HF pa se uporablja tudi za obdelavo površin nerjavečega jekla (Aries idr., 2022).

Zaključek

Fluorit je mineral, pomemben v številnih sektorjih industrije, predvsem kot vir fluorovodikove kisline. Potreben je tako farmaciji kot kmetijstvu, metalurgiji ter celo v tako vsakdanjih napravah, kot so hladilniki. Čeprav Evropska unija pokrije delež potreb z domačo proizvodnjo in ni odvisna

od enega uvoznika, je večina fluorita uvožena iz tretjih držav. Precejšnja najdišča se nahajajo v več državah članicah in obstaja potencial za povečanje proizvodnje, s čimer bi se povečala neodvisnost in odpornost na spremembe v dobavni verigi. Poleg količine pa je pomembna tudi čistost surovine. V določeni meri se kot alternativni vir lahko uporabi fluor, ki je stranski produkt proizvodnje gnojil.

Literatura

Aarhaug, T. A., & Ratvik, A. P. (2019). Aluminium primary production off-gas composition and emissions: An overview. *JOM*, *71*(9), 2966–2977. https://doi.org/10.1007/s11837-019-03370-6

Aigueperse, J., Mollard, P., Devilliers, D., Chemla, M., Faron, R., Romano, R., & Cuer, J. P. (2000). Fluorine compounds, inorganic. V Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Ur.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (str. a11_307). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a11_307

Albert, C., & Bertrand, G. (2025). *European onshore CRM resource evaluation v1* (Deliverable D2.5, GSEU Project 101075609). Geological Service for Europe. https://www.geologicalservice.eu/upload/content/2023/gseu_d2-5_european-onshore-crm-resource-evaluation-v1.pdf

Aries, E., Gómez, B. J., Mavromattis, S., Klein, G., Chronopoulos, G., & Roudier, S. (2022). *Best available techniques (BAT) reference document for the ferrous metals processing industry*. JRC Publications Repository. https://doi.org/10.2760/196475

Brown, T. J., Bide, T., Walters, A. S., Idoine, N. E., Shaw, R. A., Hannis, S. D., Lusty, P. A. J., & Kendall, R. (b. d.). *British geological survey*

Dahlke, T., Ruffiner, O., & Cant, R. (2016). Production of HF from H_2SiF_6. *Procedia Engineering, SYMPHOS 2015 - 3rd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry*, *138*, 231–239. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.080

Grohol, M., Veeh, C., & Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (European Commission). (2023). *Study on the critical raw materials for the EU 2023: Final report*. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585

Hayes, T. S., Miller, M. M., Orris, G. J., & Piatak, N. M. (2017). Fluorine (Chapter G). V K. J. Schulz, J. H. DeYoung Jr., R. R. Seal II, & D. C. Bradley (Ur.), Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply (Professional Paper 1802, str. G1–G53). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/pp1802G

Lusty, P., Brown, T., Ward, J., & Bloomfield, S. (2008). *The need for indigenous fluorspar production in England*. http://www.mineralsuk.com

Mukherjee, S., Rani, U., Chandra, G., & Pal, S. (2025). Recent advances in the synthesis of fluorinated heterocycles and a review of recent FDA-approved fluorinated drugs. *Organic & Biomolecular Chemistry*, *23*(35), 7821–7851. https://doi.org/10.1039/D5OB00997A

Noakes, T. (2002). Medical aerosol propellants. *Journal of Fluorine Chemistry*, *118*(1), 35–45. https://doi.org/10.1016/S0022-1139(02)00191-4

Sarkar, S., Anand, V., Ranjan, R., Borra, C. R., & Sahoo, P. P. (2022). Elimination of fluorspar use and reduction in lime consumption at ladle furnace by reutilizing alumina-rich ladle furnace slag. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *8*(1), 398–408. https://doi.org/10.1007/s40831-022-00492-1

Vecchio-Sadus, A. M., Dorin, R., & Frazer, E. J. (1995). Evaluation of low-temperature cryolite-based electrolytes for aluminium smelting. *Journal of Applied Electrochemistry*, *25*(12), 1098–1104. https://doi.org/10.1007/BF00242536

Zhang, W., & Liang, Y. (2023). The wide presence of fluorinated compounds in common chemical products and the environment: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(50), 108393–108410. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30033-6



Baker spet je osnova sedanjosti in prihodnosti

Andrii Hultiaiev[1,2,*], Evgeny Goreshnik[1,2], Dmytro Nesterov[3]

[1] Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana, Slovenija
[2] Institut »Jožef Stefan«, Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana, Slovenija
[3] Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

**e-mail: andrii.hultiaiev@ijs.si; evgeny.goreshnik@ijs.si; dmytro.nesterov@tecnico.ulisboa.pt*

Povzetek

Ti dve niti – baker kot redek vir in baker kot kemijski gradnik – sta bolj povezani, kot se zdi na prvi pogled: prav lastnosti, ki bakru dajejo edinstveno mesto v periodnem sistemu (visoka električna in toplotna prevodnost, odpornost na korozijo, sposobnost tvorbe stabilnih zlitin), so tiste, ki poganjajo naraščajoče povpraševanje po njem in ga tako uvrščajo med surovine, katerih zaloge postajajo strateško vse pomembnejše.

Ključne besede: baker, kritična surovina, kovinsko-organske mreže, poliamini, katalitski sistem

Baker v zgodovini

Zgodovina uporabe bakra se je začela pred 10 tisoč leti, ko je nekdo med prvimi ljudmi pobral rdečkasto-oranžni kamen, ga skoval v rezilo in nevede začel najdaljši odnos človeštva z enim samim kemijskim elementom. Ta kovina je dala ime celi dobi – bakreni dobi, in omogočila nastanek bronaste dobe (Doebrich, 2009). Ti dve dobi sta trajali skupaj več tisočletij in prispevali k nastanku velikih starodavnih državnih tvorb: Egipta, Sumerija, Asirije itd.

Vpliv bakra na sodobni tehnološki in gospodarski razvoj

Pojav elektrike je sprožil drugi zagon za aktivno uporabo bakra kot kovine z eno najnižjih vrednosti električne upornosti in visoko toplotno prevodnostjo (Britannica, 2026). Zato ga danes intenzivno uporabljamo v elektromotorjih, generatorjih, mikroelektroniki ter v omrežjih za prenos in shranjevanje električne energije. Sedanji razcvet uporabe te kovine je povezan predvsem z hitrim razvojem robotike, umetne inteligence in podatkovnih centrov. Vsak klik v iskalniku Google, zagon avtomobila, prižig stropne svetilke in nevronske mreže – nič od tega ne bi delovalo brez bakra.

Zato je današnje povpraševanje po tej kovini vse težje zadovoljiti s trenutnim tempom pridobivanja. Posledično narašča tudi vrednost bakra kot dragocene kovine na finančnih trgih – v obdobju 2022–2024 se je njegova cena povečala za 35–45 % (Comex, 2026). Ocenjujejo, da bo primanjkljaj bakra do leta 2030 znašal 1–2 milijona ton (Vicente, 2026). Zato je baker danes uvrščen med »kritične surovine« brez katerih sedanji razvoj ni mogoč.

Baker kot gradnik novejših materialov

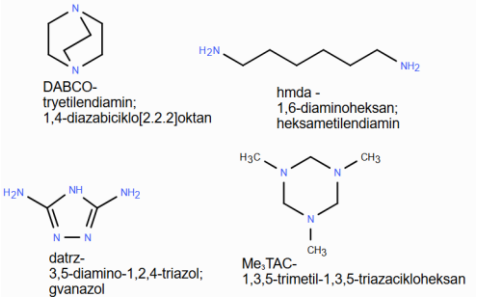
Baker se ne uporablja le kot trdna kovina. Bakrovi atomi so namreč odlični pri tvorbi koordinacijskih vezi z drugimi molekulami (na osnovi ogljika in drugih makroelementov), ki delujejo kot povezovalni členi (*angl.* »linkers«) in gradnike povežejo v veliko večje strukture. Za

lažje razumevanje si lahko bakrov ion predstavljamo kot vozlišče z več odprtimi vtičnicami (prostimi orbitalami), organske molekule pa kot opornike z ujemajočimi se čepi na vsakem koncu (atomi, ki imajo v zunanji orbitali nevezni elektronski par in delujejo kot donorji elektronov). Namesto trdne kovinske mreže tako nastanejo organokovinske koordinacijske spojine. Če jih dovolj med seboj povežemo, dobimo koordinacijski polimer s ponavljajočimi se strukturnimi enotami: 1-D verige, ploščice ali 3-D kletke. Kadar so te strukture porozne, torej vsebujejo številne drobne notranje tunele in komore, jih imenujemo kovinsko-organski okvirji oziroma MOF.

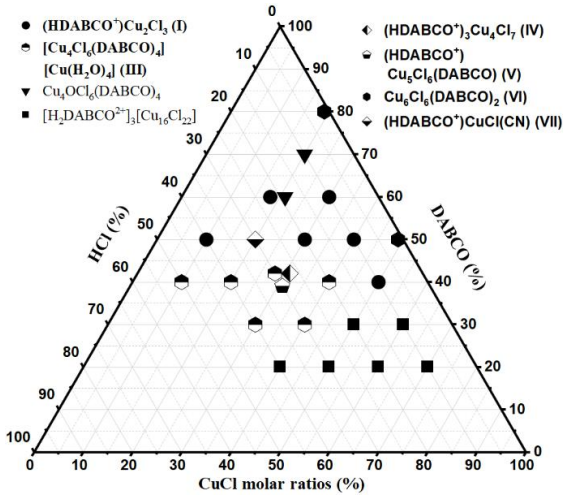
Vse te spojine so za industrijo izjemno zanimive: shranjevanje in ločevanje plinov ter tekočin, katalizo, senzoriko, biomedicino, kondenzatorje in podobno (Pettinari idr., 2017).

Raziskovalno delo

Predmet te študije je raziskovanje novih mononuklearnih, polinuklearnih in polimernih klorokupratov(I), ki vsebujejo organske poliaminske ligande (Hultiaiev & Goreshnik, 2026), znotraj diagrama sestave (**Slika 2**). V sintezni del raziskave sta bili vključeni elektrokemijska in solvotermalna metoda. Pri sintezi so bili uporabljeni ligandi, predstavljeni na **Sliki 1**.



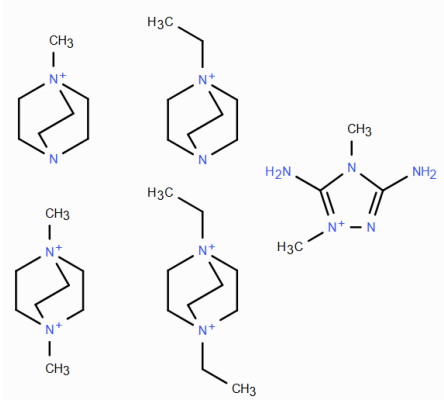
Slika 1: Ligandi za tvorbo koordinacijskih spojin.



Slika 2. Diagram sestave CuCl–poliamin–HCl za koordinacijske spojine sestave Cu–Cl–DABCO, sintetizirane s solvotermalno metodo.

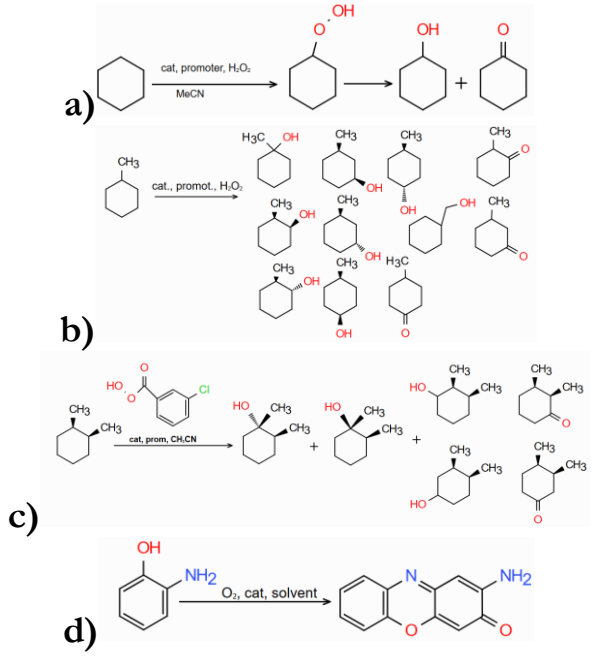
Sintetiziranih in okarakteriziranih je bilo 27 novih koordinacijskih spojin klorokuprata(I) z 8 različnimi poliaminskimi ligandi, t.j. 8 spojin z organskimi fragmenti DABCO (Hultiaiev & Goreshnik, 2026; 6 spojin z *N-Et*-DABCO; 5 spojin z *N-Me*-DABCO; 4 spojine z datrz; 1 spojina *N,N-Me*$_2$datrz; 1 spojina z *N-Me*datrz; 1 spojina s hmda in 1 spojina z *N,N´,N´´-Me*$_3$TAC. Z elektrokemijsko metodo so bile sintetizirane dve polimerni spojini z DABCO-m, 1 polimerna spojina s hmda ter 1 binuklearni klorokuprat z *N,N´,N´´-Me*$_3$TAC. Večina teh spojin se pojavlja v vzorcih, ki pokrivajo območje diagrama sestave $CuCl_2$–DABCO–HCl pri nizki koncentraciji HCl. Drugi klorokuprati – tisti z DABCO-m, *N*-alkiliranimi analogi DABCO-a organskimi kationi in *N*-alkiliranimi gvanazolnimi ligandi, kot tudi spojine z gvanazolnim ligandom – so bili sintetizirani s solvotermalno metodo. Spojine z DABCO-m in gvanazolom so nastale pri solvotermalni sintezi in pokrivajo območje diagrama sestave z nizko vsebnostjo HCl ali njene odsotnosti.

Spojine z *N*-alkiliranimi poliamini (**Slika 3**) se pojavljajo v območju z visoko koncentracijo HCl, ki v prisotnosti CuCl kot katalizatorja spodbuja nastanek vezi C–*N* med molekulami alkohola in amina po mehanizmu prenosa vodika oziroma (*angl.* »hydrogen autotransfer«) (Irrgang & Kempe, 2019). Vse nastale spojine so bile analizirane in okarakterizirane z rentgensko difrakcijo na monokristalu ter Ramansko spektroskopijo.



Slika 3: *Ligandi* N-Me*DABCO,* N-Et*DABCO in* N-Me*datrz, pripravljeni* in situ *s solvotermalno metodo po mehanizmu prenosa vodika.*

En klorokuprat z ligandom DABCO ter štirje klorokuprati z ligandoma *N-Et*-DABCO in *N-Me*-DABCO (n = 0.1 – 2 mmol) so bili preizkušeni v katalitski študiji oksidacije alkanov s cepitvijo vezi C–*H* v molekulah: cikloheksana (Nesterova idr., 2019), metilcikloheksana (Bilyachenko idr., 2016)), s peroksidi pa tudi pri oksidativnemu spajanju fenoksazin-3-ona iz 2-aminofenola prek tvorbe vezi C–*N* in C–*O* (Nesterova idr., 2025). Oksidacija alkanov s peroksidi poteka ob nastanku zmesi ketonov in alkoholov kot glavnih produktov, komercialno znane kot KA-olje, ki služi kot izhodna molekula za tvorbo poliamidov najlon-6 in najlon-6,6 (Conceição idr., 2023) (**Slika 4**).



Slika 4. Reakcijske sheme katalitskih reakcij s kompleksi – oksdidacij alkanov s peroksidi: (a) cikoheksana, (b) metilcikloheksana, (c) cis-1,2-dimetilcikloheksana in (d) oksidativnega spajanja fenoksazin-3-ona.

Trijedrni kompleks [*N,N´*-Et_2DABCO]$_2$[Cu_3Cl_7][H_2O] in štirijedrni kompleks [(*N*-MeDABCO)$_2$$Cu_4Cl_6$][MeOH], oba z 0-D baker-kloridnimi fragmenti, izkazujeta izrazito začetno katalitsko aktivnost, ki pri blagi oksidaciji alkanov pojenja in vodi do visokih izkoristkov produktov (alkoholov in ketonov). Po drugi strani pa 3-D koordinacijska mreža [*N,N´*-Me_2DABCO]$_2$[Cu_9Cl_{13}] kaže šibko začetno katalitsko aktivnost, ki se postopoma povečuje. Pri oksidativni sklopitvi fenoksazinona pa ob začetku reakcije kaže visoko hitrost, ki se nato zmanjša, medtem ko krivulja nastanka produkta vseeno narašča vse do konca reakcije.

Zaključek

Vsak gram bakra, ki se uporablja v katalizi, premazu ali koordinacijskem polimeru, je gram, ki ga ni treba kopati iz vse slabše rude. Molekularna kemija bakra pogosto potrebuje le majhne količine kovine za nalogo, ki bi sicer zahtevala kilograme razsutega materiala – bakrove katalizatorje je danes na primer mogoče uporabljati že v koncentracijah nekaj sto delcev na milijon (ppm). Hkrati to sovpada z razvojem recikliranih in samoobnavljajočih se katalizatorjev, ki po razgradnji znova vzpostavijo svojo aktivnost. Pomemben je tudi razvoj katalitičnih kaskad na osnovi koordinacijskih spojin in MOF-ov, ki združujejo več reakcijskih korakov v enotno, obnovljivo platformo. To je skladno s širšim ciljem vzpostavitve zaprtozančnih katalitičnih sistemov, ki združujejo učinkovitost, okoljsko združljivost in ekonomsko upravičenost.

Literatura

Bilyachenko, A. N., Levitsky, M. M., Yalymov, A. I., Korlyukov, A. A., Vologzhanina, A. V., Kozlov, Y. N., Shul'pina, L. S., Nesterov, D. S., Pombeiro, A. J. L., Lamaty, F., Bantreil, X., Fetre, A., Liu, D., Martinez, J., Long, J., Larionova, J., Guari, Y., Trigub, A. L., Zubavichus, Y. V., … Shul'pin, G. B. (2016). A heterometallic (Fe_6Na_8) cage-like silsesquioxane: Synthesis, structure, spin glass behavior and high catalytic activity. *RSC Advances*, 6, 48165–48180. https://doi.org/10.1039/C6RA07081G



Conceição, N. R., Mahmoud, A. G., Guedes da Silva, M. F. C., Mahmudov, K. T., & Pombeiro, A. J. L. (2023). Catalytic cyclohexane oxidation to KA oil using novel hydrosoluble copper(I) complexes bearing aminophosphine ligands: Water as a selectivity promoter. *Molecular Catalysis*, 549, 113512. https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.113512

Doebrich, J. (2009). Copper: A metal for the ages (Fact Sheet 2009–3031). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/fs20093031

Graham, P. M., Pike, R. D., Sabat, M., Bailey, R. D., & Pennington, W. T. (2000). Coordination polymers of copper(I) halides. *Inorganic Chemistry*, 39(22), 5121–5132. https://doi.org/10.1021/ic0005341

Hultiaiev, A., & Goreshnik, E. (2026). Systematic investigation of coordination compounds in the CuCl–DABCO–HCl composition space diagram. *Journal of Coordination Chemistry*, 79(12), 1502–1527. https://doi.org/10.1080/00958972.2026.2694413

Irrgang, T., & Kempe, R. (2019). 3d-Metal catalyzed *N*- and *C*-alkylation reactions via borrowing hydrogen or hydrogen autotransfer. *Chemical Reviews*, 119(4), 2524–2549. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00306

Nesterova, O. V., Bondarenko, O. E., Pombeiro, A. J. L., & Nesterov, D. S. (2025). Phenoxazinone synthase-like catalytic activity of bi- and trinuclear copper(II) complexes with 2-benzylethanolamine: Experimental and theoretical investigations. *ChemPlusChem*, 90(5), Article e202400613. https://doi.org/10.1002/cplu.202400613

Nesterova, O. V., Kopylovich, M. N., & Nesterov, D. S. (2019). A comparative study of the catalytic behaviour of alkoxy-1,3,5-triazapentadiene copper(II) complexes in cyclohexane oxidation. *Inorganics*, 7(7), 82. https://doi.org/10.3390/inorganics7070082

Pettinari, C., Marchetti, F., Mosca, N., Tosi, G., & Drozdov, A. (2017). Application of metal–organic frameworks. *Polymer International*, 66(6), 731–744. https://doi.org/10.1002/pi.5315

Encyclopaedia Britannica. (2026, 1. september). Copper. https://www.britannica.com/science/copper

Comex. (2026, 4. september). Metals. Macrotrends. https://www.macrotrends.net/1476/copper-prices-historical-chart-data

Vicente, A. D. (2026, 11. februar). J.P. Morgan lifts long-term copper call to $5.50/lb as structural deficit deepens. *Mining Reporters*. https://www.miningreporters.com/noticia/news/2026/02/jp-morgan-copper-5-50-deficit-worsens-2030-2035



Kroženje elementov redkih zemelj v okolju in njihov ekološki vpliv

Patricija Lap[1,*], Maja Ponikvar–Svet[1], Gašper Tavčar[1], Marko Jeran[1]

[1] Institut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana, Slovenia

**e-mail: patricija.lap@ijs.si*

Povzetek

Elementi redkih zemelj predstavljajo pomembno skupino materialnih virov, ki v zadnjih letih vzbuja vse več pozornosti. Zaradi svojih edinstvenih fizikalnih in kemijskih lastnosti so postali nepogrešljivi v številnih sodobnih tehnologijah. Njihovo vse obsežnejše pridobivanje in uporaba pa povečujeta obremenitev okolja ter vzbujata vse večjo zaskrbljenost glede možnih vplivov na zdravje ljudi in drugih organizmov. Študije kažejo, da lahko elementi redkih zemelj v celice vstopajo po različnih poteh ter vplivajo na delovanje organov in organskih sistemov, med drugim prek sprememb na genetski in epigenetski ravni ter vpliva na celične signalne poti. V prihodnje bo zato odgovorno ravnanje z elementi redkih zemelj in drugimi kritičnimi surovinami ključnega pomena za zmanjševanje okoljskih tveganj ter ohranjanje zdravih in funkcionalnih ekosistemov.

Ključne besede: elementi redkih zemelj (REE), antropogeni vnos v okolje, toksičnost, kroženje elemntov redkih zemelj, bioakumulacija.

Uvod

Elementi redkih zemelj (REE) so skupina 17 elementov, ki imajo podobne kemijske in fizikalne lastnosti. Mednje sodi 15 lantanoidov ter itrij in skandij. Kljub svojemu imenu v naravi niso tako redko zastopani, saj so petnajsta najbolj zastopana skupina elementov v zemeljski skorji. Glede na njihovo atomsko število jih delimo na lahke in težke elemente redkih zemelj (Anastopoulos idr., 2016). Zaradi svojih edinstvenih fizikalnih in kemijskih lastnosti so nepogrešljivi v številnih tehnologijah po vsem svetu. Kitajska, ki prevladuje na svetovnem trgu, je sila, ki je najbolj bogata z omenjenimi surovinami (Alonso idr., 2012). Na Kitajskem se REE uporabljajo tudi v kmetijstvu in gozdarstvu (gnojila na osnovi redkih zemelj) ter v živinoreji (kot pospeševalci rasti) (Krebs, 2006). V svetu se zaradi porasta visokotehnoloških industrijskih aplikacij redkih zemeljskih elementov (v medicini, mobilni komunikaciji, energetiki, elektroniki ipd.) povečuje njihov antropogeni vnos v okolje in vzbuja novo zaskrbljenost – prisotnost REE v kopenskem ali morskem okolju ostaja neregulirana in ni vključena v redno spremljanje za zagotavljanje varnosti okolja in zdravja ljudi. Elementi redkih zemelj so znani tudi kot kazalci geokemijskih procesov v tleh. Obstajajo tako naravne kakor tudi antropogene poti, po katerih ti elementi prehajajo v okolje in vplivajo na ljudi in druge organizme prek kumulativnih in sinergijskih učinkov (Gwenzi idr., 2018).

Kroženje REE v okolju

Leta 2017 so MacMillan in sodelavci izvedli obsežno študijo o prisotnosti redkih zemelj v naravnem okolju, pri čemer so analizirali morske, sladkovodne in kopenske ekosisteme v subarktični tajgi (Quebec, Kanada). Avtorji so dokazali, da so najvišje koncentracije REE prisotne v bioti, kot so lišaji in mahovi ter morski in sladkovodni nevretenčarji na dnu prehranjevalne verige. Slednje nakazuje, da bi bili ti organizmi lahko uporabljeni kot dobri bioindikatorji onesnaženosti z



elementi redkih zemelj. V skladu s temi ugotovitvami je druga skupina raziskovalcev z analizo rib, bentoških makronevretenčarjev in zooplanktona iz jezerskih ekosistemov zmernega pasu v južnem Quebecu (Kanada) pokazala, da so REE v sladkovodni prehranjevalni mreži podvrženi trofičnemu redčenju (Amyot idr., 2017).

Sami mehanizmi toksičnosti redkih zemelj na okolje in ljudi še vedno niso dobro pojasnjeni in zahtevajo nadaljnje raziskave. So pa številne študije *in vitro* ter *in vivo* potrdile, da je toksičnost odvisna od razmerja med odmerkom in učinkom (Benedetto idr., 2018). Slednje so pokazale tudi mnoge koristne učinke pri nizkih koncentracinjah ter zaviralne oz. toksične učinke pri visokih koncentracijah (Pagano idr., 2015). Mehanizmi, preko katerih lantanoidi vplivajo na delovanje celic, kažejo na so-odvisnost z velikostjo njihovih ionskih polmerov in kažejo podobnost z velikostjo kalcijevih, magnezijevih in železovih kationov. Ti elementi lahko na ta način tekmujejo z esencialnimi ioni, ki so nujno potrebni za normalno delovanje celice, jih nadomestijo in posledično spremenijo biokemijske poti ter posledične fiziološke procese v živalskih, rastlinskih in človeških celicah. Pojav t.i. hormeze pri REE – dvofazni odziv na odmerek, za katerega sta značilna spodbujanje rasti pri nizkih koncentracijah in zaviranje rasti pri visokih koncentracijah, je bil dokazan tako pri kopenskih kot pri morskih rastlinah (Agathokleous, 2018). Vse rastlinske vrste odražajo sestavo tal na rastišču, zato lahko rastline in morske alge predstavljajo pomemben vir izpostavljenosti elementom redkih zemelj in posledični vir prenosa teh elementov na živali ter ljudi (Squadrone idr., 2019).

Pomembno je razumeti, da snovi v naravi nenehno krožijo ter prehajajo med različnimi deli ekosistema. Tako elementi redkih zemelj, ki so prisotni predvsem v kamninah in mineralih zaradi njihovega preperevanja in drugih abiotskih vplivov, lahko preidejo v tla, reke in sčasoma tudi v morje. V morski vodi se le-ti lahko raztopijo ali se vežejo na delce, ki se posedajo na morsko dno. Kot že zgoraj omenjeno, se ti delci vgrajujejo v morsko rastlinsko biomaso in posledično tudi v živali. Ribe lahko majhne količine teh elementov kopičijo v svojih tkivih. Človek lahko tako ob zaužitju rib ali druge morske hrane v svoje telo privzame tudi elemente redkih zemelj. Del REE, ki jih človek zaužije, se izloči iz telesa ter skupaj z odpadno vodo preide v kanalizacijo. Kanalizacija odpadno vodo odvede v čistilno napravo, kjer se očisti. Pri čiščenju se del teh elementov odstrani iz vode, del pa jih še vedno ostane v prečiščeni vodi. Le-ta kasneje preide nazaj v okolje, v reko ali morje. Tako se elementi ponovno vključijo v naravne procese in s sčasoma pridejo nazaj v organizme, sedimente in kamnine (Hatje idr., 2024).

V zadnjih desetletjih sta vse večja uporaba redko-zemeljskih elementov v sodobnih tehnologijah ter njihova prisotnost v gnojilih vzbudili zaskrbljenost zaradi njihovega vpliva na onesnaževanje prsti in voda. Posledično se je močno povečalo število raziskav, ki obravnavajo toksičnost REE za rastline, živali in ljudi, njihovo usodo v sistemih prst–rastlina, kroženje v ekosistemih ter vpliv onesnaženosti z REE na prehransko varnost.

V prihodnje bo potrebno še podrobneje preučevati vplive elementov redkih zemelj na okolje, zlasti njihove interakcije z železom (Fe), aluminijem (Al), zemeljskoalkalijskimi kovinami in predvsem s fluoridom. Fluorid je namreč bioaktiven ter z REE tvori tako komplekse kot tudi slabo topne oborine, kar lahko pomembno vpliva na njihovo mobilnost, dostopnost in usodo v okolju (Sager in Wiche, 2024).

Zaključek

Na podlagi predstavljenih ugotovitev lahko sklenemo, da elementi redkih zemelj zaradi svoje vse večje uporabe predstavljajo potencialno tveganje za okolje in žive organizme, čeprav njihovi dolgoročni vplivi še niso v celoti raziskani. V prihodnje bo zato ključnega pomena izboljšati spremljanje njihove prisotnosti in usode v okolju, podrobneje proučiti njihove učinke na



prehranjevalne verige ter razvijati učinkovitejše ukrepe za preprečevanje in zmanjševanje njihovega vnosa v tla in vode. Le z nadaljnjimi raziskavami, ustreznim okoljskim spremljanjem in premišljenimi ukrepi bomo lahko zagotovili varno in trajnostno uporabo teh vse pomembnejših elementov.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa P1-0045 in projekta občanske znanosti O1-0327, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

Literatura

Agathokleous, E. (2018). Environmental hormesis, a fundamental non-monotonic biological phenomenon with implications in ecotoxicology and environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 1042–1053. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.003

Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., & Kirchain, R. E. (2012). Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3406–3414. https://doi.org/10.1021/es203518d

Amyot, M., Clayden, M. G., MacMillan, G. A., Perron, T., & Arscott-Gauvin, A. (2017). Fate and trophic transfer of rare earth elements in temperate lake food webs. *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6009–6017. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00739

Anastopoulos, I., Bhatnagar, A., & Lima, E. C. (2016). Adsorption of rare earth metals: A review of recent literature. *Journal of Molecular Liquids*, 221, 954–962. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.076

Benedetto, A., Bocca, C., Brizio, P., Cannito, S., Abete, M. C., & Squadrone, S. (2018). Effects of the rare elements lanthanum and cerium on the growth of colorectal and hepatic cancer cell lines. *Toxicology in Vitro*, 46, 9–18. https://doi.org/10.1016/j.tiv.2017.09.024

Gwenzi, W., Mangori, L., Danha, C., Chaukura, N., Dunjana, N., & Sanganyado, E. (2018). Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants. *Science of the Total Environment*, 636, 299–313. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.235

Hatje, V., Schijf, J., Johannesson, K. H., Andrade, R., Caetano, M., Brito, P., Haley, B. A., Lagarde, M., & Jeandel, C. (2024). The global biogeochemical cycle of the rare earth elements. *Global Biogeochemical Cycles*, 38(6), e2024GB008125. https://doi.org/10.1029/2024GB008125

Krebs, R. E. (2006). *The history and use of our Earth's chemical elements: A reference guide* (2. izd.). Greenwood Press.

MacMillan, G. A., Chételat, J., Heath, J. P., Mickpegak, R., & Amyot, M. (2017). Rare earth elements in freshwater, marine, and terrestrial ecosystems in the eastern Canadian Arctic. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 19(10), 1336–1345. https://doi.org/10.1039/C7EM00082K

Pagano, G., Aliberti, F., Guida, M., Oral, R., Siciliano, A., Trifuoggi, M., & Tommasi, F. (2015). Rare earth elements in human and animal health: State of art and research priorities. *Environmental Research*, 142, 215–220. https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.039

Sager, M., & Wiche, O. (2024). Rare earth elements (REE): Origins, dispersion, and environmental implications – A comprehensive review. *Environments*, 11(2), 24. https://doi.org/10.3390/environments11020024

Squadrone, S., Brizio, P., Stella, C., Mantia, M., Battuello, M., Nurra, N., Sartor, R. M., Orusa, R., Robetto, S., Brusa, F., Mogliotti, P., Garrone, A., & Abete, M. C. (2019). Rare earth elements in marine and terrestrial matrices of Northwestern Italy: Implications for food safety and human health. *Science of the Total Environ*ment, 660, 1383–1391. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.112



Kritični materiali v temeljnih raziskavah anorganske kemije

Tomaž Mržljak[1], Melita Tramšek[1]

[1] Instutut "Jožef Stefan", Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Ljubljana

**e-mail: tomaz.mrzljak@ijs.si, melita.tramsek@ijs.si*

Povzetek

V prispevku želimo prikazati pomen temeljnih raziskav v anorganski kemiji za reševanje izzivov tudi na področju kritičnih materialov. Medtem ko družba te materiale (npr. litij, baker, redke zemlje) vidi skozi gospodarsko in geopolitično tveganje, kemiki preučujemo njihovo elektronsko zgradbo, vezi in koordinacijsko geometrijo. Na primeru raziskav ksenonovega difluoride kot liganda v koordinacijskih spojinah z bakrom in nikljem prikazujemo, kako odkrivanje novih spojin širi meje znanja. Razumevanje osnovnih lastnosti je dolgoročno ključno za načrtovanje novih materialov in njihovo učinkovitejšo uporabo.

Ključne besede: nikelj, baker, rutenij, ksenonov difluorid

Kako vidimo kritične materiale v temeljnih raziskavah anorganske kemije

Ko govorimo o kritičnih materialih, najpogosteje pomislimo na litij v baterijah, redke zemlje v trajnih magnetih, baker v električnih omrežjih ali galij in germanij v sodobni elektroniki. O kritičnih materialih in njihovem pomenu v sodobni družbi spremljamo novice v medijih, ki nam pogosto ustvarjajo nove zemljevide gospodarske moči sveta. Evropska unija kritične surovine opredeljuje predvsem glede na njihov gospodarski pomen in tveganje pri oskrbi (European Commission, 2024). Njihova »kritičnost« torej ni kemijska lastnost, temveč odraz njihovega pomena za sodobno družbo, tehnologijo in strateško neodvisnost.

Za kemika pa imajo vsi elementi periodnega sistema, tudi kritični, bolj temeljno lastnost: vsak od njih ima svojo kemijsko »osebnost«. Razlikujejo se po elektronski zgradbi, oksidacijskih stanjih, sposobnosti tvorjenja vezi in kompleksov ter po načinu, kako se njihovi atomi povezujejo v spojine. Prav razumevanje teh osnovnih lastnosti je temelj za razvoj novih materialov, učinkovitejšo uporabo obstoječih in tudi iskanje njihovih možnih nadomestkov.

Potreba po takšnem znanju postaja vse večja. Elektrifikacija prometa, razvoj obnovljivih virov energije, baterij, elektroenergetskih omrežij in digitalnih tehnologij hitro povečujejo povpraševanje po številnih kritičnih in strateških surovinah (International Energy Agency, 2026a & 2026b). Pri tem pa ni dovolj vprašanje, kje bomo material pridobili. Enako pomembno je vprašanje, kaj z njim znamo narediti.

Od elementov do novih materialov

Raziskovalno področje temeljne anorganske sinteze lahko pripomore k boljšemu razumevanju osnovnih kemijskih prvin: kako se atomi oziroma ioni med seboj povezujejo, pri kakšnih reakcijskih pogojih je mogoče pripraviti določene spojine, kako so spojine obstojne in še bi lahko naštevali. Majhna sprememba v okolici določenega atoma lahko vodi v povsem drugačno geometrijo, kristalno strukturo ali elektronske lastnosti.

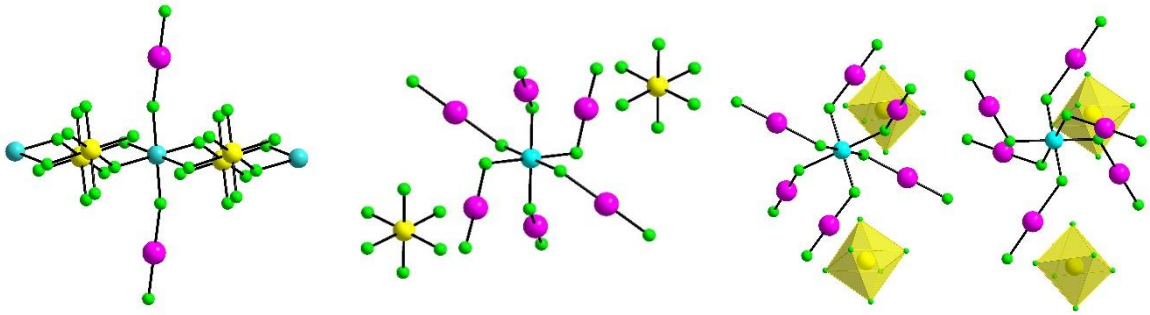
Takšno znanje je pomembno na številnih področjih sodobne tehnologije. Koordinacijska kemija redkih zemelj je na primer osnova za raziskave novih optičnih in fotofunkcionalnih materialov, senzorjev, materialov za detekcijo sevanja in nekaterih biomedicinskih tehnologij (Song idr., 2026). Toda v temeljni znanosti je pogosto zanimiv tudi sistem, za katerega danes še ne poznamo neposredne uporabe. Nova spojina je lahko pomembna zato, ker pokaže, da je neka kemijska vez mogoča, da lahko element zavzame nepričakovano koordinacijsko okolje ali da se lahko isti gradniki organizirajo na več različnih načinov. Takšna spoznanja širijo meje tega, kar v kemiji razumemo kot mogoče.

Ksenon – od »inertnega« plina do serije spojin

Zanimiv primer predstavlja ksenon. Žlahtne pline tradicionalno povezujemo z njihovo kemijsko inertnostjo, vendar je razvoj kemije žlahtnih plinov pokazal, da je ta predstava preveč poenostavljena in napačna. Ksenon tvori številne spojine, med njimi tudi XeF_2, ki je pomemben fluorirni in oksidacijski reagent (Tramšek & Žemva, 2006).

XeF_2 lahko v ustreznih pogojih deluje tudi kot ligand in se koordinira na kovinske centre (Tavčar idr., 2004; Tavčar & Tramšek, 2015). S temi raziskavami se je odprlo posebno področje koordinacijske kemije, v katerem molekule XeF_2, kovine in različni anioni postanejo tudi gradniki kompleksnih struktur.

V našem raziskovalnem delu smo to kemijo pred kratkim razširili na nove spojine bakra(II) in niklja(II) z anionom $[RuF_6]^-$ in različnim številom vezanih molekul XeF_2 (Mržljak idr., 2025) (**Slika 1**). Spreminjanje števila ligandov vodi do pomembnih sprememb v koordinacijskem okolju kovinskega iona in v končni kristalni strukturi. Zanimivo je tudi, da se baker in nikelj pri tem ne obnašata povsem enako (Mržljak idr., 2025).



Slika 1: Kristalne strukture $[M(XeF_2)_2][RuF_6]_2$ (M = Ni, Cu), $[Ni(XeF_2)_6][RuF_6]_2$ in $[Cu(XeF_2)_6][RuF_6]_2$ (vir: Mržljak et al., 2025).

Ta primer lepo pokaže, kako lahko temeljno raziskovanje na videz zelo specifičnega kemijskega sistema razkrije nove načine povezovanja atomov in molekul. Prav takšno znanje je osnova za razumevanje in načrtovanje kompleksnejših materialov.

Zakaj je to pomembno za kritične materiale?

Na prvi pogled kemija XeF_2, $[RuF_6]^-$ in bakra ali niklja nima veliko skupnega z baterijami, polprevodniki ali električnimi avtomobili. Toda prav v takšnih raziskavah nastaja znanje, ki je dolgoročno potrebno za načrtovanje novih materialov.



Če želimo kritični element učinkoviteje uporabljati, ga reciklirati ali nekoč nadomestiti z drugim elementom, moramo razumeti, zakaj ima v določeni tehnologiji sploh svojo vlogo. To pomeni razumeti njegove vezi, elektronsko strukturo, koordinacijsko kemijo in povezavo med strukturo ter lastnostmi.

Temeljna kemija je zato pomemben del zgodbe o kritičnih materialih. Ne ukvarja se samo z vprašanjem, koliko nekega elementa imamo na voljo, ampak tudi z vprašanjem, kakšne nove možnosti nam njegova kemija ponuja.

To je še posebej pomembno v času, ko se povpraševanje po kritičnih materialih hitro povečuje (International Energy Agency, 2026a & 2026b). Večja učinkovitost, recikliranje in nadomeščanje materialov bodo zahtevali nova znanja in nove kemijske pristope ter predvsem raziskovalke in raziskovalce, ki bodo ta znanja in nenazadnje veščine lahko uporabili.

Zaključek

Kritični materiali tako niso samo vprašanje rudarstva, industrije in geopolitike. So tudi vprašanje kemije. Zato so temeljne raziskave v kemiji več kot raziskovanje posameznega elementa in njegovih spojin. So tudi iskanje novih možnosti, ki nam jih ponuja periodni sistem elementov.

Literatura

European Commission. (2024). *European Critical Raw Materials Act*. European Commission. https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en

International Energy Agency. (2026a). *Critical minerals*. IEA. https://www.iea.org/topics/critical-minerals

International Energy Agency. (2026b). *Global critical minerals outlook 2026*. IEA. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2026

Mržljak, T., Goreshnik, E., Tavčar, G., & Tramšek, M. (2025). Coordination chemistry of copper and nickel with xenon difluoride and the hexafluororuthenate(V) anion: Synthesis and structural studies. *European Journal of Inorganic Chemistry, 28*(24), e202500275. https://doi.org/10.1002/ejic.202500275

Song, F., Su, P., Li, X., Yan, C.-H., Zhang, J.-L., & Tang, Y. (2026). Harnessing rare earth coordination chemistry for advanced photofunctional materials: From fundamental principles to emerging technologies. *Chemical Society Reviews, 55*, 5117–5197. https://doi.org/10.1039/D5CS00384A

Tavčar, S., & Tramšek, M. (2015). XeF_2 as a ligand to a metal center, an interesting field of noble gas chemistry. *Journal of Fluorine Chemistry, 174*, 14–21.

Tavčar, S., Tramšek, M., & Žemva, B. (2004). New class of coordination compounds with noble gas fluorides as ligands to metal ions. *Journal of Fluorine Chemistry, 125*, 1579–1584.

Tramšek, M., & Žemva, J. (2006). Synthesis, properties and chemistry of xenon(II) fluoride. *Acta Chimica Slovenica, 53*, 105–116.


NITON XLS
Plus
Seal Guard