

Uređuje: Vjeročka Vojvodić

Predstavljamo članak temeljen na predavanju doc. dr. sc. *Želimira Veinovića* "Zbrinjavanje radioaktivnog otpada – svjetska praksa i hrvatski izazovi", održanom 27. travnja 2016. u sklopu tribine "Novi aspekti zaštita okoliše u Hrvatskoj u okviru Europske unije", koju organiziraju *Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa (HDKI)* i *Sekcija za ekološko inženjerstvo*.

Vjeročka Vojvodić

*Želimir Veinović\**

## Zbrinjavanje radioaktivnog otpada – svjetska praksa i hrvatski izazovi

### Uvod

Ideja "dobre prakse" u gospodarenju radioaktivnim otpadom (RAO) i istrošenim nuklearnim gorivom (ING) mijenja se s napretkom inženjerskih znanja i tehnologija, ali već niz desetljeća uključuje nekoliko postupaka: predobradu RAO-a i ING-a (kompaktiranje, spaljivanje, solidifikaciju i sl.), pakiranje u spremnike, privremeno ili dugotrajno skladištenje te odlaganje koje podrazumijeva odvajanje otpada od okoliša nizom slabopropusnih barijera i/ili ukapanje u tlo.

Način gospodarenja RAO-om (u smislu njegova zbrinjavanja) mijenjao se i napredovao usporedno s napretkom znanosti i tehnologije do razine kada se sa sigurnošću može tvrditi da su i spremnici i načini postupanja otpadom sveli razinu rizika na minimum. Međutim sam pojam "radioaktivno", prečesto krivo zamijenjen s pojmom "nuklearno", u medijima se pojavljuje zajedno sa "zračenjem", "Fukušimom", "Černobilom", ako ni zbog čega drugog onda poradi senzacionalizma koji povećava čitanost, gledanost i popularnost. Danas se češće čuje o studentskim projektima na temu "osmisliti i kreirati manifestaciju za senzibiliziranje javnosti protiv odlaganja nuklearnog i radioaktivnog otpada" nego o projektima informiranja/educiranja javnosti o nuklearnoj energiji i radioaktivnom otpadu ili radijaciji uopće. Jedan od temelja kvalitetnog nuklearnog programa ili programa gospodarenja RAO-om neke države svakako podrazumijeva i uključivanje SVIH dionika, od šire javnosti, preko nevladinih udruga do lokalnih uprava, političkih stranaka, Vlade i sl. u program, od razine planiranja do razine izvedbe, korištenja i nadzora. Postoji niz primjera programa koji su propadali ili bivali restartani upravo zato što su naišli na odbijanje, najčešće poradi neinformiranosti.

Specifičnost hrvatskog programa gospodarenja RAO-om svakako je u tome što, iako na neki način traje još od 1979. godine,<sup>1</sup> nikada nije uključivao sustavni program informiranja/educiranja/uključivanja javnosti. Premda je objavljen niz publikacija na tu temu, do nedavno se nije ozbiljno prišlo tom problemu. Tako je u posljednjih nekoliko godina poduzet niz inicijativa s ciljem informiranja javnosti, od kojih treba izdvojiti "Info kutak o radioaktivnom otpadu", novi dio stalnog postava u Tehničkom muzeju Nikola Tesla (slika 1).



Slika 1 – "Info kutak o radioaktivnom otpadu", dio stalnog postava u Tehničkom muzeju Nikola Tesla<sup>2</sup>

\* Doc. dr. sc. *Želimir Veinović*, dipl. ing. rud.  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zavod za rudarstvo i geotehniku,  
Pierottijeva 6, HR-10 002 Zagreb  
e-pošta: [zelimir.veinovic@rgn.hr](mailto:zelimir.veinovic@rgn.hr)

Način izbora lokacije za skladište, odnosno odlagalište RAO-a, specifičan je problem kojem se može prići na nekoliko načina. Jedan je traženje optimalne lokacije i dogovor s lokalnim stanovništvom oko implementiranja te lokacije u program. Drugi je gotovo

dijametralno suprotan, u okviru cijele države se traže “općine dragovoljci”, a nakon što ih se dovoljan broj javi, kreće se u traženje lokacije unutar ponuđenih općina. Treći je kompromis između inženjerskog i sociološkog pristupa, odbacivanje lokacija koje su neprihvatljive s inženjerskog stajališta i tada pokretanje poziva općinama dragovoljcima. Svaki od navedenih pristupa ima svoje prednosti i nedostatke i svaki na svoj način zadaje glavobolje inženjerima koji, na kraju krajeva, moraju osigurati izgradnju objekta koji će na siguran način na dulje razdoblje biti siguran, održati cjelovitost i osigurati zaštitu ljudi i okoliša.

## Izvori radioaktivnog otpada i njegova klasifikacija

Postoji cijeli niz izvora RAO-a od kojih neki postoje i u Hrvatskoj. Sama definicija RAO-a nije jednostavna, jer “prirodno radioaktivni materijali”, bilo koncentrirani nekom ljudskom djelatnošću ili ne, ne spadaju u tu kategoriju iako mogu biti proizvodni (mineralni) otpad i sadržavati povišenu količinu radioaktivnosti (radionuklida). Istrošeno nuklearno gorivo (ING) također se ne smatra otpadom premda se kao najčešći postupak njegova zbrinjavanja podrazumijeva odlaganje u duboka geološka odlagališta, jednako kao i za visokoradioaktivni materijal. Najčešći izvori RAO-a su:

- medicina i industrija (ne uključujući dobivanje električne energije u nuklearnim elektranama)
- stare tehnologije (javljajući požara, gromobrani)
- istraživačke ustanove i laboratoriji
- vojska i vojna industrija
- nuklearne elektrane i postrojenja za proizvodnju nuklearnog goriva.

Tipovi RAO-a koji nastaje pri navedenim izvorima mogu se ugrubo podijeliti na:

- visokoradioaktivni otpad (VRAO), koji najčešće nastaje u komercijalnim, vojnim ili istraživačkim nuklearnim reaktorima i u procesu prerade istrošenog nuklearnog goriva koje se, neprerađeno, ne smatra otpadom već se zasebno klasificira,
- sredneradioaktivni otpad (SRAO), koji se kreće od tehnološki koncentriranog niskoradioaktivnog otpada do izvora znatne aktivnosti, a može se podijeliti na kratkoživi i dugoživi, ovisno o tipu sadržanih radionuklida,
- niskoradioaktivni otpad (NRAO).

Takva podjela otežava gospodarenje RAO-om budući da se određeni tipovi NRAO-a nakon nekog vremena mogu izuzeti. Detaljnija podjela dana je u tablici 1.

Odlaganje dugoživućeg SRAO-a i iskorištenih izvora (II) iz industrije i medicine ne mora nužno uključivati duboko ukapanje ispod površine, tako da će tehničko rješenje biti prilagođeno ne samo aktivnosti već i karakteristikama lokacije na kojoj se otpad odlaze ili planira odlagati.

Poseban izazov predstavlja prirodno radioaktivni materijal (*naturally radioactive material – NORM*), odnosno rudarskim aktivnostima na površinu iznesen i ponekad koncentrirani prirodno radioaktivni materijal (*technologically enhanced naturally radioactive material – TENORM*). Problem ovih materijala je zanimljiv s obzirom na to da se radi o praktički svakoj jalovini dobivenoj rudarskim radovima, pepelu nastalom spaljivanjem ugljena... a na neki način uključuje i radon oslobođen pri dobivanju nafte, plina i geotermalne energije.

Zbrinjavanje RAO-a svakako započinje skladištenjem u posebnim objektima koji, osim sigurnosti od emisije zračenja, odno-

Tablica 1 – Klasifikacija RAO-a

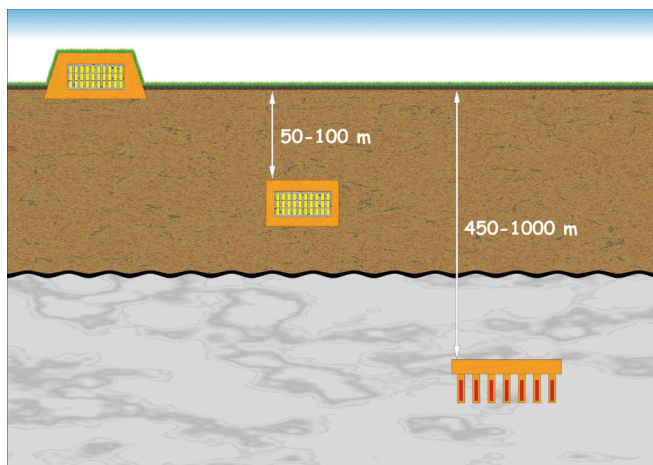
Naziv	Kratice	Opis	
Izuzeti radioaktivni otpad	IRA0	Otpad koji zadovoljava kriterije za izuzimanje ili isključenje iz regulatornog nadzora.	
Vrlo kratkoživi radioaktivni otpad	VKRA0	Otpad koji može biti zbrinut nekoliko godina (dana, mjeseci) i naknadno izuzet iz regulatorne kontrole u skladu s nuputkom odobrenim od strane regulatornog tijela.	
Vrlo niskoradioaktivni otpad	VNRA0	Otpad koji ne mora nužno zadovoljiti kriterije IRA0-a, no ne zahtijeva visoku razinu izolacije. Pogodan je za zbrinjavanje u pripovršinskim odlagalištima uz umjerenu regulatornu kontrolu. Takva odlagališta također mogu sadržavati i druge vrste opasnog otpada. Tipičan otpad u ovoj kategoriji sadrži zemljane materijale i jalovinu s niskom razinom aktivnosti. Koncentracije dugoživućih radionuklida općenito su vrlo ograničene.	
Niskoradioaktivni otpad	NRA0	Otpad koji je iznad razine izuzimanja, ali s ograničenim količinama dugoživućih radionuklida. Ovaj otpad zahtijeva robustan sustav izolacije. Pogodan je za zbrinjavanje u pripovršinskim odlagalištima s inženjerskim barijerama u trajanju od nekoliko stotina godina. NRA0 može sadržavati kratkoživuće radionuklide na višim razinama aktivnosti kao i dugoživuće radionuklide na relativno niskim razinama aktivnosti.	
Sredneradioaktivni otpad	Kratkoživi	SRA0	Otpad koji zbog svog sadržaja, posebno dugoživućih radionuklida, zahtijeva veći stupanj izolacije od one osigurane pripovršinskim odlagalištem. Međutim toplina nastala radioaktivnim raspadom uopće nije regulirana (u legislativnom smislu) ili je samo djelomično regulirana – većinom se radi o otpadu niske toplinske aktivnosti. SRA0 može sadržavati dugoživuće radionuklide, posebno radionuklide koji se neće raspasti na razinu aktivnosti prihvatljivu za pripovršinska odlagališta za vrijeme u kojem se moguće osloniti na institucionalnu kontrolu. Stoga otpad u ovoj kategoriji zahtijeva odlaganje na većim dubinama, od nekoliko desetaka metara do nekoliko stotina metara.
	Dugoživi		
Visokoradioaktivni otpad	VRA0	Otpad s razinama aktivnosti dovoljno velikim da radioaktivnim raspadom proizvodi značajne količine topline ili otpad s velikim količinama dugoživućih radionuklida. Opće priznata opcija za odlaganje VRA0-a je zbrinjavanje u dubokim i stabilnim geološkim formacijama, obično na dubini od 400 do 1000 metara. Prema Uredbi o uvjetima te načinu zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih zatvorenih radioaktivnih izvora izvora ionizirajućeg zračenja koji se ne namjeravaju dalje koristiti (NN 44/08) radioaktivni otpad u Republici Hrvatskoj (RH) klasificiran je u skladu s klasifikacijom Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA).	

sno izlaganja radionuklidima, podrazumijevaju i iznimno visoku razinu fizičkog osiguranja, s obzirom na to da spadaju u objekte posebnog značenja i namjene. Na slici 2 prikazan je detalj ograde (jedne od dvije sukcesivne) postavljene oko skladišta ING-a u Njemačkoj.



Slika 2 – Ograda oko skladišta ING-a u Njemačkoj

Kako je već rečeno, odabir dubine odlaganja (slika 3) ovisi o tipu otpada, tako da odlagališta mogu biti pripovršinska (od onih praktički na površini terena s uređenom podlogom do onih ukopanih par metara), plitka (na dubini od nekoliko metara do nekoliko desetaka metara) i duboka geološka odlagališta (na dubini od barem 450 metara).



Slika 3 – Odlagališta RAO-a s obzirom na dubinu ukapanja

## RAO u Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj postoji relativno mala količina RAO-a ( $7,5 \text{ m}^3$ ), koji je većinom smješten u dva skladišta institucionalnog RAO-a:

- skladište u sklopu Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) i
- skladište Instituta Ruđer Bošković (IRB).

Oba spomenuta skladišta nalaze se u Zagrebu i oba su zatvorena, a otpad u njima je kondicioniran i pohranjen u spremnicima

predviđenim za skladištenje, odnosno odlaganje. Vjerojatno je očit problem koji se pojavljuje u prethodnoj rečenici u vidu riječi "zatvorena", naime – niti jedno od ta dva skladišta više ne smije zaprimati institucionalni otpad.

Tipovi otpada koji se nalazi u tim skladištima su:

- radioaktivni gromobrani
- radioaktivni javljači požara
- medicinski izvori i drugi RAO iz medicine
- industrijski izvori
- izvori iz istraživačkih ustanova
- svjetleća boja
- dijelovi optičkih uređaja.

Potreba za novim skladištem RAO-a u Hrvatskoj ne proizlazi samo iz činjenice da su postojeća skladišta zatvorena, a da novi otpad svakodnevno nastaje, već i iz činjenice da je Republika Hrvatska, uz Republiku Sloveniju, suvlasnica nuklearne elektrane Krško (NEK) svaka s udjelom od 50 %, što ne uključuje samo kupovinu električne energije već i zbrinjavanje 50 % otpada. To je regulirano direktivom 2011/70/Euratom<sup>3</sup> i temeljem ugovora između Vlade Republike Hrvatske i Vlade Republike Slovenije. Nakon razgradnje NEK-a, predviđene za 2043. godinu, Hrvatska mora zbrinuti pola od  $3500 \text{ m}^3$  pogonskog NiSRAO-a i pola od dodatnih  $5400 \text{ m}^3$  nastalih razgradnjom elektrane. ING se za sad čuva u bazenu u sklopu elektrane, a od 2019. skladištiti će se u suhom skladištu na lokaciji NEK-a, predvidivo do kraja ovog stoljeća. Do predviđenog kraja rada elektrane 2043. godine skupit će se 2283 gorivna elementa, za polovicu kojih se mora pobrinuti Hrvatska.

Osim navedenog, Hrvatska mora sanirati i tri lokacije s prirodno radioaktivnim materijalima što uključuje odlagališta:

- pepela i šljake termoelektrane (TE) Plomin (1 110 000  $\text{m}^3$  nastalih radom dvije elektrane, od toga 900 000  $\text{m}^3$  radom TE Plomin 1, koja je rabila istarske ugljene s visokim koncentracijama urana i radija)
- pepela i šljake u Kaštel Sućurcu (oko 280 000  $\text{m}^3$  koji su nastali kao produkt sagorijevanja ugljena u tvorničkoj termoelektrani. 38 000  $\text{m}^3$  tog materijala odloženo je na uređeno odlagalište na lokaciji termoelektrane 1974. godine, a ostalo tek treba sanirati)
- fosfogipsa kod Kutine (odlagalište pokriva površinu od  $1,6 \text{ km}^2$ , a ukupni obujam fosfogipsa je oko  $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ).

Plan sanacije lokacija s prirodno radioaktivnim materijalima postoji, a RAO iz dva postojeće skladišta te ostali institucionalni RAO iz Hrvatske planira se spremati u centralno skladište unutar sljedećih nekoliko godina. Prihvat jedne polovine otpada iz Nuklearne elektrane Krško (NEK) i to nisko i sredneradioaktivnog (NSRAO), planira se za 2023. godinu, a odlagalište oko 2060. godine. ING će se skladištiti na lokaciji NEK od 2019. na dalje.

## Izbor lokacije skladišta i odlagališta RAO-a u Hrvatskoj

Kao što je rečeno, hrvatski program gospodarenja RAO-om službeno je, na neki način, započeo još 1979. godine, u razdoblju izgradnje NE Krško. Tadašnja ideja odlagališta bila je bitno drugačija, budući da je u sklopu Jugoslavije bila predviđena izgradnja desetak nuklearki i središnjeg odlagališta RAO-a. Projekt je rezultirao prijedlogom 13 makrolokacija za smještaj odlagališta RAO-a na području bivše Jugoslavije. Kad je ideja "saveznog nuklearnog programa" napuštena, briga za RAO prepuštena je Sloveniji i Hr-

Tablica 2 – Moguća rješenja za odabir lokacije skladištenja/odlaganja hrvatskog NiSRAO-a

Rješenje	Argumenti za	Argumenti protiv
Trgovska gora	Lokacija zadovoljava kriterije kako za skladištenje tako i za odlaganje RAO-a u tehničkom smislu. Nalazi se u Programu prostornog uređenja Republike Hrvatske.	Neslaganje lokalnog stanovništva s odabranom lokacijom. Neslaganje stanovništva iz pogranične zone Bosne i Hercegovine s odabranom lokacijom.
Vrbina u Sloveniji	Izbjegle bi se nesuglasice sa stanovništvom s područja Trgovske gore kao i iz pogranične zone Bosne i Hercegovine.	Ukupna negativna financijska razlika za hrvatsko gospodarstvo je preko pola milijarde eura. Lokacija odlagališta je unutar zagrebačkog vodonosnika. Tehničko rješenje je neprovereno (nema svjetskih iskustava). Slovenija ne bi prihvatila sav otpad (ne vojni i institucionalni) te bi se lokacija za njegovo odlaganje morala svejedno ponovo tražiti.
Restart programa	Odabrala bi se lokacija prema principu općina dragovoljaca i izbjegle nesuglasice s lokalnim stanovništvom.	Program bi se vratio više godina unazad. Hrvatska bi se našla u prekršaju međunarodnih/europskih sporazuma poradi produžetka rokova. Cijena odlaganja bi znatno porasla.

vatskoj te 1984. kreće novi, združeni program, a hrvatski zasebni program odabira lokacije za odlagalište, ovaj put isključivo nisko i srednje radioaktivnog otpada, 1988. godine. Program prestaje 1997. odabirom "4 preferentne lokacije" i nije nastavljen niti ponovno započet do unazad dvije godine, nastavkom ideje odlaganja na jednoj, preostaloj lokaciji.

Preostala lokacija je "Trgovska gora", preciznije "Čerkezovac" – teren i objekti trenutačno u vlasništvu hrvatske vojske. Ta solucija prezentirana je javnosti u nekoliko navrata nakon čega je lokalna zajednica javno odbila takvo rješenje.

Zašto Trgovska gora? Lokacija je odabrana prema inženjerskim i sociološkim kriterijima kao jedna od potencijalnih, što znači da zadovoljava i u geološkom, hidrogeološkom, hidrološkom, seizmičkom i svakom drugom smislu. Kao takva je ušla i u Program prostornog uređenja Republike Hrvatske, na žalost kao jedina potencijalna lokacija za odlagalište NiSRAO-a. Ono o čemu se nije vodilo dovoljno obzira je blizina granice s Bosnom i Hercegovinom, odnosno Republikom Srpskom. Danas se kao jedan od glavnih argumenata protivnika te lokacije navodi upravo blizina Bosne i Hercegovine, odnosno rijeke Une. Tehnički dobro odabrana lokacija za odlaganje NiSRAO-a postala je jednim od glavnih problema unutarnje i vanjske politike Republike Hrvatske gotovo preko noći.

Koja su moguća rješenja? Svakako postoji nekoliko mogućih, a kao vjerojatna mogu se navesti tri predstavljena u tablici 2. Pri tome treba reći da lokacija "Vrbina" u Sloveniji, određena za odlaganje slovenskog NiSRAO-a nije zamišljena da primi i hrvatski dio otpada iako se može tome prilagoditi. Međutim pregovori o tome s Republikom Slovenijom (koliko je autoru poznato) do sada nisu vođeni.

Svakako treba navesti da je izvedba sigurnog skladišta, jednako kao i odlagališta, u Hrvatskoj više nego moguća. Iskustvo hrvatskih inženjera i znanstvenika dostatno je za projektiranje i izgradnju ovakvih objekata u skladu s dobrom praksom onih već izgrađenih u svijetu. Primjerom dobre prakse odlaganja RAO-a, među ostalima, smatraju se: španjolsko odlagalište NSRAO-a El Cabil, britansko Drigg te Olkiluoto u Finskoj, a kvalitetnih rješenja za dugoročno skladištenje postoji čitav niz, od kojih se kao dva kvalitetna mogu izdvojiti ona u Sloveniji i Srbiji. Svi navedeni objekti predstavljaju koncept, po okoliš i zdravlje ljudi sigurnog

načina zbrinjavanja RAO-a i u suštini predstavljaju jednostavna inženjerska rješenja.

Jedan od argumenata koji dokazuje ekspertizu hrvatskih stručnjaka, svakako je činjenica da lokacija "Vrbina", koju je odabrala Slovenija, u Hrvatskoj ne bi bila uzeta u obzir niti u preliminarnom pregledu terena, s obzirom da se nalazi i u vodonosniku i u poplavnom području.

## Zaključak

Hrvatska mora, u relativno kratkom roku, osigurati mogućnost skladištenja postojećeg institucionalnog NiSRAO-a kao i onog koji će nastajati u budućnosti. Osim toga, rok za prihvata pogonskog NiSRAO-a iz NEK-a se također bliži. Postojeća potencijalna lokacija za skladište, odnosno odlagalište RAO-a u Hrvatskoj je još uvijek upitna, s obzirom na otpor lokalnog stanovništva i susjedne Bosne i Hercegovine za odabir lokacije "Čerkezovac" na Trgovskoj gori. Status quo pregovora s lokalnom zajednicom na jednoj preostaloj hrvatskoj lokaciji je, u najmanju ruku, nezadovoljavajući. Alternativno rješenje odlaganja u budućem slovenskom odlagalištu sa sobom nosi više problema nego koristi. Osim što se cjelokupni RAO, za koji Hrvatska snosi odgovornost, ne može izvesti u Sloveniju, slovensko rješenje je locirano u zagrebačkom vodonosniku. Mogućnost restarta programa još se uvijek ne razmatra kao ozbiljno rješenje, a i restart nije garancija iznalaženja rješenja.

Znači, još uvijek je otvoreno pitanje što će biti s hrvatskim radioaktivnim otpadom.

## Literatura

1. A. Schaller, Izbor mjesta odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj, APO novosti, Agencija za posebni otpad, Zagreb, 1997.
2. URL: <http://radioaktivniotpad.org/info-kutak-o-radioaktivnom-otpadu-u-tehnickom-muzeju-nikola-tesla/> (28. svibnja 2016.)
3. European Council Directive 2011/70/Euratom. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=celex:32011L0070> (28. svibnja 2016.)