

NUKLEARNE BATERIJE KAO EKOLOŠKI PRIHVATLJIVI IZVORI ENERGIJE

Vesna Petrović¹ Anita Petrović-Gegić²

Rezime: Nuklearne baterije su uređaji koji generišu električnu energiju korištavanjem energije čestica i zračenja nastalih radioaktivnim raspadom. Interesovanje za ove baterije prvenstveno je posledica dugog veka trajanja (period poluraspada nekih radionuklida dostiže i milijardu godina) i mogućnosti primene u ekstremnim uslovima gde su procesi punjenje ili zamena baterija neizvodljivi, npr. svemirskim stanicama, opremi postavljenoj na Arktiku i Antarktiku i dr. Pod pojmom nuklearna baterija podrazumeva se niz uređaja koji direktno konvertuju energiju zračenja u električnu energiju. Interesovanje za ove uređaje je raslo i opadalo tokom godina da bi nuklearne baterije trenutno doživljavale preporod kao „trajni izvori male energije“ za različite primene. Posebno je značajno napomenuti istraživanja koja za cilj imaju primenu radioaktivnog otpada u izradi nuklearnih baterija.

Ključne reči: Nuklearna baterija, alfanaponska, betanaponska, radioizotopni termoelektrični generator

NUCLEAR BATTERIES AS ENVIRONMENTALLY ACCEPTABLE ENERGY SOURCES

Abstract: Nuclear batteries are devices that generate electricity by using the energy of particles and radiation produced by radioactive decay. The interest in these batteries is primarily due to their long service life (the half-life of some radionuclides reaches a billion years) and the possibility of application in extreme conditions where the process of charging or replacing batteries is impractical, e.g. space stations, equipment placed in the Arctic and Antarctic, etc. The term nuclear battery refers to a series of devices that directly convert radiation energy into electricity. Interest in these devices has waxed and waned over the years, with nuclear batteries currently experiencing a resurgence as "permanent low energy sources" for a variety of applications. It is particularly important to mention the research aimed at the application of radioactive waste in the production of nuclear batteries.

Key words: Nuclear battery, alphavoltaic, betavoltaic, radioisotope thermoelectric generator

1. UVOD

Nuklearne baterije su uređaji koji koristi energiju radioaktivnog raspada elemenata za proizvodnju električne energije. Nuklearne baterije se nazivaju još i atomske baterije i generatori iz radioizotopa. Od občnih baterija se prvenstveno razlikuju po ceni, životnom veku, primeni i funkciji. Tradicionalne baterije koriste elektrohemijske reakcije u procesu napajanja, dok nuklearne baterije koriste raspad radioaktivnih elemenata, tj. alfa, beta i gama zrake kako bi obezbedili konstantan izvor energije [1].

Nuklearne baterije su počele svoj razvoj 1913. godine, kada je Henri Mozli prvi proizveo struju generisanu zračenjem naelektrisanih čestica. Tokom 1950-ih i 1960-ih godina 20-tog veka, ovo polje istraživanja je privuklo veliku pažnju kako bi se odgovorilo zahtevu za pravljenjem dugovečnih baterija kao izvorima struje u svemirskim letelicama. Osim upotreba ovih baterija u svemirskom programu Američka kompanija RCA je 1954. godine radila na razvoju malih atomskih baterija namenjenih za male radio prijemnike i slušne aparate [2]. Od inicijalnog istraživanja i razvoja RCA-a realizovani su mnogi tipovi i metode za izvlačenje električne energije iz nuklearnih izvora. Naučni principi su dobro poznati ali je savremena tehnologija nano-veličina i novi poluprovodnici omogućila pravljenje novih uređaja.

Interesovanje za nuklearne baterije se povećalo nakon saopštenja Kineske kompanije „Betavolt“, 2024. godine koja je predstavila novu bateriju za koju tvrde da može da proizvodi električnu energiju 50 godina bez potrebe za punjenjem ili održavanjem. Saopštili su da je ova nuklearna baterija prva na

¹Doktor nauka, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom Sadu, Školska 1, email: petrovic.v@vtsns.edu.rs

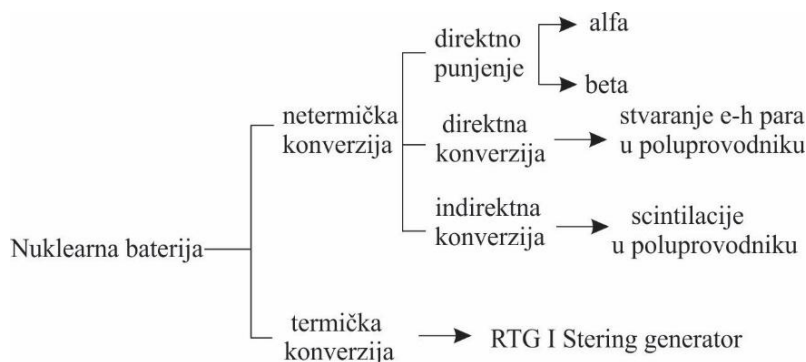
²Doktor nauka, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom Sadu, Školska 1, email: petrovic.a@vtsns.edu.rs

svetu koja je uspela da minimalizuje veličinu baterije na dimenzije manje od novčića upotrebom izotopa nikla-63 [3]. Kompanija je saopštila da je baterija sledeće generacij e već ušla u fazu pilot testiranja i da će se na kraju masovno proizvoditi za komercijalne aplikacijeu telefonima i dronovima.

2. PRINCIPI RADA NUKLEARNIH BATERIJA

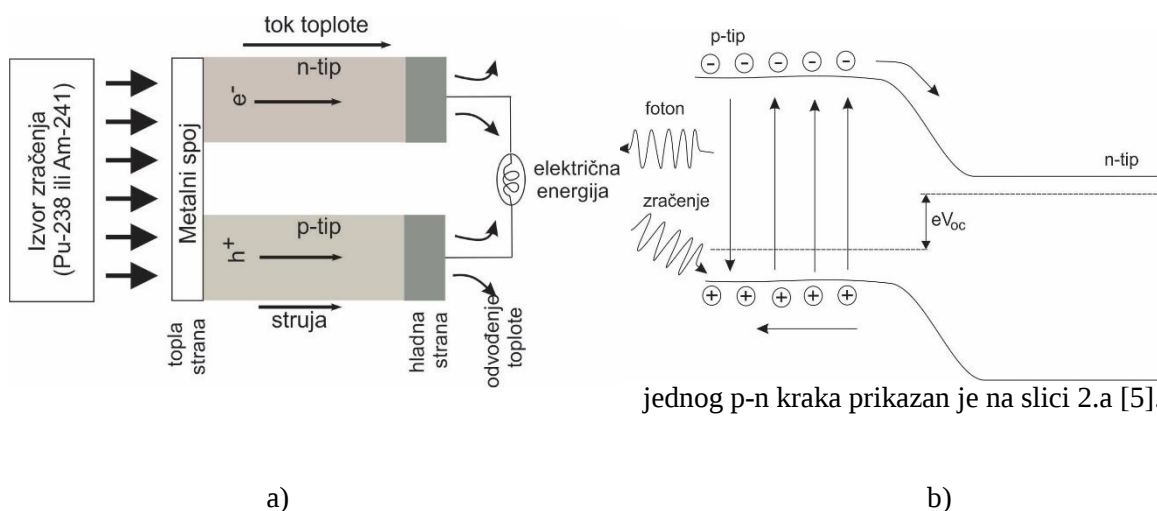
Procesi pri kojima se se vrši konverzija dele se na termičke i netermičke, slika 1. Sve nuklearne baterije u sebi sadrže uređaje za konverziju energije kao što su: termoelektrični, termo-fotoelektrični, scintilacioni materijali ili oni dizajnirani za direktnu konverziju energije zračenja [4], [5].

Baterije za termičku konverziju koriste čestice emitovane radioaktivnim raspadom za proizvodnju toplote, koja se zatim transformiše u električnu energiju. Kod ovih baterij pod dejstvom zračenja dostižu se izuzetno visoke unutrašnje temperature u materijalu, i deo te toplote se pretvara u električnu energiju. Treba istaći jedan tip baterija za termičku konverziju — radioizotopski termoelektrični generator (RTG) — koji koristi termoelemente za stvaranje energije iz razlike temperatura između „hladne“ strane uređaja i izvora napajanja radioizotopa, ili „vruće strane“.



Slika 1 - Vrste nuklearnih baterija [4]

RTG-ovi sadrže radioaktivni izvor (α emiter, obično ^{241}Am) i veliki broj p-n spojeva koji su serijski povezani i postavljeni su termički paralelno tako da se svaka noga suočava sa ujednačenim temperaturnim gradijentom. Dizajn tipičnog termoelektričnog generatora (TEG) koji se sastoji od



Slika 2 Princip rada: a) RTG i b) netermičkih indirektnih pretvarača

Baterije koje rade na principu netermičke konverzije, energiju zračenja pretvaraju u električnu na dva načina: direktno i indirektno. Netermički indirektni pretvarači energiju zračenja pretvaraju u električnu u dva koraka. U prvom koraku, alfa- ili beta-čestice koje potiču iz radioaktivnog materijala padaju na scintilator koji usled toga proizvodi fotone, a pomoću fotonaponskog uređaja, fotoni se pretvaraju u električnu energiju. Pri tome je izuzetno važno uskladiti odziv scintilatora i fotonaponskog uređaja da bi se postigla visoka efikasnost konverzije. Životni vek ovih baterija zavisi od vremena poluraspada radioizotopa i od stabilnosti foto luminiscentnog materijala koji je izložen visokim energetske zračenjem. Upravo ovo drugo ograničava životni vek uređaja mnogo češće od prvog, posebno zato što je za postizanje scintilacija moraju koristiti čestica velike energije [4].

Netermički direktni pretvarači energiju radioaktivnih čestice koje padaju na poluprovodnički uređaj direktno pretvaraju u električnu struju. Tipične metode podrazumevaju betavoltaični efekat. Princip rada betanaponskog pretvarača je veoma sličan onom kod fotonaponskih ćelija, slika 2.b, a sastoji se od poluprovodničkog p-n spoja i beta izvora. Beta čestica koja pada na poluprovodnik stvara parove elektrona i šupljina i razdvaja ih u ugrađenom električnom polju, te shodno tome nastaje struja. Neki od parova elektron-šupljina se rekombinuju i to faktički dovodi do gubitaka radijacije. Kod većine uređaja taj procenat je oko 50% [4].

2.1. Pogodni radioizotopi za nuklearne baterije

Izbor radionuklida je veoma značajan prilikom projektovanja i razvoja nuklearnih baterija. Prvenstveno se biraju alfa ili beta emiteri, pri čemu alfa emiteri dominiraju u termičkim a beta emiteri u netermičkim baterijama. Gama emiteri se generalno izbegavaju kao izvori u nuklearnoj bateriji jer bi ovakvi izvori zahtevali glomaznu zaštitu. Neki tipični radionuklidi koji se koriste kao izvori zračenja dati su u tabeli 1 [4].

Tabela 1 Neki tipični radionuklidi koji se koriste za nuklearne baterije [4]

Radionuklid	Tip emitera	Prosečna energija emitovanih čestica (keV)	Period poluraspada (god)	Specifična aktivnost (Ci/g)	Specifična snaga (W/g)
Ni-63	β	17	100	57	0,0067
H-3	β	5,7	12	9700	0,33
Sr-90/Y-90	β	200/940	29/2	140	0,98
C-14	β	156,5	5730	4,5	0,004
Pm-147	β	61,9	2,62	800	0,29
Po-210	β	5300	0,38	4500	140
Pu-238	α	5500	88	17	0,56
Am-241	α, γ	5500	432	2,91	0,097

Analizirajući podatke iz tabele 1 uočava se da su period poluraspada i specifična snaga radioaktivnog izvora u obrnutoj korelaciji. Zbog toga je neophodna optimizacija specifične snage i radnog veka pri izboru odgovarajućeg radioizotopa. Tako se npr. istakao Sr-90/Y-90 sa dobrom kombinacijom specifične aktivnosti i specifične snage. Međutim energija čestica koje emituju premašuje energiju pomeranja atoma Si (400 keV) koji se obično koristi kao poluprovodnički materijal. Ovo uzrokuje značajno smanjenja radnog veka baterije. Osim toga, energetski jaki beta zraci iz ovog izvora zahtevali bi ozbiljnu zaštitu (što bi povećalo težinu baterije) ukoliko bi se komercijalno koristili. Međutim, za mnoge primene na Zemlji, kao što je napajanje udaljenih svetionika u Rusiji, težina baterije nije značajno ograničenje. Javili su se i incidenata krađe izvora i izlaganje ljudi zračenju usled probijanja izolacije, ali sve to nije dovelo do njihovog povlačenja iz upotrebe [4] - [6].

2.1.1. Ekološka prihvatljivost nuklearnih baterija

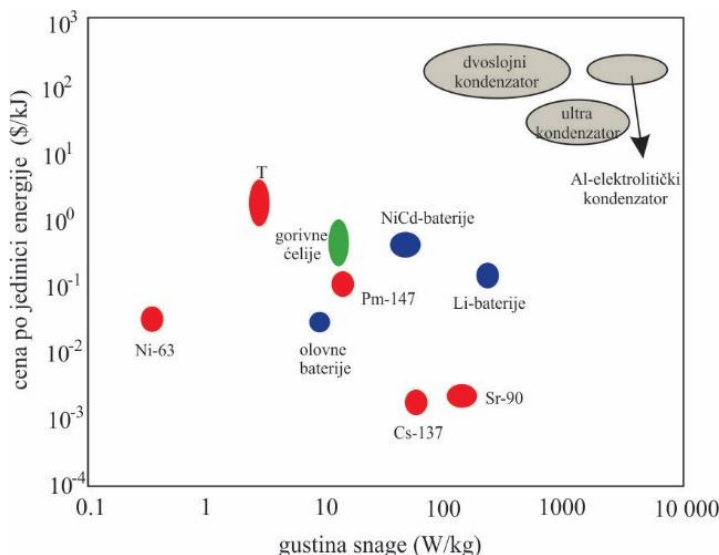
Izgleda pomalo neobično povezivanje bilo čega nuklearnog pa i nuklearnih baterija sa zaštitom životne sredine. U slučaju nuklearnih baterija prvenstveno se misli na upotrebi nuklearnog otpada za

izradu baterija čime se direktno smanjuje količina otpada koju treba skladištiti. Analizom karakteristika velikog broja radionuklida upadljivo se ističu baterije koje bi kao izvor zračenja koristile Cs-137 i Sr-90 u smislu gustine snage i troškova. Istovremeno ove baterije su na vrhu proizvodnje među nuklearnim baterijama. Posebno je značajno istaći da se Sr-90 i Cs-137 u velikoj količini nalaze ili ekstrahuje iz otpada nuklearne fisije, kao i da je Sr-90 prirodan element koji se u količini od 300mg/kg nalazi u Zemljinoj kori. Osim njih izdvaja se i tricijum³, a problem njegove šire upotrebe je uglavnom ekonomske prirode. Kod njega je veoma širok spektar troškova u zavisnosti od načina proizvodnje i to se ogleda u ceni baterije [7], [8].

Na cenu baterija utiču mnogi faktori kao što su: snaga i energija nuklearne baterije, vrsta (alfa, beta, gama) i energija (ili kapacitet prodiranja) zračenja kao i izbor poluprovodničkog ili scintilacionog materijala Profesor Kumar⁴ veruje da će netermički pretvarači koji koriste Sr-90 i Cs-137 uskoro biti vodeći na tržištu. Isto tako smatraju da će ova vrsta baterija moći da predstavlja konkurenciju hemijskim baterijama kada se obezbede propisi o rukovanju ovim materijalima, i kada se reše problemi vezani za postrojenja za preradu (podešavanja za pre namenu materijala) [7].

2.1.2. Analiza troškova

Profesor Kumar [7] istražio je troškove za nuklearne baterije i uporedi ih sa drugim uređajima koji služe za skladištenje energije. Troškovi koji su važni su troškovi proizvodnje materijala po kilogramu (\$/kg) i troškovi izrade postrojenja za njihovo dobijanje. Pored toga, troškovi koji su važni za tržište baterija posmatraju cenu po jedinici snage (\$/kW) i cenu po jedinici energije (\$/kJ) za baterije. Tako je utvrđeno da se troškovi hemijskih baterija, gorivnih ćelija i kondenzatora izražavaju kao odnos cene i težine (\$/kg) upakovanog sistema na tržištu i korišćenje vrednosti gustine energije i snage koje već poznajemo. Ovde treba istaći da politika značajno utiče na cenu nuklearnih baterija, pošto nijedna vlada ne želi slobodno tržište za radioaktivni materijal. Ovo je posledica same karakteristike ovih materijal jer se mogu upotrebiti za nuklearnu fisiju i na taj način pretvoriti u nuklearno oružje. Profesor je, na osnovu literature [8] - [12], utvrdio da baterije napravljene od radioizotopa koštaju oko 10⁵\$/kg, bez obzira na materijal koji se koristi. Ovu konstantnost cene, bez obzira na svojstva materijala, propisuje se nuklearnom snabdevanju. Rezultat istraživanja je prikazan na slici 3 kao grafik zavisnosti cene po jedinici energije u funkciji gustine snage, pri čemu je uzeta u obzir i efikasnost baterija [7].



³ Izotop vodonika koji u jezgu ima proton i dva neutrona

⁴ Profesor Kumar - departman za električnu energiju univerziteta Stanford

Slika 3: Cene po jedinici energije u funkciji gustine snage za: kondenzatore (siva), hemijske baterije (plave), gorivne ćelije (zelene) i nuklearne baterije od raznih radioizotopa (crvene) [7]

Treba istaći da su na slici 3 upoređeni brojevi dobijeni za cenu po jedinici energije u funkciji gustine snage, pri čemu se ne tvrdi da je neki tip baterije bolji od druge. Osim toga izbor baterije je prvenstveno izbor potrošača a zavisi od njegovog zahteva.

Analiza troškova pokazuje da su netermički pretvarači konkurentni po ceni (\$/kJ), dok oni koji koriste Sr-90 i Cs-137 su daleko bolji u gustini snage i \$/kJ u poređenju sa hemijskim baterijama. Napredak u u solarnim ćelijama, upotreba nanomaterijala bi mogla poboljšati direktne i indirektne konverzijske baterije, a ugljenične nanocevi bi se mogle pokazati efikasnijim za beta ćelije nego za solarne ćelije

3. ZAKLJUČAK

Nuklearne baterije koriste energiju radioaktivnih čestica i zračenja za dobijanje električne energije. Interesovanje za razvoj ovih baterija proisteklo je iz potrebe za konstruisanjem pouzdanih izvora čiji životni vek je veoma dug (čak i nekoliko desetina godina) koje bi se prvenstveno koristile u svemirskom programu ali i u nepristupačnim mestima (izolovani svetionici, istraživačka i merna oprema na arktiku i antarktiku,...). I one uglavno zadovoljavaju ovakvu primenu. Međutim, potreba za energijom, ali i razvoj novih poluprovodnika i nano tehnologija, uticala je da se istraživanja koja su usmerena na proširenje sfera u kojima bi se koristile nuklearne baterije, kao što su mobilni telefoni, lap top-ovi, i dr. Važno je istaći da se pri razvoju baterija razmatraju mogućnosti korišćenja radionuklida iz nuklearnog otpada, posebno Cs-137 i Sr-90. Ukoliko bi došlo do razvoja nuklearnih baterija za široku upotrebu primenom radionuklida iz nuklearnog otpada, direktno bi se uticalo na smanjuje količina radioaktivnog otpada.

4. LITERATURA

- [1] <https://citylabs.net/technology-overview/nuclear-battery-technology/>, Februar 2025.
- [2] ****"Atomic Battery Converts Radioactivity Directly into Electricity". Popular Mechanics, April 1954, p. 87.
- [3] <https://www.independent.co.uk/tech/nuclear-battery-betavolt-atomic-china-b2476979.html>, Februar 2025.
- [4] Singh A., Tyagi M., Banerjee D., Sugilal G., Kaushik C.P.: Nuclear Batteries: Harnessing Energy of Radioactive Materials for Long Lasting Low Power Applications, Bhabha Atomic Research Centre, pp. 233-241. <https://www.barc.gov.in/publications/9788195473328.html>
- [5] Prelas M.A., Weaver C.L., Watermann M.L., Lukosi E.D., Schott R.J., Wisniewski D.A., *Progress in Nuclear Energy*, 2014, Vol. 75, pp. 117-148.
- [6] Schmidt G.R., Sutliff T.J., Dudzinski L.A., *Radioisotope Power: A Key Technology for Deep Space Exploration*, in *Radioisotopes*, Applications in Physical Science, ed. by N. Singh, InTech Open Book Series, 2011, pp. 419-456
- [7] Kumar S., Atomic Batteries: *Energy from Radioactivity*, Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, 17 Nov, 2015, DOI: 10.4172/2325-9809.1000144
- [8] R van Ginderdeuren, E van Limbergen, and W Spileers, *18 Years' experience with high dose rate strontium-90 brachytherapy of small to medium sized posterior uveal melanoma*, 2005, Br J Ophthalmol, 89(10), pp. 1306–1310.
- [9] Wittenberg L.J., *The cost of tritium production in a nuclear reactor*, UWFDM-871, Nov 1991.

- [10] R D. Rogers et al, *Encapsulation method for maintaining biodecontamination activity*, 2006, US Patent 7026146B2.
- [11] Sims D.J., *Diffusion coefficients for uranium, cesium and strontium in unsaturated prairie soil*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2008, Vol. 277, No.1, pp. 143–147.
- [12] Hoisington, J.E., *Radioisotopes for heat-source applications*, 1982, DPST-82-842.