

DOI: [10.46793/CIGRE37.D1.06](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.D1.06)**D1.06****UPOREDNA ANALIZA LITIJUMSKIH I NATRIJUMSKIH BATERIJA ZA
SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE****COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM AND NATRIUM BATTERIES FOR
ELECTRICAL ENERGY STORAGE****Vuk Milivojević, Tomislav Rajić, Koviljka Stanković***

Kratak sadržaj: Element koji se uveliko smatra neophodnim u brzom napretku energetske tranzicije jeste baterija. Baterije pretvaraju hemijsku energiju u električnu, pri čemu postoje razni modeli. Za razliku od primarnih, koje su dostupne za jednokratnu upotrebu, sekundarne baterije omogućavaju višestruka punjenja i pražnjenja. Jedna od glavnih prednosti litijum-jonskih baterija je što mogu da skladište velike količine električne energije u odnosu na svoju veličinu i težinu, zbog čega su veoma korisne. Ekonomičnije su i ekološki prihvatljivije od primarnih baterija, koje se moraju odlagati nakon upotrebe. Međutim, ograničenja u pogledu dostupnosti litijuma i visoki troškovi njegovog vađenja doveli su do potrage za alternativnim materijalima. Natrijum-jonske baterije su se pojavile kao obećavajuća alternativa zbog obilja natrijuma i njegovih niskih troškova. Ovaj rad nudi odgovor na aktuelna pitanja kakve su performanse dve pomenute vrste baterija.

Ključne reči: skladištenje električne energije, baterije, litijum, natrijum

Abstract: An element that is widely considered necessary in the rapid progress of the energy transition is battery. Batteries convert chemical energy into electricity, and there are various models. Unlike primary batteries, which are available for single use, secondary batteries allow for multiple charges and discharges. One of the main advantages of lithium-ion batteries is that they can store large amounts of electricity relative to their size and weight, making them very useful. They are more economical and environmentally friendly than primary batteries, which must be disposed of after use. However, limitations in the availability of lithium and the high cost of its extraction have led to a search for alternative materials. Sodium-ion batteries have emerged as a promising alternative due to the abundance of sodium and its low cost. This paper offers an answer to current questions about the performance of the two mentioned types of batteries.

Key words: electricity storage, batteries, lithium, natrium

* Vuk Milivojević, SWECO D.O.O., mv243071m@student.etf.bg.ac.rs

Tomislav Rajić, Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet, rajic@etf.rs

Koviljka Stanković, Univerzitet u beogradu - Elektrotehnički fakultet, kstankovic@etf.rs

1 UVOD

Energija je ključna briga za naučnike, privrednike i donosiocce odluka. Ove brige će nastaviti da rastu s obzirom na ograničenost fosilnih goriva u budućnosti. Pored toga, zbog nadolazeće tranzicije sa ekonomije zasnovane na fosilnim gorivima na ekonomiju zasnovanu na obnovljivim izvorima energije, postoji sve veća potreba za rešenjima za skladištenje energije. Postoje različite tehnologije skladištenja. One se mogu grupisati po polju (hemijsko, biološko, elektrohemijsko, električno, mehaničko i termalno) i po svrsi (skladištenje za mrežu i transport). Zahtevane osobine su ključne za razvoj, adaptaciju i implementaciju uspešne tehnologije skladištenja.

Element koji se uveliko smatra neophodnim u brzom napretku tranzicije su baterije. Baterije pretvaraju hemijsku energiju u električnu, pri čemu postoje razni modeli. Za razliku od primarnih, koje su dostupne za jednokratnu upotrebu, sekundarne baterije omogućavaju višestruka punjenja i pražnjenja. Baterije se sastoje od elektroda i elektrolita od različitih materijala. Punjive elektrohemijske baterije, kao jedna od najsvestranijih tehnologija skladištenja energije, igraju centralnu ulogu u tekućoj tranziciji sa fosilnih goriva na obnovljivu energiju kako bi se postigao jasan cilj – zelena planeta. One su ključni alati za smanjenje ugljen-dioksida u sektorima transporta i elektroenergetskih mreža i neophodne su u širokom spektru strateških industrija. Stalno rastuća potražnja za „boljim baterijama“ dovela je do značajnog povećanja istraživanja i razvoja u poslednjih 10-20 godina, sa primarnim fokusom na tehnologiju litijum-jonskih baterija.

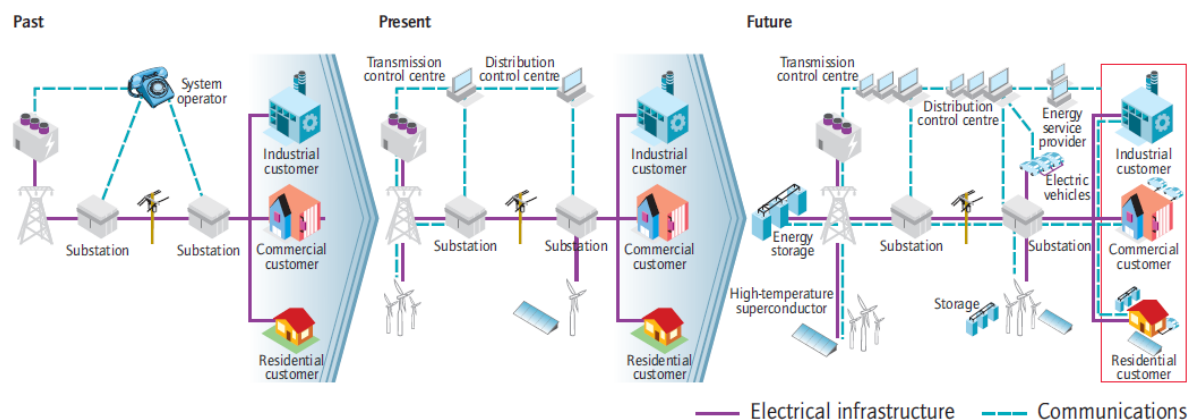
Jedna od glavnih prednosti litijum-jonskih baterija je što mogu da skladište mnogo električne energije u odnosu na svoju veličinu i težinu, zbog čega su veoma korisne. Ekonomičnije su i ekološki prihvatljivije od primarnih baterija, koje se moraju odlagati nakon upotrebe. Međutim, ograničenja u pogledu dostupnosti litijuma i visoki troškovi njegovog vađenja doveli su do potrage za alternativnim materijalima. Natrijum-jonske baterije su se pojavile kao obećavajuća alternativa zbog obilja natrijuma i njegovih niskih troškova [1].

U daljem razmatranju, u cilju upoznavanja sa ovom veoma širokom i perspektivnom oblasti proučavanja, biće predstavljeni pre svih načini skladištenja energije, kako bismo se upoznali sa značajem baterija. Nastavak se bazira na sagledavanju situacije na polju ove tehnologije sa aspekta tržišta, nakon čega dolazi i ono najbitnije – proučavanje načina funkcionisanja baterija, materijala od kojih su se sastojale u prošlosti, koji ih trenutno čine, i koji će tek biti njihov sastavni deo, sve sa ciljem unapređenja ove tehnologije.

2 SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Trenutno se globalni energetske sistemi suočavaju sa nizom izazova, uključujući porast udela obnovljivih izvora energije i tržišta električnih vozila (EV), stalni rast potražnje za smanjenjem emisije ugljenika, starenje infrastrukture i bezbednost energije. Pametne mreže pružaju načine ne samo da reše ove izazove, već i da transformišu energetske industriju u novu eru pouzdanijih, dostupnijih i efikasnijih sistema koji će doprineti kako zaštititi životne sredine tako i ekonomskom napretku. Slika 1 prikazuje putokaz za transformaciju globalnih elektroenergetskih sistema sa trenutnog modela funkcionisanja električne mreže ka pametnijoj mreži u budućnosti. Ukratko, pametna mreža je elektroenergetska mreža koja omogućava dvosmerni tok električne energije i podataka, pri čemu napredne tehnologije i digitalna komunikacija omogućavaju detekciju, reakciju i „proaktivno delovanje“ (tj. proaktivno reagovanje na osnovu predviđanja) na promene u upotrebi i različite probleme. Prednosti pametne mreže uključuju povećanu efikasnost i pouzdanost u prenosu i snabdevanju električnom energijom, smanjenje operativnih i upravljačkih troškova za elektroenergetske

kompanije i korisničke terminale, veću integraciju obnovljivih izvora energije u savremenu mrežu, podršku za široku primenu električnih vozila, poboljšanu energetska sigurnost i niže emisije ugljenika [2].



Slika 1 Putokaz za prelazak trenutnih energetska sistema ka pametnijoj mreži [3]

Sistemi za skladištenje energije zasnovani na baterijama visoko su cenjeni kao sredstvo za ispunjavanje različitih funkcija u mreži, pružajući niz dodatnih usluga, uključujući:

1. Regulaciju frekvencije i praćenje opterećenja
2. Hladno startovanje
3. Dejstvovanje kao rezerve za hitne slučajeve
4. Omogućavanje održavanja energetska balansa između vršne i vanvršne potrošnje energije
5. Pružanje lokalizovane snage za rešavanje problema sa kvalitetom i podršku reaktivnoj snazi.

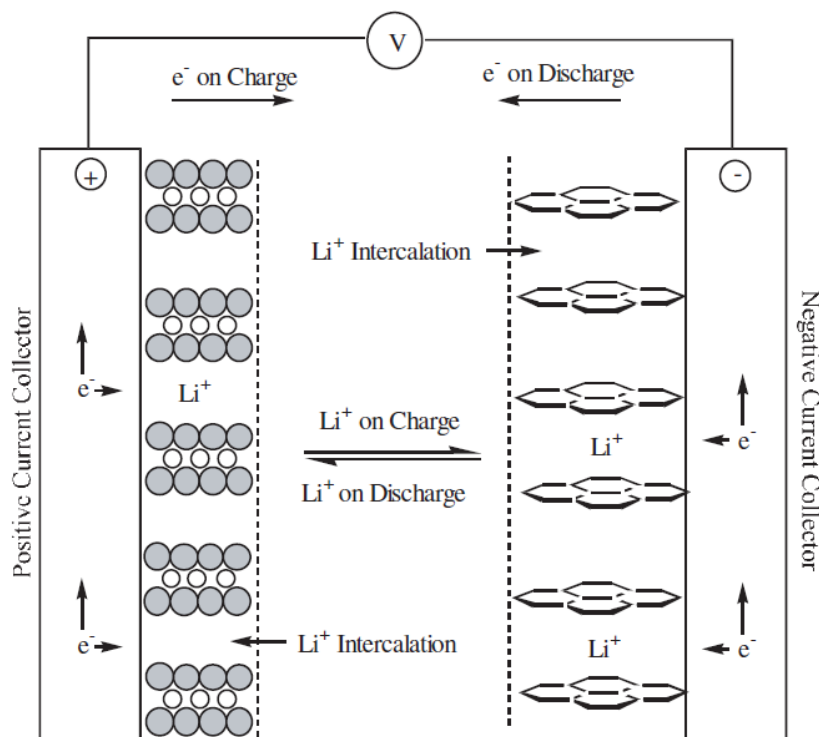
3 TEHNOLOGIJE BATERIJA: LITIJUM-JONSKE I NATRIJUM-JONSKE BATERIJE

U osnovi, litijum-jonske i natrijum-jonske baterije su sekundarne elektrohemiske baterije sa različitim hemijskim sastavima anode i katode. Obe rade na principu reverzibilnih elektrohemiskih redoks reakcija za generisanje i skladištenje električne energije.

Redoks reakcija je tip hemijske reakcije u kojoj se dešava istovremeno smanjenje i oksidacija molekula, atoma ili jona. Redoks reakcije uključuju prenos elektrona sa jedne supstance na drugu. Naziv "redoks" potiče od "redukcija" i "oksidacija". Oksidacija je proces u kome supstanca gubi elektrone. Suprotno tome, redukcija je proces u kome supstanca dobija elektrone. U redoks reakciji, jedna supstanca se oksiduje (gubi elektrone), dok se druga redukuje (dobija elektrone). U slučaju reverzibilne elektrohemiske redoks reakcije, reakcija može ići u oba smera, odnosno, oksidacija i redukcija mogu biti obrnute. U kontekstu baterija, to znači da elektrohemijski procesi koji se dešavaju tokom pražnjenja (oslobađanje energije) mogu biti obrnuti tokom punjenja (skladištenje energije):

- Kada se baterija puni, elektroni se prenose sa katode na anodu preko spoljašnjeg kruga, dok se joni migriraju kroz elektrolit u suprotnom smeru.
- Kada se baterija prazni, elektroni se prenose sa anode na katodu, dok joni migriraju nazad preko elektrolita.

Ovaj proces je reverzibilan, što znači da se baterija može više puta puniti i prazniti bez značajnog gubitka efikasnosti, pod uslovom da su materijali stabilni i da podnose cikluse oksidacije i redukcije. Ovo je ključna osobina koja omogućava ponovno korišćenje i dug vek trajanja baterija kao što su litijum-jonske i natrijum-jonske. Slika 2 prikazuje pojednostavljeni princip rada baterija.



Slika 2 Osnovni princip rada litijum-jonske ćelije [4]

Kod litijum-jonskih baterija, aktivni katodni materijal (CAM) litijuma se tokom punjenja disocira i rezultira litijum-jonom koji migrira kroz elektrolit i separator i ubacuje se u anodu. CAM je komponenta katode koja direktno doprinosi kapacitetu baterije. Radi se o materijalu unutar katode koji aktivno učestvuje u elektrohemijskoj reakciji tokom procesa punjenja i pražnjenja. Odgovoran je za skladištenje i oslobađanje litijumovih ili natrijumovih jona tokom ciklusa baterije. Tokom punjenja, CAM oslobađa jone (npr. Li^+), koji se kreću kroz elektrolit i ulaze u anodu. Prilikom pražnjenja, joni se vraćaju u CAM, što oslobađa energiju u obliku električne struje. Efikasnost i performanse baterije u velikoj meri zavise od izbora CAM materijala, koji moraju ispunjavati sledeće zahteve:

- Veliki kapacitet za skladištenje jona - da bi se osigurala visoka gustina energije.
- Dobra reverzibilnost - sposobnost ponovnog prijema i oslobađanja jona bez značajnih strukturnih promena, što omogućava dug vek trajanja baterije.
- Visoka kulonovska efikasnost - efikasnost sa kojom se joni naizmenično interkaliraju i deinterkaliraju tokom ciklusa punjenja i pražnjenja. Interkalacija u ovom slučaju predstavlja proces u kojem se joni ubacuju ili ulaze u strukturu anode ili katode u bateriji. Ovo se dešava tokom punjenja baterije. Isto tako, deinterkalacija predstavlja proces u kojem se joni oslobađaju iz strukture anode ili katode i vraćaju u elektrolit. Ovo se dešava tokom pražnjenja baterije. U cilju pojednostavljenja, za kulonovsku efikasnost možemo reći da predstavlja odnos između količine energije koja je dostupna za upotrebu tokom pražnjenja baterije i količine energije koja je potrebna da se baterija napuni. Izražava se u procentima.

$$\text{Kulonovska efikasnost} = \frac{\text{Kapacitet pražnjenja}}{\text{Kapacitet punjenja}} \times 100\%$$

Niska cena i dostupnost - materijali treba da budu dostupni i ekonomični za komercijalnu proizvodnju.

Za anodu litijumskih baterija testirani su i korišćeni različiti materijali, koji su razvijeni zbog svojstava sličnih onima koja su važna za aktivni materijal katode (CAM). Prve litijumske baterijske ćelije razvijene 1970-ih godina fokusirale su se na upotrebu metalnog litijuma zbog njegovog visokog specifičnog kapaciteta za interkalaciju. Međutim, zbog problema sa bezbednošću povezanih sa promenom strukture metalnog litijuma tokom ciklusa punjenja i pražnjenja, alternative na bazi ugljenika postale su popularnije [4]. Danas većina litijumskih baterijskih ćelija uključuje grafit kao anodu zbog njegove superiorne cikličnosti, odnosno sposobnosti da izdrži višestruke cikluse punjenja i pražnjenja bez značajnog gubitka kapaciteta ili degradacije performansi. U slučaju natrijum-jonskih baterija, grafit ne može biti korišćen jer natrijum ne može interkalirati u grafit. Umesto njega, čvrsti ugljenik se češće koristi u natrijum-jonskim ćelijama.

Natrijum-jonske ćelije imaju istoriju koja seže u 1960-e godine, kada su razvijane paralelno sa litijum-jonskim tehnologijama kao potencijalni kandidat za praktične sekundarne baterije. Rano interesovanje za elektrolit $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ dovelo je do razvoja natrijum-sulfur (NaS) ćelije koju je razvila kompanija Ford tokom 1960-ih godina radi upotrebe u električnim vozilima. Međutim, kratak vek trajanja i visoke radne temperature usporile su razvoj ove hemije [5]. Krajem 1960-ih, otkrivene su litijumske i natrijumske slojevite oksidne hemije, što je omogućilo razvoj nove klase materijala za katode.

U Tabeli 1 prikazana je uporedna analiza katoda za litijum-jonske i natrijum-jonskih baterija, dok je u Tabeli 2 prikazana je uporedna analiza anoda za iste vrste baterija.

Tabela 1 Uporedni pregled hemijskih karakteristika katoda

Karakteristika	Li-jonske baterije	Na-jonske baterije
Materijali katoda	LCO, NMC, LFP	Natrijumovi slojeviti oksidi (npr. $\text{Na}_{0.77}\text{CoO}_2$), PBA
Teorijski kapacitet	LCO: $\sim 140 \text{ mAh/g}$ NMC: $\sim 200 \text{ mAh/g}$ LFP: $\sim 170 \text{ mAh/g}$	$\text{Na}_{0.77}\text{CoO}_2$: $\sim 150 \text{ mAh/g}$ PBA: $\sim 170 \text{ mAh/g}$
Energetska gustina	Visoka, zavisi od tipa katode i ćelije	Niža u poređenju sa Li-jonskim, ali bolja za PBA
Stopa punjenja i pražnjenja	Visoka brzina, dobra sposobnost brzog punjenja i pražnjenja	Bolja brzinska sposobnost kod PBA
Stabilnost ciklusa	Visoka, naročito kod LFP	PBA i slojeviti oksidi pokazuju dobru stabilnost, ali sa nekim ograničenjima
Troškovi	Viši, posebno kod LCO i NMC	Niži, PBA su jeftiniji i koriste jeftinije materijale
Bezbednost	Dobra, ali zavisno od hemije i dizajna	Visoka, posebno kod slojevitih oksida i PBA

Tabela 2 Uporedni pregled hemijskih karakteristika anoda

Karakteristika	Li-jonske baterije	Na-jonske baterije
Glavni anodni materijali	Grafit, LTO, Silicijum	Čvrsti ugljenik, Meki ugljenik, Metalni sulfidi i oksidi
Teorijski specifični kapacitet	Grafit: ~372 mAh/g Silicijum: ~3579 mAh/g LTO: ~175 mAh/g	Čvrsti ugljenik: ~300 mAh/g Meki ugljenik: ~350 mAh/g Metalni sulfidi: > 400 mAh/g
Povećanje zapremine tokom cikliranja	Grafit: Malo Silicijum: Visoko (~300%)	Čvrsti ugljenik: Srednje Meki ugljenik: Srednje do visoko
Redoks potencijal	Grafit: ~0.1 – 0.2 V prema Li/Li ⁺	Čvrsti ugljenik: ~0.1 – 0.2 V prema Na/Na ⁺
Stabilnost ciklusa	Visoka za grafit i LTO Niska za silicijum	Visoka za tvrdi ugljenik Varira za druge materijale
Troškovi materijala	Viši, posebno za silicijum i LTO	Niži, uglavnom zbog upotrebe obilnih materijala poput Na
Potencijal za komercijalizaciju	Već komercijalizovani, dominiraju na tržištu	U razvoju, ali postoji značajan interes i potencijal
Gustina energije	Visoka (do 250 – 300 Wh/kg)	Srednja (do 150 – 200 Wh/kg)
Bezbednost	Visoka za LTO, Može biti problematično za silicijum (zapreminska ekspanzija)	Bezbedniji sa vodenim elektrolitima, manji rizik od paljenja ili eksplozije

4 PREDNOSTI NOVE GENERACIJE BATERIJA

U ovom poglavlju biće prikazane prednosti novih baterija u odnosu na tradicionalna koje se i dalje više koriste.

4.1 Litijum-jonske baterije i trenutno tržište

Cena litijum-jonskih baterija skoro u potpunosti zavisi od ograničene dostupnosti litijuma, koji se u prirodi nalazi samo u jedinjenjima zbog svoje visoke reaktivnosti. Litijum čini oko 0,0017% masenog udela Zemljine kore. Prema podacima Američkog geološkog instituta (USGS), globalne rezerve litijuma u periodu od 2017. do 2020. godine procenjene su na 14 miliona, 16 miliona, 14 miliona i 17 miliona tona, respektivno. Bez recikliranja, svetske rezerve litijuma mogu podržati ekonomski održivu proizvodnju samo u narednih 28 godina. Štaviše, tadašnji nedostatak litijuma pretio je da ugrozi snabdevanje tržišta električnih vozila, jer su najdostupniji resursi geografski koncentrisani. Kao zemlja sa najvećim rezervama litijuma u 2024. godini, Čile ima oko 9,3 miliona tona rezervi litijuma. Druga do pete zemlje sa najvećim rezervama litijuma u 2024. godini su Australija (6,2 miliona tona), Argentina (3,6 miliona tona), Kina (3 milion tona) i Sjedinjene Američke Države (1,1 miliona tona)[6].

Postepeno širenje tržišta električnih vozila vršilo je pritisak na zalihe litijuma, što je dovelo do kontinuiranog porasta njegove cene širom sveta. Trend porasta nastavio je sve do pred kraj 2022. godine, kada cena litijuma dostiže vrhunac. Međutim, nakon toga započinje period pada cene koji je aktuelan i danas. Cene litijum-karbonata su u avgustu pale na oko 10 500 USD po

toni, što je najniži nivo u više od tri godine, usled sve većih zabrinutosti zbog prekomerne ponude.

4.2 Ekološki efekti eksploatacije litijuma

Litijum i litijum-jonske baterije su često predstavljani kao ekološki spasitelji, omogućavajući nam da smanjimo oslanjanje na fosilna goriva s visokom emisijom ugljenika i pređemo na električna vozila i druge ekološki prihvatljivije tehnologije. Međutim, materijali potrebni za proizvodnju ovih baterija, poput litijuma, kobalta i nikla, nose značajne ekološke i etičke izazove. Proces koji se koristi za ekstrakciju ovih metala mogu biti izuzetno štetni za životnu sredinu i lokalne zajednice, što dovodi do degradacije tla, nestašice vode i gubitka biodiverziteta.

Postoje dve glavne metode komercijalne ekstrakcije litijuma:

- Ekstrakcija iz slanih jezera: Većina svetske proizvodnje litijuma zasniva se na solanama, metodu koji koristi prirodne naslage litijumom bogate slane vode u podzemnim rezervoarima. Ovi rezervoari se uglavnom nalaze u Litijumskom troughu - regionu koji obuhvata granice Bolivije, Argentine i Čilea. Područje je poznato po svojim ogromnim rezervama litijuma, za koje se procenjuje da sadrže oko 56% poznatih svetskih rezervi.
- Površinski kopovi (rudarstvo otvorenog kopa): Ovaj oblik komercijalne proizvodnje litijuma uključuje rudarenje tvrdih stena. Radi se o mnogo složenijem i intenzivnijem procesu u poređenju sa ekstrakcijom slane vode iz solana [7].

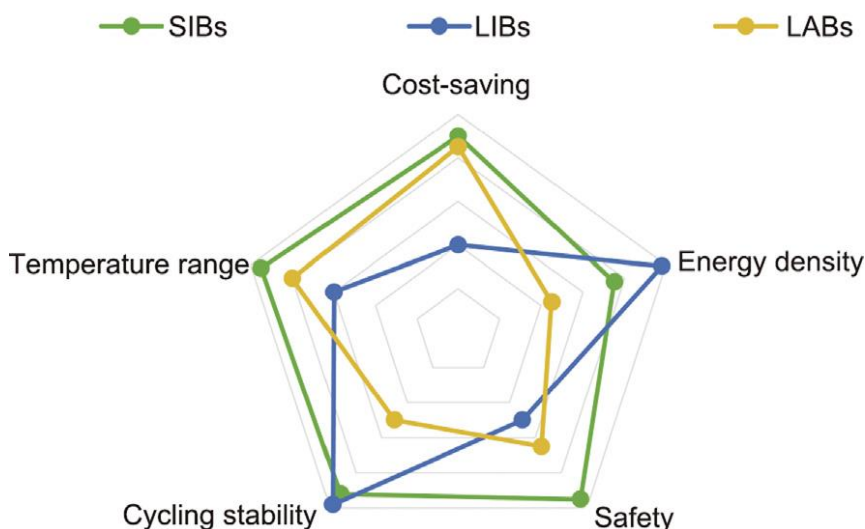
Rudarenje litijuma, posebno metodama otvorenih rudnika, dovodi do velike degradacije zemljišta. Velike površine zemlje se očiste kako bi se omogućile rudarske operacije, što uništava staništa i uzrokuje značajan gubitak biodiverziteta. Jedan od najkritičnijih ekoloških problema povezanih s eksploatacijom litijuma je i korišćenje vode. Proizvodnja jedne tone litijuma zahteva približno 2,2 miliona litara vode, što odvrća retke vodne resurse od lokalne poljoprivrede i autohtonih zajednica. Proces ekstrakcije takođe dovodi do degradacije tla, čineći ga nepodesnim za vegetaciju i narušavajući lokalne ekosisteme. Treći, ali ne manje značajan ekološki izazov su polja za ispiranje litijuma, koja se koriste za ekstrakciju litijuma iz rude pomoću hemijskih rastvora. Hemikalije koje se koriste u ovim procesima mogu da prodru u tlo i podzemne vode oko polja za ekstrakciju, uzrokujući dugoročnu štetu životnoj sredini.

4.3 Prednosti natrijum-jonskih baterija

Kao isplativija zamena za litijum-jonske baterije, natrijum-jonske baterije pokazuju nekoliko prednosti u poređenju sa trenutnim baterijskim tehnologijama. Na Slici 3 je prikazano poređenje tri utvrđene tehnologije punjivih baterija koje su trenutno na tržištu: natrijum-jonskih baterija (SIBs), litijum-jonskih baterija (LIBs) i olovno-kiselinskih baterija (LABs).

Za razliku od litijuma, natrijuma ima u izobilju i široko je dostupan, što ga čini održivijim izborom. Natrijum-jonske baterije se mogu proizvoditi sličnim procesima i opremom kao litijum-jonske baterije, što olakšava prelazak za proizvođače. Pored toga, ekstrakcija natrijuma zahteva znatno manje vode u poređenju sa litijumom, što značajno smanjuje njegov ekološki otisak. Na primer, potrebno je 682 puta više vode za ekstrakciju jedne tone litijuma nego za ekstrakciju jedne tone natrijuma [7, 8]. Naravno, ni ekstrakcija natrijuma nije u

potpunosti bez uticaja na životnu sredinu. Kao i svaki proces ekstrakcije i obrade minerala, posledice uvek postoje. Ali činjenica je da su one nemerljive u poređenju sa litijumom.



Slika 3 Poređenje tri utvrđene tehnologije punjivih baterija na trenutnom tržištu [2]

Natrijum čini 2,27 % Zemljine kore, što ga čini sedmim najzastupljenijim elementom na Zemlji i petim najzastupljenijim metalom. Pored toga, procenjuje se da je koncentracija natrijuma u okeanima $1,08 \cdot 10^4$ mg/l, što ukazuje na gotovo neograničenu globalnu distribuciju. Natrijum se može ekstrahovati iz morske vode, što znači da su svetske rezerve natrijuma praktično beskonačne. Takođe, otkriveno je mnogo prirodnih minerala koji sadrže natrijum, a njihova kristalna struktura je detaljno zabeležena. Rezerve natrijumovih jedinjenja su ogromne i relativno jeftinije u poređenju sa jedinjenjima koja sadrže litijum. Na primer, cena trone, minerala koji se koristi kao izvor natrijum karbonata, iznosila je oko 135-165 dolara po toni, dok je cena litijum-karbonata bila oko 5000 dolara po toni 2010. Godine [2]. Shodno tome, očekuje se da cena natrijum-jonskih baterija bude niska ako materijali za elektrode i elektrolite ne uključuju retke zemljane elemente. Pored toga, kao strujni kolektor za obe elektrode (katode i anode) u natrijum-jonskim baterijama može se koristiti aluminijumska folija. U litijum-jonskim baterijama, kolektor za anodnu stranu mora biti napravljen od bakarne folije, koja je skuplja i mnogo teža. Razlog za to je što aluminijum reaguje sa litijumom pri niskom potencijalu, što dovodi do stvaranja legure i degradacije kolektora, ali ne reaguje sa natrijumom [8].

Pošto natrijum-jonske baterije koriste iste protokole proizvodnje i metodologije kao i litijum-jonske baterije zbog sličnog principa rada, one samim tim predstavljaju obećavajuću zamenu u odnosu na litijum-jonske baterije ne samo u pogledu komercijalne upotrebe, već i u pogledu samih procesa proizvodnje. Kao rezultat toga, nije potreban dodatni kapitalni trošak za tehnološku tranziciju sa jednog na drugi tip. Međutim, analiza troškova baterija mora uzeti u obzir sveobuhvatne aspekte, jer troškovi baterija nisu jednostavna stvar koja se odnosi samo na troškove materijala. Dodatne karakteristike kao što su dizajn elektrode, struktura ćelije, amortizacija ćelije i troškovi proizvodnje i obrade takođe su važni faktori [8].

Gustina energije natrijum-jonskih baterija može biti 1–5 puta veća od gustine energije olovno-kiselinskih baterija, u zavisnosti od hemije materijala i korišćene tehnologije. Međutim, često se pretpostavljalo da natrijum-jonske baterije neće dostići isti nivo gustine energije kao litijum-jonske baterije. Ova pretpostavka se zasnivala na dva glavna faktora:

- Atomska Masa: Natrijum ima težu atomsku masu u poređenju sa litijumom.
- Elektroдни Potencijal: Standardni elektroдни potencijal za Na^+/Na redoks par je veći od potencijala Li^+/Li para.

5 ZAKLJUČAK

Litijum-jonske i natrijum-jonske baterije predstavljaju dve perspektivne tehnologije za skladištenje energije, sa različitim prednostima i izazovima koji utiču na njihovu primenu u električnim vozilima i sistemima za skladištenje energije.

Litijum-jonske baterije su trenutno dominantne na tržištu zbog svoje visoke gustine energije i dugog životnog veka. Njihova upotreba je dobro utemeljena u električnim vozilima i prenosnim uređajima, zahvaljujući visokoj efikasnosti i kompatibilnosti sa postojećim infrastrukturama. Međutim, njihova proizvodnja ima značajan negativan uticaj na životnu sredinu. Pored toga, rezerve litijuma su ograničene, što predstavlja izazov za dugoročnu održivost i stabilnost cena. Sa druge strane, natrijum-jonske baterije nude obećavajuću alternativu sa više održivim i ekonomski isplativijim pristupom. Natrijum je mnogo zastupljeniji u Zemljinoj kori i okeanima, što smanjuje troškove sirovina i čini ove baterije potencijalno jeftinijim. Takođe, proces ekstrakcije natrijuma je manje zahtevan za vodom i ima manji uticaj na životnu sredinu u poređenju sa ekstrakcijom litijuma. Međutim, natrijum-jonske baterije generalno imaju nižu gustinu energije u poređenju sa litijum-jonskim baterijama, što može ograničiti njihovu upotrebu u električnim vozilima koja zahtevaju dug doseg. Ipak, nedavni razvoj novih materijala za katode pokazuje potencijal za poboljšanje energetske gustine ovih baterija.

Litijum-jonske baterije su već u širokoj upotrebi, dok su natrijum-jonske baterije još uvek u fazi razvoja i ispitivanja. Pored njihovog ekonomskog potencijala, natrijum-jonske baterije imaju potencijal da smanje zavisnost od skupih i retkih materijala, čime mogu obezbediti održivije i dostupnije rešenje za skladištenje energije. Njihov uticaj na tržište će u velikoj meri zavisiti od daljeg tehnološkog napretka, uključujući poboljšanja u dizajnu elektroda i efikasnosti proizvodnje. S tim u vezi, iako natrijum-jonske baterije možda neće brzo zameniti litijum-jonske u sektoru električnih vozila zbog njihove trenutno niže energetske gustine, one mogu naći primenu u stanicama za skladištenje energije, gde je težina manje bitna. Za ovu primenu, natrijum-jonske baterije nude rešenje koje smanjuje ekološki otisak i troškove skladištenja energije na velikoj skali.

U zaključku, i litijum-jonske i natrijum-jonske baterije imaju svoje specifične prednosti i mane. Dok su prve optimizovane za visoku gustinu energije i trenutnu upotrebu, druge predstavljaju obećavajuću alternativu koja može pružiti ekološki prihvatljivije i održivije rešenje za buduće potrebe skladištenja energije. Dalji napredak u tehnologiji baterija i razvoj novih materijala će biti ključni za njihovu ulogu u budućim energetskim sistemima.

6 LITERATURA

- [1] Ashwini V. Kamble, Amol V. Walvekar. *A Review Paper on Comparison of Lithium and Sodium Ion Batteries for Electric Vehicle*. International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM), Volume 07, Issue 06, p. 1, 2023, DOI: 10.13140/RG.2.2.11009.67688

- [2] Lina Zhao, Teng Zhang, Wei Li, Tao Li, Long Zhang, Xiaoguang Zhang, Zhiyi Wang. *Engineering of Sodium-Ion Batteries: Opportunities and Challenges*. Engineering, pp. 173-174, 2022.
- [3] *Technology Roadmap - Smart Grids*, International Energy Agency
- [4] Sudano, A. *Linden's Handbook of Batteries*, 5th Edition, 2019, ed. McGraw-Hill Education
- [5] Delmas, C. *Sodium and Sodium-Ion Batteries: 50 Years of Research*. Advanced Energy Materials, Volume 8, Issue 17, 2018, DOI: 10.1002/aenm.201703137
- [6] *Mineral Commodity Summaries 2024*, US Geological Survey
- [7] Greenly Institute. *The Harmful Effects of our Lithium Batteries*. 2024.
- [8] Vuk Milivojević, Materijali za formiranje baterija za skladištenje električne energije, diplomski rad, Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet, 2024.