

# Skladišta električne energije

---

**Fabijanić, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:215389>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-08**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**JOSIP FABIJANIĆ**

**SKLADIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE**

**DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**SKLADIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE  
ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS**

**DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Brodske elektroenergetske mreže

Mentor: izv. prof. dr. sc. Aleksandar Cuculić

Student: Josip Fabijanić

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112069746

Rijeka, rujan 2023.

Student: Josip Fabijanić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG:0112069746

## **IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA**

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom **Skladišta električne energije** izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr.sc Aleksandra Cuculića.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Ime i prezime studenta: Josip Fabijanić

Student: Josip Fabijanić

Studijski program:Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG:0112069746

**IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA**

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor



## SAŽETAK

Skladišta električne energije su vrlo važna tehnologija za rješavanje problema proizvodnje i distribucije el. energije u današnjem svijetu, te je njihova primjena sve veća. Postoji mnogo različitih vrsta skladišta energije, što uključuje baterije, super kondenzatore, reverzibilne hidroelektrane, zamašnjaci, itd. Ovaj će se rad većinom fokusirati na baterijska skladišta električne energije. Unutar su istog opisane vrste baterijskih skladišta energije, njihov princip rada, prednosti i mane. Detaljno su opisani kriteriji vrednovanja skladišta energija kao što su učinkovitost, kapacitet, životni vijek, pouzdanost, sigurnost, troškovi, ekološki utjecaj, itd. Zatim je objašnjena primjena na brodovima, te način spajanja i upravljanje skladištima energije. Na kraju rada dan je zaključak o istraživanju te o mogućim budućim smjerovima ovih tehnologija.

**Ključne riječi:** skladišta energije, baterije, brod, tehnologija, primjena

## SUMMARY

Electric energy storage is a highly important technology for solving the problem of electricity production and distribution. of energy in todays world, and their application is increasing. There are many different types of energy storage, including batteries, super capacitors, reversible hydroelectric power plants, flywheels, etc. This paper will mostly be focused on battery energy storage. It describes the types of battery energy storage, their working principle, and advantages and disadvantages. The evaluation criteria of energy storage are described in detail, such as efficiency, capacity, lifetime, reliability, safety, costs, environmental impact, etc. Then the application on ships, and the way of connecting and managing energy storage are explained. At the end of the paper, a conclusion is given on the research and on the possible future directions of these technologies.

**Keywords:** energy storage, battery, ship, technology, application

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 1  |
| 1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKT ISTRAŽIVANJA .....                      | 2  |
| 1.2. RADNA HIPOTEZA.....   | 3  |
| 1.3. SVRHA I CILJ ISTRAŽIVANJA.....                                    | 3  |
| 1.4. ZNANSTVENE METODE .....   | 4  |
| 1.5. STRUKTURA RADA.....   | 4  |
| 2. VRSTE BATERIJSKIH SKLADIŠTA ENERGIJE.....                           | 6  |
| 2.1. OLOVNO-KISELINSKE BATERIJE .....                                  | 8  |
| 2.1.1. <i>PRINCIP RADA OLOVNO-KISELINSKIH BATERIJA</i> .....           | 9  |
| 2.1.2. <i>VRSTE I KARAKTERISTIKE OLOVNO-KISELINSKIH BATERIJA</i> ..... | 10 |
| 2.2. LITIJ-IONSKE BATERIJE.....  | 13 |
| 2.2.1. <i>PRINCIP RADA</i> .....                                       | 15 |
| 2.2.2. <i>PREDNOSTI I NEDOSTACI LITIJ-IONSKIH BATERIJA</i> .....       | 16 |
| 2.3. BATERIJE NA BAZI NIKLA.....                                       | 19 |
| 2.3.1. <i>PRINCIP RADA</i> .....                                       | 19 |
| 2.3.2. <i>KARAKTERISTIKE I VRSTE BATERIJA NA BAZI NIKLA</i> .....      | 20 |
| 2.4. NATRIJ-SULFIDNE BATERIJE.....                                     | 24 |
| 2.4.1. <i>PRINCIP RADA NATRIJ-SULFIDNIH BATERIJA</i> .....             | 25 |
| 2.4.2. <i>KARAKTERISTIKE NATRIJ-SULFIDNIH BATERIJA</i> .....           | 25 |
| 3. PROTOČNE BATERIJE .....   | 26 |
| 3.1. PRINCIP RADA .....  | 26 |
| 3.2. PUNJENJE I PRAŽNENJE VANADIJ REDOKS BATERIJA .....                | 27 |
| 3.3. VRSTE I KARAKTERISTIKE PROTOČNIH BATERIJA.....                    | 28 |
| 3.4. PRIMJENA PROTOČNIH BATERIJA .....                                 | 30 |
| 4. KRITERIJI UGRADNJE SKLADIŠTA ENERGIJE .....                         | 32 |
| 4.1. TEHNIČKI KRITERIJI UGRADNJE.....                                  | 33 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.1.1. | <i>SPECIFIČNA GUSTOĆA ENERGIJE I SNAGE</i>               | 33 |
| 4.1.2. | <i>VIJEK TRAJANJA SKLADIŠTA ENERGIJE</i>                 | 35 |
| 4.1.3. | <i>RASPON NAPONA</i>                                     | 35 |
| 4.1.4. | <i>RADNA TEMPERATURA I KAPACITET SKLADIŠTA ENERGIJE</i>  | 36 |
| 4.2.   | <b>KRITERIJI UČINKOVITOSTI SKLADIŠTA ENERGIJE</b>        | 37 |
| 5.     | <b>PRIMJENA SKLADIŠTA ENERGIJE NA BRODOVIMA</b>          | 39 |
| 5.1.   | <b>PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODOVIMA</b>      | 39 |
| 5.1.1. | <i>UGRADNJA BRODSKIH SKLADIŠTA ENERGIJE</i>              | 40 |
| 5.1.2. | <i>PUNJENJE BRODSKIH SKLADIŠTA ENERGIJE</i>              | 42 |
| 5.1.3. | <i>VAŽNOST BRODSKIH SKLADIŠTA ENERGIJE</i>               | 42 |
| 5.2.   | <b>BRODOVI NA HIBRIDNI POGON I ALTERNATIVNA RJEŠENJA</b> | 45 |
| 5.3.   | <b>EKOLOŠKI STANDARDI – ODRŽIVA POTROŠNJA</b>            | 48 |
| 6.     | <b>SPAJANJE SKLADIŠTA ENERGIJE NA BRODSKU MREŽU</b>      | 50 |
| 6.1.   | <b>PRETVARAČI ENERGIJE</b>                               | 51 |
| 6.2.   | <b>BMS SUSTAVI</b>                                       | 52 |
| 7.     | <b>ZAKLJUČAK</b>   | 53 |
| 8.     | <b>BIBLIOGRAFIJA</b>                                     | 56 |
| 9.     | <b>POPIS SLIKA I TABLICA</b>                             | 60 |
| 9.1.   | <b>POPIS SLIKA</b>                                       | 60 |
| 9.2.   | <b>POPIS TABLICA</b>                                     | 60 |



# 1. UVOD

Sustavi za skladištenje električne energije ispostavljaju se sve važnijima posljednjih nekoliko godina i to zbog rastuće potražnje za obnovljivom energijom i potrebama za fleksibilnijim i pouzdanijim elektroenergetskim mrežama. Kada se govori o sustavima za skladištenje električne energije radi se o uređajima koji pohranjuju električnu energiju za kasniju upotrebu, a to mogu biti elektrokemijska skladišta kao baterije, fizička skladišta kao zamašnjaci, reverzibilne hidroelektrane, te elektromagnetska skladišta kao što su super kondenzatori.

U ovom radu će se primarno obrađivati baterijska skladišta energije, vrste baterijskih skladišta, princip njihova rada, karakteristike, mane i razne praktične aplikacije gdje se ista mogu koristiti. U proteklom desetljeću baterije su dostigle značajan napredak u tehnologiji što je rezultiralo povećanjem učinkovitosti, kapacitetom i pouzdanošću. Osnovni princip rada skladišta energije uključuje pretvaranje električne energije u kemijsku energiju koja se zatim može pohraniti i pretvoriti onda kada je potrebno natrag u električnu energiju. U suvremenom svijetu najvažnija je indikacija odnosno uloga skladišta za pohranu energije usko vezana za energetske održivosti odnosno ravnoteži između proizvodnje i potrošnje energije. Stabilni energetske sustavi najčešće su uvjet tj. izuzetno poželjna karakteristika bilo kakvih energetskih sustava i pogona, a osobito onih velikih, industrijskih. Stabilnost i ujednačenost energetske opskrbe u tolikoj je mjeri a u ekološko-industrijskom smislu naglašena da se danas ne govori samo o održivosti kada je u pitanju proizvodnja i potrošnja energije, već se sustavno stvaraju standardi koji propisuju energetske održivost i učinkovitost, osobito na područjima visokorazvijenih zemalja kao što je većina europskih zemalja te zemlje sjeverne Amerike, ali i Azije. Svaka zemlja tj. svaka regija ima vlastite regulacije i vlastita standardna rješenja za skladištenja energije, ali ono što im je zajedničko jest upravo stvaranje standarda te inzistiranje na održivosti.

Skladišta energija imaju različite funkcije i uvjete koje moraju ispuniti prije puštanja u pogon, kao što su smanjenje vršnog opterećenja,

prebacivanje opterećenja, poboljšanje kvalitete električne energije, rezervno napajanje itd. Ovi sustavi imaju širok raspon primjene od komercijalne upotrebe u industrijskom sektoru, također se koriste u kopnenim transportnim sustavima, kao što su električna vozila te u pomorstvu i raznim priobalnim primjenama<sup>1</sup>.

Kada je riječ o specifično baterijskim sustavima za skladištenje energije, treba napomenuti da ipak i unatoč mnogim prednostima skladišta energija, još uvijek postoje razni tehnički i ekonomski izazovi koji ovi sustavi mogu donijeti. Tehnički izazovi uključuju problem sigurnosti, degradacije baterija te njihovo odlaganje. Potrebe za pouzdanim, učinkovitim i sigurnim sustavima za upravljanje baterijskim skladištima energije. Ekonomski izazovi obuhvaćaju visoke cijene uz mali investicijski povrat i potrebe za regulatornim okvirima koji potiču uvođenje sustava za skladištenje električne energije.

Sustavi za skladištenje energije postaju ključna komponenta u sadašnjim i budućim elektroenergetskim mrežama, pružajući veću fleksibilnost, pouzdanost i održivost. Međutim, još uvijek postoje razni izazovi koje treba prevladati kako bi se u potpunosti iskoristio puni potencijal ovih sustava.

## **1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKT ISTRAŽIVANJA**

Problem istraživanja je kako povećati učinkovitost i smanjiti troškove proizvodnje baterijskih skladišta, skladištenje energije i distribuciju energije. U ovom smislu jasno je da se specifični fokus rada bavi baterijskim skladištima kao takvim, ali on nipošto ne zanemaruje ni ostale oblike skladištenja energije. Predmet istraživanja se bazira na vrstama skladišta energija, njihovim principima rada, primjenama, prednostima i nedostacima. Objekt istraživanja također uključuje kriterije vrednovanja skladišta energije s tehničkog i ekonomskog, ali i ekološkog gledišta. Osim navedenog, rad se osvrće i na

---

<sup>1</sup> U priobalnim i kopnenim područjima skladišta energije javljaju se u raznim oblicima. Neki od primjera uključuju elektroenergetske mreže koje omogućuju pohranu viška energije tijekom perioda niske potrošnje ili visoke proizvodnje te njeno postepeno otpuštanje. Skladišta energije također osiguravaju neprekidan rad telekomunikacijskih mreža ondje gdje energetska opskrba nije stabilna, a primjerice solarni paneli koji se koriste kako u domaćinstvima tako i komercijalno te pohranjuju energiju u svrhu optimizacije potrošnje ovih relativno manjih potrošačkih jedinica. U nestabilnim geografskim područjima, skladišta energije uvjetuju nastavak onih pogona koji su neophodni prilikom većih elementarnih nepogoda, dok u industriji predstavljaju rezervoare energije kako u slučaju naglog prekida dotoka energije ovi pogoni ne bi morali prestati s radom. Duž hrvatskog priobalja također mjestimično susrećemo vjetroelektrane koje služe kao sekundarni izvori energije, ali i kao rezerva u razdobljima niske proizvodnje energije. *op. aut.*

primjenu skladišta energije na brodovima te njihovim performanse u odnosu na učinkovitost brodskih sustava, ali i suvremenog pomorstva.

## 1.2. RADNA HIPOTEZA

Skladišta električne energije ključna su za tehnološki razvoj i povećanje udjela obnovljivih izvora električne energije u mreži, a kada je riječ o suvremenim sustavima, ali i gospodarstvima koja na državnim razinama reguliraju principe korištenja električne energije, ali i energije kao takve. Uvođenjem standarda obnovljivih izvora energije i optimizacijom potrošnje energije na brojnim razinama doći će do smanjenja troškova i veće učinkovitosti u proizvodnji i distribuciji električne energije, čime će se osigurati održiviji i ekološki prihvatljiviji energetski sustav, ma o kakvoj potrošačkoj jedinici ili sustavu da je riječ<sup>2</sup>. Suvremena skladišta energije sve se više koriste za stabilizaciju mreže i smanjenje oscilacija napona, što će pridonijeti pouzdanosti i kvaliteti opskrbe energijom.

Stoga, kada se razmatraju i planiraju ulaganja u optimizaciju sustava energije što nužno uključuje i optimizaciju (tj. ulaganja u modernizaciju) skladišta energije te njihovu prilagodbu održivim odnosno ekološkim standardima.

## 1.3. SVRHA I CILJ ISTRAŽIVANJA

Svrha je ovog istraživanja omogućiti i pojasniti vrste baterijskih skladišta, njihov princip rada, primjenu, utjecaj na okoliš, ali i njihovu ekonomsku isplativost. Također, unutar svrhe ovoga rada važno je istaknuti i primjene skladištenja energije na brodovima i načine njihova spajanja odnosno uređenja<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Bio to stanoviti industrijski pogon ili pak uređenje energetskog sustava stanovite države ili specifične geografske regije. Optimizacija potrošnje energije i njezinog skladištenja u ovom se kontekstu smatra intrinzično prokurativnim tj. poželjnim rješenjem. *op. aut.*

<sup>3</sup> S obzirom na činjenicu da postoji mnogo vrsta brodova i to raslojenih po raznim principima, ali i na činjenicu da postoji mnogo vrsta skladištenja energije, u ovom će se radu dotaknuti samo one koji uistinu predstavljaju suvremene konstruktivne primjene, dok će se zbog primjernog izobilja neke morati previdjeti. Ovaj je postupak ipak funkcionalan u kontekstu istraživačke hipoteze i cilja samog istraživanja jer podcrtava samo one primjere koji služe kao stanovite vodilje kada je u pitanju skladištenje energije u brodskim sustavima. *op. aut.*

Cilj istraživanja je identificirati one vrste tehnologije koja omogućuju veću učinkovitost, isplativost, manji negativan utjecaj na okoliš te što bolji prijenos i distribuciju električne energije sa što manje gubitaka. Ukratko, cilj istraživanja radi se o cilju sustavnog prikaza načina na koji se u suvremenom, tehnološki naprednom svijetu koriste i optimiziraju skladišta energije s posebnim naglaskom na pomorsko gospodarstvo, njegove specifičnosti, njegov razvoj i njegove potrebe održivosti, iskoristivosti i uklapanju u globalnu tehnološko-ekološku matricu u smislu skladištenja energije.

#### **1.4. ZNANSTVENE METODE**

U ovom su radu korištene sljedeće znanstvene metode: metoda deskripcije, metoda analize i sinteze, metoda indukcije i dedukcije, metoda specijalizacije i generalizacije, metoda dokazivanja, matematička metoda, te komparativna metoda. Svaka od metoda korištena je u zasebnim dijelovima rada.

#### **1.5. STRUKTURA RADA**

Struktura ovog diplomskog rada sačinjena je u šest cjelina.

U prvoj cjelini kratko je objašnjena primjena skladišta električne energije, te njihovi izazovi. Zatim su definirani problem, predmet i objekt istraživanja, radna hipoteza, svrha i cilj istraživanja, znanstvene metode i struktura rada. Radi se o uvođenju u problematiku skladištenja energije koja je nužna kod znanstvene diskusije, ali koja i predstavlja neizostavan dio za razumijevanje problematike kao takve.

U drugoj cjelini je dan pregled različitih vrsta baterijskih skladišta energije. Opisane su njihovi principi rada, te prednosti i nedostaci kao i različite primjene.

Treća cjelina, analizira i objašnjava kriterije vrednovanja skladišta električne energije kao što su učinkovitost, kapacitet, životni vijek, pouzdanost, sigurnost, troškovi, ekološki utjecaj, itd.

Četvrta se cjelina bavi primjenom skladišta energije u pomorskoj industriji. Izložene su primjene različitih skladišta električne energije, njihove prednosti i nedostaci s posebnim naglaskom na brodskim sustavima te na pomorstvo, a u kontekstu globalne održive stvarnosti kada je riječ o iskorištavanju i osobito pohrani električne energije unutar suvremenih ekoloških i rastućih standarda koji u fokusu imaju energetska održivost.

U petoj cjelini opisane su tehnologije spajanja skladišta el. energije na brodsku mrežu, njihove prednosti i nedostaci, te različiti primjeri spajanja skladišta energija koji se primjenjuju na brodovima.

U posljednjoj cjelini, Zaključku rada, dana je sažeta verzija glavnih cjelina istraživanja, mogući budući ciljevi istraživanja, te zaključak o važnosti skladišta el. energija za buduće primjene u energetska industriji.

## 2. VRSTE BATERIJSKIH SKLADIŠTA ENERGIJE

Najpoznatija i istaknutija suvremena tehnologija za pohranu električne energije jesu baterijski sustavi. Baterijska se skladišta energije u pravilu dijele u tri opće kategorije i to: primarne, sekundarne i protočne baterije<sup>4</sup>. Osnovna razlika među ovim kategorijama je u sposobnosti ili nesposobnosti ponovnog punjenja. Primarne baterije su jednokratne i mogu se samo isprazniti tj. one ne uključuju mogućnost ponovnog punjenja. S druge strane, sekundarne se baterije mogu više puta puniti i prazniti, što ih čini prikladnijim sustavima za pohranu energije, a u suvremenom svijetu (Komarnicki, Lombardi i Styczynski, 2017). Potonje je moguće dodatno raslojiti u standardne baterije (olovne [Ni-Cd]), suvremene baterije (litij-ionske, litij-polimerske [Ni-MH]), specijalne (u pravilu Ag-Zn te Ni-H<sub>2</sub>), protočne (vanadijevo-redoksne baterije [Br<sub>2</sub>-Zn]) te visoko temperaturene (u pravilu Na-S, NaMCl<sub>2</sub>) (prema Krivik i Baca, 2013). Protočne su baterije u stanovitom smislu hibridne zato što iako u nekim podjelama spadaju pod sekundarnu vrstu baterija, istovremeno su toliko specifične da u određenim kontekstima stvaraju vlastitu podvrstu baterija za pohranu. Radi se o vrsti baterija koju nazivamo i „protokolonskim baterijama“ i to zbog činjenice da ovdje dolazi do pohrane energije putem unutarnjih kemijskih procesa. Kao takve, protočne baterije pohranjuju energiju u obliku tekućih elektrolita i koriste elektrokemijske procese tijekom protoka struje kroz elektrolit (prema Komarnicki, Lombardi i Styczynski, 2017; Bruder Müller, Sobotka, i Waughray, 2019).

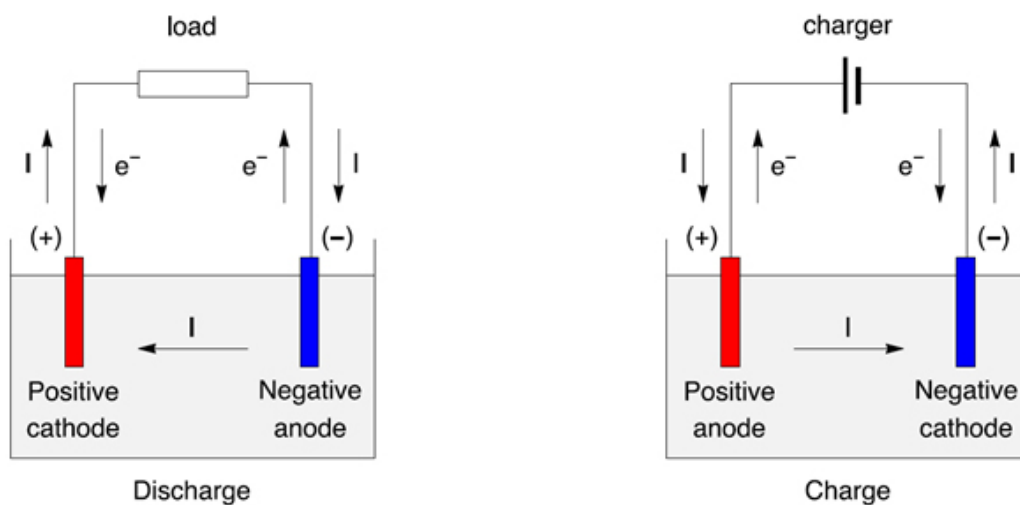
Osnovni dijelovi skoro svih baterija obuhvaćaju elektrode, anodu i katodu, elektrolit, separator i vanjski krug. Anoda je elektroda s negativnim nabojem, dok je katoda elektroda s pozitivnim nabojem. Elektrolit je tvar koja omogućuje kretanje iona između anode i katode, a obično je prisutan u obliku tekućine ili gela koji sadrži soli ili druge kemikalije, što ovisi o specifičnoj tehnologiji baterije koja se koristi. Separator je tanka membrana koja odvaja anodu i katodu, omogućujući istovremeno prolaz iona. Separator je u pravilu izrađen od

---

<sup>4</sup> Pa opet, i u ovom kontekstu postoje razlike jer nisu sve baterije jednake, čak ni one s istim kemijskim sastavom. S korisničkog, ali i ekonomskog gledišta glavna je kompromisna točka u razvoju baterija ona između snage i energije: baterije mogu biti velike snage ili visokoenergetske, ali ne i oboje istovremeno. Proizvođači klasificiraju baterije prema ovim dvjema kategorijama. Druge uobičajene klasifikacije su visoka izdržljivost, što znači da je kemijski sastav baterije modificirana kako bi se postigao duži vijek trajanja baterije, ali redovito na račun snage i energije. *Prema: Zdenković, 2015.*

poroznog materijala poput nekog tipa polimera. „Separatori električki razdvajaju pozitivnu elektrodu od negativne. Imaju četiri funkcije:

1. osiguravaju električnu izolaciju između pozitivnih i negativnih ploča te sprječavaju kratke spojeve,
2. djeluju kao mehanički razmakač koji drži ploče u propisnom položaju,
3. pomažu zadržati aktivne materijale u bliskom kontaktu s rešetkom,
4. omogućuju slobodnu difuziju elektrolita i migraciju iona” (Krivik i Baca, 2013: 81).



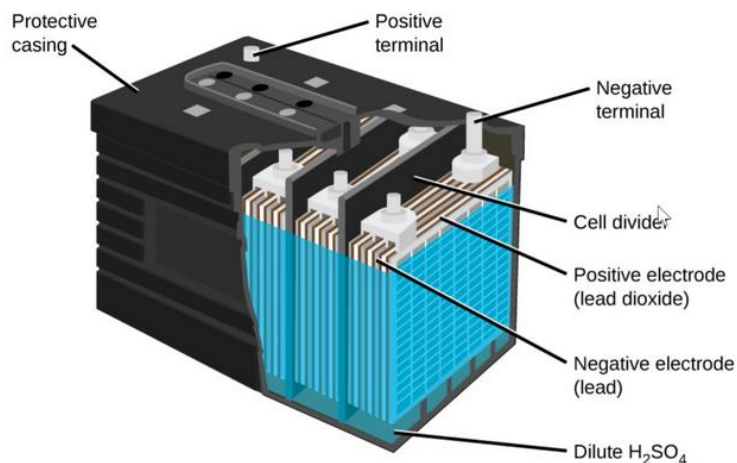
**Slika 1.** Kretanje iona pod opterećenjem (lijevo) i punjenje (desno)

Izvor: <https://www.biologic.net/topics/anode-cathode-positive-and-negative-battery-basics/>

Dok je baterija povezana s opterećenjem, tijekom njezine upotrebe odnosno pražnjenja anoda usmjerava pozitivne ione u elektrolit pri čemu dolazi do procesa oksidacije i elektroni se pune. Istovremeno, katoda prima elektrone putem vanjskog kruga, smanjujući svoj naboj, odnosno podliježe redukciji. Katoda paralelno također prima pozitivne ione iz elektrolita i ispušta negativne ione u elektrolit. Unutar vanjskog kruga generira se struja koja nosi energiju, dok se ostatak energije ispušta u obliku topline. Prilikom punjenja baterije, elektroni se kreću preko vanjskog kruga od anode prema katodi, dok se istodobno ioni kreću kroz elektrolit od anode prema katodi. Elektromotorna sila baterije omogućava tok elektrona kroz vanjski krug i ovisi o razlici potencijala između elektroda. Također, elektromotorna sila baterije označava količinu energije koju baterija može osloboditi kada je opterećena, a mjeri se u voltima (V). Napon na spojnim točkama jednak je razlici između elektromotorne sile i unutarnjeg otpora baterije. U ovom kontekstu, manja vrijednost unutarnjeg otpora ukazuje na veću učinkovitost baterije.

## 2.1. OLOVNO-KISELINSKE BATERIJE

Olovno-kiselinske baterije pojavile su se 1859. godine, što ih čini najstarijom vrstom sekundarnih baterija. Njihov se inicijalni dizajn sastajao od dvije olovne ploče uronjene u sumpornu kiselinu, a koje su proizvodile napon kada bi se kratko spojile sa žicom (prema Kurzweil, 2010). S vremenom se je dizajn poboljšavao, primjerice dodavanjem olovnog dioksida pozitivnoj elektrodi kako bi se povećao kapacitet baterije.



**Slika 2.** Olovno- kiselinska baterija i njezini dijelovi

Izvor: <https://boattest.com/article/what-you-need-know-about-lead-acid-batteries>

Olovno-kiselinske baterije brzo popularizirane zbog velike gustoće energije, niske cijene i mogućnosti punjenja. Obilato su korištene u kraju 19. i početkom 20. stoljeća, a osobito ih povezujemo s prvim automobilima kada postaju standard za izradu automobilskih baterija. Olovno-kiselinske baterije i danas imaju vrlo široku primjenu u sustavima besprekidnog napajana, skladištima obnovljive energije i industrijskim strojeve. Unatoč činjenici da ih povezujemo sa samim počecima skladištenja energije i to u okolnostima bitno modernističkih tehnologija i potreba<sup>5</sup>, olovno-kiselinske baterije i danas konkuriraju novijim baterijskim sustavima u kontekstu skladišta energije, olovno-kiselinske baterije i dalje konkuriraju te ostaju važan dio suvremenog društva.

---

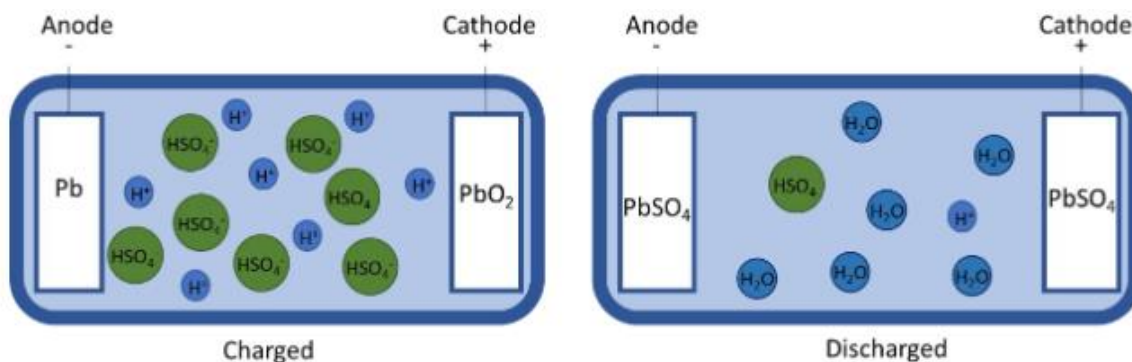
<sup>5</sup> Modernističke su tehnologije i potrebe karakteristične kraju 19. i početku 20. stoljeća, a karakteriziraju period u povijesti koji se u kulturalnoj teoriji naziva modernizmom. U suvremeno je doba tehnologija digitalna, a njezina je posebnost pojava umjetne inteligencije zbog čega se ovaj povijesni period nerijetko naziva postmodernističkim.  
*op. aut.*



### **2.1.1. PRINCIP RADA OLOVNO-KISELINSKIH BATERIJA**

Olovno-kiselinske baterije obično su sastavljene od niza međusobno spojenih stanica, pri čemu svaka stanica uključuje dvije elektrode. Pozitivna elektroda, ili anoda, izrađena je od tvari nazvane olovni dioksid ( $\text{PbO}_2$ ), dok je negativna elektroda, ili katoda, napravljena od olova ( $\text{Pb}$ ). Elektrolit je mješavina sumporne kiseline razrijeđene destiliranom vodom ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (Boparai i Singh, 2018). Spomenute komponente smještene su unutar kućišta izrađenog od plastike ili čvrste gume. *Slika 2.* prikazuje strukturu olovno-kiselinske baterije odnosno njezine sastavne dijelove.

Za vrijeme trajanja punjenja, električna se energija prenosi na bateriju što uzrokuje kemijsku reakciju unutar baterije pri čemu se kemijska energija pretvara u električnu energiju. Prilikom punjenja elektrode od olovnog dioksida i olova prolaze niz kemijskih reakcija, pri čemu se olovni dioksid pretvara u olovni sulfat, a sumporna se kiselina istovremeno u elektrolitu razgrađuje i pretvara u vodu i sulfatne ione. Tijekom ovog procesa, na negativnoj elektrodi olovo reagira sa sulfatnim ionima u elektrolitu proizvodeći vodik: koncentracija sumporne kiseline raste, što uzrokuje porast napona na kontaktima. Proces punjenja je gotov kada napon na stezaljkama dosegne određenu vrijednost koja najčešće iznosi oko 2-2.2V po stanici (Songli Group, 2022).



**Slika 3.** Princip rada i kemijska reakcija olovno-kiselinske baterije

Izvor: EMSA, 2020.

Tijekom procesa pražnjenja, električna se energija otpušta što pokreće inverznu kemijsku reakciju. U ovom procesu, olovni sulfat vraća u svoje početno stanje (olovo i olovni dioksid), dok sumporna kiselina prolazi regeneraciju i vraća se iz vodene faze u oblik sumporne kiseline. Slika 3. ilustrira opisani princip funkcioniranja olovno-kiselinske baterije.

### 2.1.2. VRSTE I KARAKTERISTIKE OLOVNO-KISELINSKIH BATERIJA

Postoje tri osnovne varijante olovno-kiselinskih baterija: klasične olovno-kiselinske baterije s tekućim elektrolitom, zatim (hermetički) zatvorene olovno-kiselinske baterije i olovno-kiselinske baterije regulirane ventilom (eng. *Valve-regulated Lead-acid Battery* – VRLA). Svaka od ovih baterija ima svoje prednosti i nedostatke, što ih čini upotrebljivim u različite svrhe odnosno prilagođenima za različite namjene, ovisno o potrebama sustava.

Konvencionalne olovno-kiselinske baterije su u kontekstu upotrebe najrasprostranjeniji tip baterija: često primjenjivan u vozilima, strojevima i uređajima za neprekidno napajanje. U unutrašnjosti ove baterije nalazi se tekući elektrolit koji se slobodno kreće između elektroda i zahtijeva tek povremeno održavanje. Ovaj elektrolit također zahtijeva dodavanje destilirane vode u stanovitim okolnostima, što se postiže otvaranjem čepa na kućištu baterije. Jedna od ključnih prednosti ovih baterija jest njihova ekonomska isplativost, a s obzirom da se u načelu radi o staroj tehnologiji koja je tijekom prošlosti široko standardizirana. Ipak, ove baterije imaju znatan težinski teret i ovisno o veličini i namjeni mogu zahtijevati redovito održavanje. Također, potrebna je pažnja prilikom rukovanja s njima zbog rizika od istjecanja

i curenja kiselinskih dijelova, što je nepogodno za zdravlje tj. može uzrokovati ozljede pri rukovanju.

Hermetički zatvorene tj. zabrtvljene olovno-kiselinske baterije imaju sličnu strukturu kao i konvencionalne baterije, ali se razlikuju utoliko što njihov elektrolit nije u tekućem stanju. Umjesto toga, elektrolit je u obliku gela ili je upijen unutar separatora poznatog kao AGM (eng. *Absorbent-glass-mat*), što eliminira potrebu za održavanjem razine elektrolita. Ove baterije skuplje su od klasičnih, ali imaju prednost što su otpornije na curenje. U pravilu se koriste u sustavima neprekidnog napajanja, obnovljivim izvorima energije i na mjestima gdje je teško pristupiti radi održavanja.

Olovno-kiselinske baterije regulirane ventilom ili VRLA baterije su vrsta zabrtvljenih baterija koje koriste ventil za regulaciju tlaka unutar kućišta baterije. Pritom regulacijski ventil omogućuje izjednačenje tlaka koji se stvara prilikom punjenja, što uklanja redovite potrebe za održavanjem, te sprječava moguća curenja. VRLA baterije se obično koriste ondje gdje je važna sigurnost, kao što su zrakoplovi ili medicinska oprema, te su prema tome i znatno skuplje od klasičnih baterija.

Tijekom rukovanja ovom vrstom baterija, važno je biti pažljiv i svjestan potencijalnih rizika kako bi se smanjila vjerojatnost nezgoda. Pravilno rukovanje tijekom punjenja važno je za trajanje baterije, a prekomjerno punjenje može uzrokovati pregrijavanje i smanjenje kapaciteta iste. S druge strane, nedovoljno punjenje, odnosno dopuštanje da se baterija isprazni ispod određene razine, može dovesti do pojave sulfata na elektrodama, što znatno skraćuje vijek trajanja baterije i može uzrokovati druge oblike oštećenja na bateriji, ali i kvarova sustava u kojima ne ona koristi. Sulfatizacija se također može dogoditi ako je razina elektrolita preniska. Kako bi se baterija održavala na konstantnoj razini napunjenosti, često se primjenjuje tehnika postupnog punjenja (tzv. *trickle charging*), koja omogućava da se baterija puni brzinom jednakom brzini njezinog prirodnog pražnjenja. Na taj način osigurava se da baterija uvijek ostane potpuno napunjena.

„Za razliku od otvorenih olovnih baterija, u VRLA se pri kraju punjenja odvija tzv. rekombinacija plinova unutar kućišta baterije, jer oni jednostavno nemaju kamo izaći. U procesu rekombinacije oslobađa se toplina. U klasičnoj otvorenoj olovnoj bateriji s tekućim elektrolitom tek se manji dio plina rekombinira, dok ostatak izlazi u okolinu

čime se izbjegava zagrijavanje baterije. pusti vodik uz izvode polova, pri ugradnji treba predvidjeti ventiliranje okolnog prostora. Srećom, obično je dovoljna i najnužnija prirodna ventilacija. [...] Nastavi li se dovođenje struje u potpuno napunjenu bateriju, pojavit će se obilno plinjenje, pri kojemu svaka iskra unutar baterije može izazvati eksploziju. Eksplokira li napunjena baterija u trenutku uključanja trošila, uzrok može biti isparavanje elektrolita i sušenje ploča. Visoka početna struja pri uključanju trošila može izazvati i iskrenje između suhih ploča i zapaljenje plinske smjese u bateriji“ (Zdenković, 2015: 4).

Kao što je spomenuto, olovno-kiselinske baterije sadrže sumpornu kiselinu, koja u slučaju neopreznog rukovanja može uzrokovati ozbiljne opekline te znatno oštetiti okoliš. Ove baterije prilikom punjenja proizvode zapaljivi vodik, stoga ih treba držati podalje od za zapaljivih tvari. Također, ova se vrsta baterija gotovo u potpunosti može reciklirati, što pridonosi smanjenju onečišćenja okoliša, smanjenju potreba za proizvodnjom novih baterija i štednji na svim vrstama resursa uključenih u njihovu proizvodnju.

U *Tablici 1.*, prikazan je sadržaj olovno-kiselinskih baterija, a tablica uspoređuje tri gore navedene baterije, te se ovi podaci mogu koristiti kao referenca pri odabiru olovno-kiselinske baterije za određenu primjenu.

**Tablica 1.** Karakteristike olovno-kiselinskih baterija

| <b>Vrsta</b>                            | <b>Klasična<br/>(engl.Flooded<br/>lead-acid<br/>battery)</b> | <b>Zabrtvljena<br/>(VRLA)<br/>(engl.<br/>ABM/Absorbant<br/>glass mat)</b> | <b>Zabrtvljena<br/>(VRLA)<br/>Gel</b> |
|---|--|---|---------------------------------------|
| <b>Nazivni<br/>napon<br/>ćelije</b>     | 2.00 V   |   |                                       |
| <b>Max. napon</b>                       | 2.45 V   | 2.40 V  |                                       |
| <b>Napon<br/>postupnog<br/>punjenja</b> | 2.30 V   | 2.25-2.30 V   |                                       |
| <b>Min. napon</b>                       | 1.75 V   |   |                                       |

|   |  |                |
|---|--|----------------|
| <b>Specifična gustoća energije</b>        | 30-50 Wh/kg                            |                |
| <b>Brzina punjenja</b>                    | 0.05-0.1 C                             |                |
| <b>Brzina pražnjenja</b>                  | 0.1-3 C                                |                |
| <b>Broj ciklusa punjenja i pražnjenja</b> | 300-700                                | 300-500        |
| <b>Održavanje</b>                         | Periodična provjera razina elektrolita | Bez održavanja |

## 2.2 LITIJ-IONSKE BATERIJE

Litij-ionske baterije predstavljaju oblik punjivih energetske spremnika koji su postali neizostavan dio suvremene svakodnevice, opskrbljujući energijom gotovo sve što prosječni potrošač koristi u svakodnevnom životu. Ove baterije napajaju različite uređaje kao što su pametni telefoni, prijenosna računala, električni automobili i sustavi za proizvodnju obnovljive električne energije poput solarnih panela i vjetroelektrana. S vremenom su postale ključna tehnologija, s rastućim značajem i potražnjom odnosno svjetskim ciljem okretanja prema održivim i obnovljivim elektroenergetskim rješenjima.

Povijest litij-ionskih baterija potječe iz 1970-ih godina i smještena je u zapadni kulturalni krug, gdje znanstvenici istraživali upotrebu litija kao materijala za elektrode. Ipak, tek tijekom 1990-ih godina litij-ionske baterije počele su napredovati i primjenjivati se u komercijalne svrhe, posebno u potrošačkoj elektronici čija upotreba upravo tada bilježi eksponencijalan kulturalni (ali i tehnološki) rast. Danas su litij-ionske baterije među najčešće korištenim tipovima, s procjenama da će tržište tih baterija do 2025. godine doseći prihod od više od 150 milijardi dolara (prema: Prpić i Ralica, 2022).



**Slika 4.** Različite vrste litij-ionskih baterija

Izvor: [https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN025?sc\\_lang=zh-TW](https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN025?sc_lang=zh-TW)

U suštini litij-ionske baterije funkcioniraju pomicanjem litijevih iona ka i od dvije elektrode, gdje stvaraju protok elektrona koji time stvara električnu energiju. Litij-ionske baterije „bez uređaja za održavanje napona u svakoj pojedinoj ćeliji uopće ne mogu raditi bez rizika eksplozije. Ipak, one su danas posvuda oko nas i u samome vrhu suvremenih tehnologija, od mobitela i laptopa do [električnih automobila, a razloga je za to mnogo]“ (Zdenković, 2015: 7). Ove baterije su lagane, imaju visoku gustoću energije, dugačak radni vijek, što ih čini prigodnim za široku primjenu. Ipak, litij-ionske baterije dolaze sa svojim problemima i rizicima kao što su sigurnosni rizici, veliki troškovi i nedostatak resursa za njihovu proizvodnju.

Prpić i Ralica razlikuju tri vrste litij-ionskih baterija:

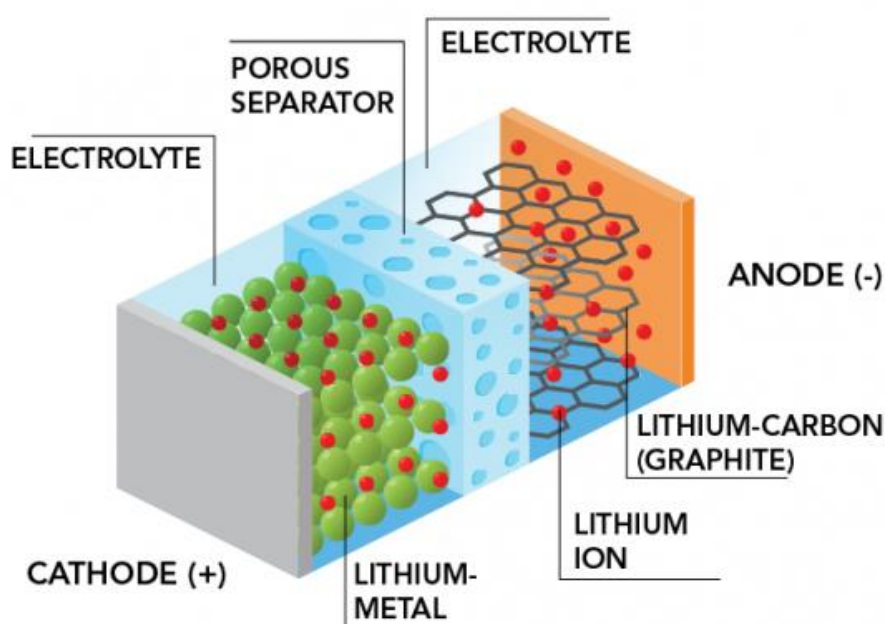
„LFP baterije (litij-željezo-fosfatne baterije ili litijev ferofosfat baterije) su baterije bez rijetkih metala, niske toksičnosti, nezapaljive i dugotrajne te je njihova cijena niska.

Drugi smjer čine NCA (litij-nikl-kobalt) baterije, Tesline baterije s nešto malo rijetkih metala, relativno zapaljive, velike gustoće i lagane, ali od 30 do 50% skuplje od LFP baterija.

Treću vrstu baterija čine NMC baterije, verzije litij-ionske baterije koje se sastoje od nikala, mangana i kobalta. Prema karakteristikama vrlo su slične NCA baterijama, ali nešto manje zapaljive, a koriste ih europski i korejski proizvođači“ (Prpić i Ralica, 2022).

### 2.2.1. PRINCIP RADA

Litij-ionske baterije sastoje se od tri glavne komponente što je prikazano na Slici 5., dvije elektrode (anode i katode) i elektrolita za kretanje litijevih iona između elektroda. Pozitivna katoda najčešće izrađena od litij kobalt oksida ( $\text{LiCoO}_2$ ), iako se mogu koristiti i drugi materijali kao što su litij željeni fosfat ( $\text{LiFePO}_4$ ) i litij mangan oksid ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ). Negativna anoda je izrađena od grafita, iako se mogu koristiti različite legure te se razvijaju ostali materijali za poboljšanje učinkovitosti kao što su litijev titanat ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) i silicij ( $\text{R}_2\text{SiO}$ ). Elektrolit je uglavnom litijeva sol otopljena u nekom od uobičajenih organskih otapala (Daniel, Li i Wood, 2011).



**Slika 5.** Dijelovi litij-ionske baterije

Izvor: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/how-does-a-lithium-ion-battery-work>

Pri procesu punjenja litij-ionskih baterija, litijevi ioni ( $\text{Li}^+$ ) migriraju iz katode i putuju kroz elektrolit do anode, gdje se skladište. Ovaj se postupak olakšava putem kretanja elektrona kroz vanjski krug, što stvara tok električne struje. Međutim, pri pražnjenju baterija,

ovaj proces se obrće. Litijevi ioni ( $\text{Li}^+$ ) kreću se od anode do katode kroz elektrolit, oslobađajući elektrone koji generiraju energiju.

Jedna je od ključnih prednosti litij-ionskih baterija njihova visoka energetska gustoća, što znači koliko energije može biti pohranjeno u određenoj zapremini ili masi. Ta gustoća obično iznosi 250-670Wh/l te 100-265Wh/kg. Ova svojstva proizlaze iz reaktivnosti litija, koji može značajne količine energije skladištiti u svojim atomskim vezama. Ipak, ova karakteristika također znači da su litij-ionske baterije osjetljive na pregrijavanje ili čak paljenje ako se nepravilno koriste ili rukuju. Tzv. *toplinski bijeg* predstavlja ključni sigurnosni izazov povezan s litij-ionskim baterijama, a događa se kada baterija postane pregrijana ili oštećena, što izaziva nekontrolirano oslobađanje energije. Ovaj rizik proizlazi iz upotrebe zapaljivog elektrolita u ovim baterijama. Ako je baterija oštećena ili ako temperatura prijeđe sigurnosni prag od  $-20^{\circ}\text{C}$  ili  $+60^{\circ}\text{C}$ , elektrolit se može zapaliti ili čak eksplodirati.

Ovaj je sigurnosni rizik posebice velik kod većih baterija koje se koriste u električnim automobilima ili u elektroenergetskim skladištima energije (eng. *grid-scale energy storage*), gdje već jedan manji kvar na bateriji može uzrokovati lančanu reakciju i uzrokovati katastrofalne posljedice po cijeli energetski sustav.

Kako bi se smanjili potencijalni rizici povezani s litij-ionskim baterijama, primjenjuju se baterijski upravljački sustavi ili BMS (eng. *battery management system*). BMS sustavi nadziru stanje baterije i upravljaju procesima punjenja i pražnjenja kako bi se osiguralo da baterija ostane funkcionalna unutar sigurnih granica. Osim toga, ovaj upravljački sustav uključuje dodatne sigurnosne mehanizme, kao što su sprječavanje pretjeranog punjenja i pražnjenja te praćenje temperature baterije. Sve ove sigurnosne mjere imaju cilj sprječavanja potencijalnih oštećenja, povećanje pouzdanosti i produljenje životnog vijeka baterije. U većim se sustavima također koriste aparati za hlađenje, kao što su ventilatori, a kako bi se osiguralo dobro strujanje zraka i kontinuirano održavala optimalna temperatura.

### **2.2.2. PREDNOSTI I NEDOSTACI LITIJ-IONSKIH BATERIJA**

Sve veća potražnja za litij-ionskim baterijama donosi svoje izazove. Oni se posebice očituju kao dostupnost sirovina koje su potrebne za proizvodnju baterija, riječju litij i kobalt.

To je dovelo do zabrinutosti oko utjecaja eksploatacije ovih sirovina na okoliš i zdravlje (Campbell, 2022). Neki od rizika eksploatacije ovih sirovina jesu degradacija tla, onečišćenje



pitke vode, gubitak bioraznočnosti na stanovitim područjima, oštećenje ekosustava i naposljetku stanovit doprinos nepoželjnom globalnom zatopljenju. Dodatni izazov predstavljaju troškovi proizvodnje, posebice za aplikacije većih razmjera kao što su elektroenergetska skladišta energije. Iako je cijena litij-ionskih baterija u posljednjih godina u stalnome padu, ona i dalje koči njihovu široku primjenu, barem u onoj mjeru u kojoj za to postoji realna potražnja. Naposljetku postoji i velika zabrinutost oko recikliranja i njihov utjecaj na okoliš, budući da litij-ionske baterije sadrže otrovne i zapaljive materijale koji utoliko mogu biti štetni za okoliš i zdravlje ukoliko se s njima ne rukuje pravilno.

Unatoč svim ovim izazovima, prednosti litij-ionskih baterija doprinose smanjenju emisiji stakleničkih plinova, povećanju energetske učinkovitosti i većoj energetske pristupačnosti. Sve ove prednosti potiču stalna ulaganja u ovu tehnologiju, što nužno rezultira inovacijama u svrhu povećanja sigurnosti i učinkovitosti litij-ionskih baterija.

*Tablica 2.* pruža informacije o najčešćim vrstama litij-ionskih baterija koje se upotrebljavaju, uključujući njihove nazivne (tj. deklarativne) napone, maksimalne i minimalne napone, brzine punjenja i pražnjenja, životni ciklus itd. Ova se tablica može koristiti kao referenca za odabir određene vrste baterije sukladno njenoj namijenjenoj primjeni. Važno je imati na umu da neka specifična svojstva baterija mogu varirati ovisno o njezinom dizajnu, proizvođaču i primjeni.

**Tablica 2.** Karakteristike Litij-ionskih baterija

| <b>Vrsta</b>         | <b>Litij Kobalt Oksid</b>   | <b>Litij Mangan Oksid</b>                 | <b>Litij Nikal Mangan Oksid</b> | <b>Litij Željezni Fosfat</b> | <b>Litij Nikal Kobalt Aluminijev Oksid</b> | <b>Litij Titanat Oksid</b>                |
|----------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|------------------------------|--|---|
| <b>Skraćena</b>      | LiCoO <sub>2</sub><br>(LCO) | LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub><br>(LMO) | LiNiMnCoO <sub>2</sub><br>(NMC) | LiFePO <sub>4</sub><br>(LFP) | LiNiCoAlO <sub>2</sub><br>(NCA)            | Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub><br>(LTO) |
| <b>Nazivni napon</b> | 3.60V                       | 3.70V<br>(3.80V)                          | 3.60V<br>(3.70V)                | 3.20,<br>3.30V               | 3.60V                                      | 2.40V                                     |
| <b>Max. Napon</b>    | 4.20V                       | 4.20V                                     | 4.20V                           | 3.65V                        | 4.20V                                      | 2.85V                                     |

|   |   |  |  |   |                               |  |
|---|---|--|--|---|-------------------------------|--|
| <b>Min. funkcionalni napon</b>            | 3.00V   | 3.00V  | 3.00V  | 2.50V   | 3.00V                         | 1.80V  |
| <b>Min. napon</b>                         | 2.50V   | 2.50V  | 2.50V  | 2.00V   | 2.50V                         | 1.50V  |
| <b>Specifična gustoća energije</b>        | 150–<br>200Wh/kg  | 100–<br>150Wh/kg                                     | 150–<br>220Wh/kg   | 90–<br>120Wh/kg   | 200–<br>260Wh/kg              | 70–<br>80Wh/kg                                     |
| <b>Brzina punjenja</b>                    | 0.7–1C<br>(3h)  | 0.7–1C<br>(3h)                                       | 0.7–1C (3h)  | 1C (3h)   | 1C                            | 1C (5C max.)                                       |
| <b>Brzina pražnjenja</b>                  | 1C (1h)   | 1C, 10C  | 1–2C   | 1C (25C pule)   | 1C                            | 10C  |
| <b>Broj ciklusa punjenja i pražnjenja</b> | 500–1000  | 300–700  | 1000–2000  | 1000–<br>2000   | 500                           | 3,000–<br>7,000                                    |
| <b>Održavanje</b>                         | Držati na sobnoj temperaturi, ukoliko se skladišti djelomično napuniti, izbjegavati puni ciklus punjenja, korištenje umjerene struje punjenja |  |  |   |                               |  |
| <b>Upotreba</b>                           | Mobiteli, tableti, laptopi, foto-aparati  | El. alat, medicinska oprema, razni pogonski sklopovi | Električne bicikle, medicinska oprema, električni automobili, industrija | Uređaji koji zahtijevaju isporuke velike struje u kratkom intervalu | Medicinska oprema, industrija | UPS, električni automobili, male solarne elektrane |

Kada je riječ o usporedbi olovnih i litij-ionskih baterija Radin i Zdenković (2015.) naglašavaju:

„Za dnevnu potrošnju od 20 kWh u sustavu s Li-ion baterijom mora se iz fotonaponskog polja osigurati 30 kWh. Razlika je gotovo 10 kWh dnevno. Ugrubo preračunavši, da bi sustav s olovnim baterijama postigao sličnu efikasnost tijekom ljetne proizvodnje od 4 kWh/kwp, fotonaponsko polje treba povećati za dodatnih 2,5 kW fotonaponskih modula. A ti se moduli moraju i povezati i montirati, za što treba i dodatni kabel i montažni materijal, a potom i odgovarajući jači ulaz regulatora punjenja. I to je argument u korist litij-ionskih baterija. Štoviše, komponente sustava mogu se primjenom Li-ion baterija optimizirati i ne treba povećavati fotonaponsko polje za očekivanu proizvodnju energije koja se, na kraju, ne može korisno pohraniti u olovnu bateriju [...] Li-ion tehnologija zaista omogućuje od 2 do 4 puta veći broj ciklusa

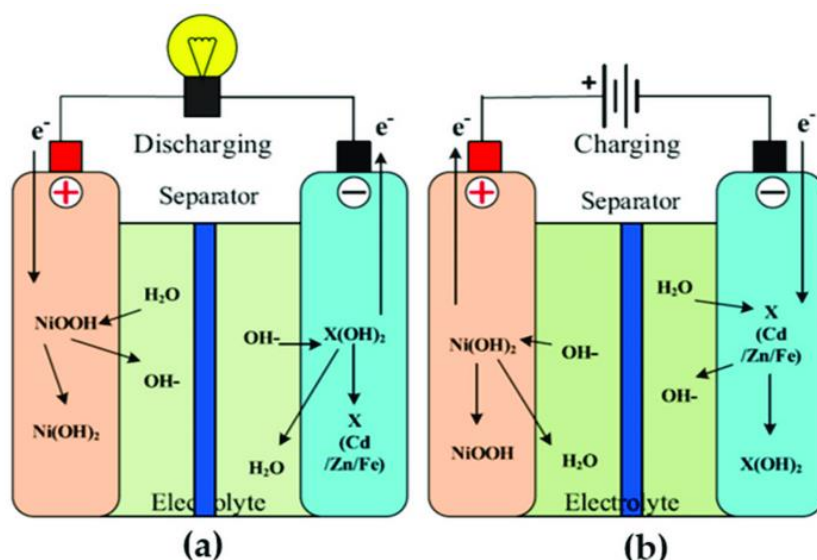
pražnjenja i punjenja [...] Pri usporedbi [se] uzima u obzir da se olovna baterija smije prazniti samo do 50% kapaciteta kako bi se u životnom vijeku održao što veći broj ciklusa, oko 500. No [...] litij-ionska baterija smije se prazniti praktički do kraja, čime nam je stalno na raspolaganju cijeli nazivni kapacitet baterije, u mnogo više ciklusa. A to je golema prednost“ (Radin i Zdenković, 2015).

### **2.3. BATERIJE NA BAZI NIKLA**

Baterije koje koriste nikal kao osnovni materijal čine kategoriju sekundarnih baterija koje također imaju podugačku povijest, ali takvu kakva se tek počela znatno razvijati posljednjih nekoliko desetljeća i to posebice u kontekstu različitih područja elektronike. Prva baterija ovakve vrste, nazvana nikel-kadmijeva baterija, razvijena je na samom kraju 19. stoljeća u Europi. Nikel-kadmijeve baterije u suvremeno su vrijeme posebice primjenjive u prijenosnoj elektronici, u uređajima poput mobilnih telefona, električnih alata, tehnologije neprekidnog napajanja (UPS – eng. *uninterruptible power supply*) i drugih elektroničkih *gadgeta*. Ova vrsta baterija temelji se na različitim kemijskim spojevima nikla, kao što su nikel-kadmijeve (NiCd), nikel-metal-hibridne (NiMH), nikel-željezne (NiFe), nikel-cinčane (NiZn) i nikel-vodikove (NiH) baterije.

#### **2.3.1. PRINCIP RADA**

Baterije na bazi nikla funkcioniraju na temelju elektrokemijskih reakcija koje se događaju između kemijskih spojeva koje sadrže. S obzirom na činjenicu da su nikel-kadmijeve baterije među najrasprostranjenijim baterijama na bazi nikla u suvremenoj upotrebi, elektrokemijska reakcija koju one uključuju važna je u kontekstu razumijevanja čitave ove skupine baterija (baziranih na niklu kao osnovnom elementu). Ove se baterije sastoje od dvije elektrode: anode i katode, koje su odvojene poroznim separatorom. Dok separator omogućuje protok iona, on istovremeno sprječava direktan kontakt između elektroda kako bi se izbjegao kratki spoj unutar baterije. Anoda je izrađena od kadmija, dok je katoda napravljena od nikel-oksida-hidroksida. Elektrolit koji se koristi u NiCd baterijama otopina je kalijevog hidroksida (KOH) (Williamson et al., 2011). *Slika 6.* prikazuje kemijsku reakciju koja se događa prilikom punjenja i pražnjenja baterija na bazi nikla.



**Slika 6.** Kemijska reakcija prilikom punjenja i pražnjenja baterije na bazi nikla

Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Chemistry-of-nickel-based-battery-a-during-discharging-b-during-charging-57\\_fig5\\_353451270](https://www.researchgate.net/figure/Chemistry-of-nickel-based-battery-a-during-discharging-b-during-charging-57_fig5_353451270)

Tijekom pražnjenja kod ovih baterija dolazi do elektrokemijske reakcije na anodi gdje se dolazi do oksidacije metalnog kadmija pri čemu se stvaraju ioni kadmija. Na katodi se nikel-oksidihidroksid reducira na nikel-hidroksid oslobađajući elektrone koji se zatim kreću kroz vanjski krug oslobađajući energiju u obliku električne struje.

Tijekom punjenja NiCd baterija elektrokemijska je reakcija obrnuta. Dok se baterija puni, dolazi do redukcije iona kadmija te se oni vraćaju natrag u metalni kadmij na anodi. Istovremeno, nikel-hidroksid na anodi oksidira vraćajući se natrag u prvobitno stanje u nikel-oksidihidroksid, dok se u međuvremenu otpušteni elektroni apsorbiraju u katodi.

### 2.3.2. KARAKTERISTIKE I VRSTE BATERIJA NA BAZI NIKLA

Nikel-kadmijeve baterije u komercijalnu su upotrebu ušle krajem 1940. godina i nakon relativno sporog korisničkih početaka, doživljavaju eksponencijalan rast u proizvodnji i to posebice zahvaljujući prijenosnoj elektronici koja se ubrzano razvija 1990. godina. Ove su baterije obilježene relativno visokom specifičnom gustoćom energije koja iznosi oko 45-80Wh/kg i ciklusom punjenja i pražnjenja oko 1000, što je naravno ovisno o upotrebi (prema Du i Lu, 2014). Ipak, jedan je od glavnih nedostataka ove vrste baterija tzv. *memorijski efekt* (eng. *memory effect*), do kojeg dolazi tako što baterija „pamti“ manji kapacitet vlastite

zapremine u slučajevima u kojima se istu počne puniti prije nego što se ista potpuno isprazni, a to znači da će u tom slučaju baterija pokazivati manji kapacitet nego što ga zapravo ima. To dovodi do kraćeg perioda rada i smanjenje učinkovitosti te time i iskoristivosti baterije. Kako bi se spriječio memorijski efekt potrebno je u potpunosti isprazniti bateriju prije ponovnog punjenja. Nove, poboljšane verzije ove baterije gotovo su u potpunosti riješile problem memorijskog efekta, ali se i dalje preporučuje svaka tri mjeseca u potpunosti isprazniti NiCd bateriju.



**Slika 6.** Tipične Nikl-Metal-Hibridne (NiMH) baterije u AA kućištu

Izvor: <https://ecocycle.com.au/blog/battery-recycling-2-nickel-based-batteries/>

Valja napomenuti i činjenicu da su tijekom 1980-ih godina, a u svjetlu razvoja IT industrije odnosno informacijskih tehnologija, razvijene nove legure koje su poboljšale stabilnost i učinkovitost NiCd baterija u odnosu na standardne varijante ovih baterija. Tako nikal-metal-hibridne baterije imaju gotovo 40% višu specifičnu gustoću energije koja iznosi oko 60-120Wh/kg i manje su sklone memorijskom efektu. Obično se koriste u prijenosnoj elektronici, a mogu se pronaći u automobilima na hibridni pogon (Edmondson, 2021). NiMH baterije ipak nisu bez svojih specifičnih nedostataka: potrebno je više vremena za njihovo punjenje u usporedbi s klasičnim NiCd baterijama i podložne su samopražnjenju ili auto-pražnjenju (eng. *self-discharge*). U prva 24 sata nakon punjenja kapacitet baterije može pasti i 10-15%, dok im se na mjesečnoj bazi kapacitet može smanjiti i za značajnih 10% od ukupnog inicijalnog kapaciteta (Energizer Brands LLC, 2018).

Nikal-željezne (NiFe) baterije razvio je čuveni Tomas Edison 1901. godine što im daje posebno mjesto u komercijalnoj povijesti. Ovdje se za anodu koristi željezo dok je elektrolit sačinjen od kalijevog hidroksida. Baterijska stanica može proizvesti napon od 1.20V što je ekvivalentno i ostalim baterijama na bazi nikla (Buchmann, 2021). Velika je prednost ove

baterije (što je razlikuje od drugih vrsta NiCd baterija) otpornost na prekomjerno punjenje i pražnjenje te činjenica da ima dugi životni vijek s velikim brojem ciklusa punjenja i pražnjenja, što je gotovo idealno za UPS sustave (tj. sustave s neprekidnim napajanjem). Otporne su na vibracije i velike oscilacije u temperaturi, a njihov je nedostatak niska specifična gustoća energije koja iznosi oko 50Wh/kg, kao i sklonost samopražnjenju koje može iznositi i do oko 20-40% smanjenja od ukupnog kapaciteta na mjesečnoj razini.

Baterije temeljene na nikel-cinku (NiZn) vrlo su srodne nikel-kadmijevim (NiCd) baterijama. Njihove sličnosti uključuju zajednički elektrolit i katodni materijal od nikla, dok se njihove razlike baziraju na anodnom materijalu od cinka. Ono što ističe ovu vrstu baterija je nazivni napon od 1,65V, napon veći od nazivnog napona ostalih nikel-baziranih baterija koji iznosi 1,20V. Nikel-cinčane baterije odlikuju se visokom specifičnom gustoćom energije, oko 100Wh/kg, ali imaju ograničen radni vijek od približno 200-300 ciklusa punjenja i pražnjenja što ih ne čini najboljim izborom za postupno punjenje (tzv. *trickle charging*). Dodatnu je prednost ovih baterija moguće naći u njihovoj nižoj toksičnosti u usporedbi s drugim baterijama iste kategorije, ali i neizostavna i u suvremeno doba izuzetno važna gotovo potpuna sposobnost recikliranja. U općem ekološkom kontekstu ipak valja istaknuti da baterije temeljene na niklu mogu imati negativan utjecaj na okoliš i zdravlje ako se nepravilno zbrinjavaju i recikliraju. NiCd baterije sadrže otrovni kadmij koji može uzrokovati ozbiljne zdravstvene probleme. S druge strane, NiMH baterije ne sadrže kadmij, ali sadrže nikel koji može pridonijeti zagađenju tla i vode.

Unatoč svemu navedenom, baterije temeljene na niklu dolaze s nizom prednosti: one se odlikuju solidnim brojem ciklusa punjenja i pražnjenja te mogu isporučiti značajne količine struje, što ih čini idealnim za primjenu u prijenosnim alatima i hibridnim vozilima. Osim toga, ove se baterije dobro ponašaju u različitim temperaturnim uvjetima. Na negativnoj strani promišljanja o upotrebi baterija na bazi nikla, radi se o baterijama koje nemaju visoku specifičnu gustoću energije, sklone su gubitku energije tijekom vremena (samopražnjenju) te pokazuju memorijski efekt koji je u novijim modelima smanjen, ali koji ipak predstavlja nepoželjnu karakteristiku.

Pri odabiru baterija na bazi nikla, važno je detaljno razmotriti njihove karakteristike kako bi se osigurala njihova optimalna primjena. U *Tablici 3.* iznesene su detaljne karakteristike ovih baterija kako bi se olakšalo donošenje takvih, informiranih odluka.

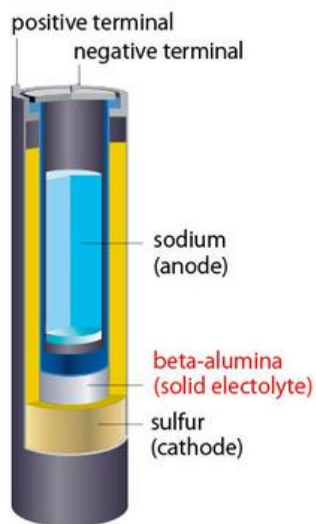
**Tablica 3.** Karakteristike baterija na bazi nikla

| Vrsta                              | Nikl-kadmij  | Nikl-metal-hibridne   | Nikl-željezo                               | Nikl-cink  |
|------------------------------------|--|---|--|--|
| Skraćenica                         | NiCd   | NiMH  | NiFe                                       | NiZn   |
| Nazivni napon                      | 1.20V/cell (1.25)  |   | 1.20V                                      | 1.65V  |
| Max. napon                         | Observing voltage drop; plateau voltage as override        |   |  | 1.9V   |
| Postepeno punjenje                 | 0.1C   | 0.05C   | /  | No trickle charge  |
| Specifična gustoća energije        | 45–80Wh/kg   | 60–120Wh/kg   | 50Wh/kg                                    | 100Wh/kg   |
| Brzina punjenja                    | 1C   | 0.5–1C  | /  | Regular charge   |
| Brzina pražnjenja                  | 1C   | 1C  | Moderate                                   | Relative high power  |
| Broj ciklusa punjenja i pražnjenja | 1,000  | 300–500   | Do 20. godina UPS                          | 200–300  |
| Održavanje                         | Upotpunosti ispraznit svaka 3 mj., zbog memorijskog efekta | Upotpunosti ispraznit svakih 6 mj., zbog memorijskog efekta | /  | /  |
| Kvarovi                            | Memorijski efekt može smanjiti kapacitet                   | Memorijski efekt (znatno manji nego kod NiCd)               | Prekomjerno punjenje može isušiti bateriju | Mali broj ciklusa punjenja i pražnjenja zbog stvaranja dendrita unutar ćelija baterije |
| Vrsta kućišta                      | A, AA, C, plosnati oblik                                   | A, AA, AAA, C, plosnate                                     | /  | Najčešće AA  |
| Upotreba                           | Zrakoplovstvo, velik raspon temperatura                    | Hibridni automobili, potrošačka oprema, UPS                 | UPS, potrošačka oprema                     | Zbog malog broja ciklusa punjenja i pražnjenja nije široko primijenjena                |

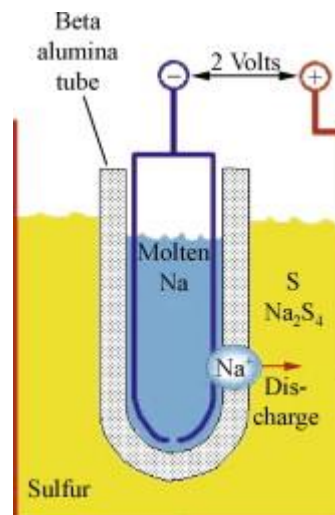
## 2.4. NATRIJ-SULFIDNE BATERIJE

Natrij-sulfidne baterije pripadaju kategoriji sekundarnih baterija te koriste rastaljeni natrij (Na) kao anodni materijal, dok za katodu koriste rastaljeni sumpor (S). Ove su dvije elektrode kod NaS baterija odvojene čvrstim keramičkim elektrolitom, koji istovremeno djeluje kao separator. *Slika 8.* prikazuje presjek natrij- sulfidne baterije. Ovaj je tip baterija razvijen od strane japanske tvrtke NGK 1960-ih, idejno kao potencijalno rješenje za rasterećenje nacionalnih elektroenergetskih mreža.

Natrij- sulfidne baterije donose nekoliko prednosti u usporedbi s drugim baterijskim tehnologijama. U prvom redu to je visoka specifična gustoća energije, koja se kreće od 90 do 120Wh/kg, dugačak životni ciklus i visoka učinkovitost. Međutim, s tim prednostima dolaze i stanovita ograničenja. Da bi ove baterije optimalno funkcionirale, zahtijevaju visoku radnu temperaturu od otprilike 300°C. Ova potreba za visokom temperaturom može predstavljati rizik od tzv. *temperaturnog bijega*<sup>6</sup>, što treba uzeti u obzir prilikom razmatranja njihove primjene.



**Slika 7.** Presjek NaS baterije



**Slika 8.** Kemijska reakcija unutar NaS baterije

<sup>6</sup> Temperaturni bijeg (eng. *thermal runaway*) pojava je koja se događa u baterijskim sustavima kada se temperatura baterije nekontrolirano povećava, što rezultira brzim i samopodržavajućim povećanjem temperature. Temperaturni bijeg u najgorim slučajevima može dovesti do ozbiljnih problema kao što su pregrijavanje, curenje, eksplozije ili požar. U pravilu, temperaturni je bijeg posljedica unutarnjih reakcija unutar baterijskih stanica koje oslobađaju dodatnu toplinu. *op aut.*



### 2.4.1. PRINCIP RADA NATRIJ-SULFIDNIH BATERIJA

Elektrokemijska reakcija koja se događa u natrij-sulfidnim baterijama (prikazana na Slici 9.) temelji se na interakciji između natrija i sumpora. Tijekom punjenja, a posredovano procesom oksidacije, natrijevi ioni na anodi gube elektrone. S druge strane, na katodi dolazi do procesa redukcije sumpora pri čemu elektroni sudjeluju u stvaranju polisulfidnih iona. Pri pražnjenju, ovaj se proces obrće: natrijevi ioni i polisulfidni ioni reagiraju i oslobađaju elektrone, a to rezultira formiranjem natrijevog polisulfida i sumpora.

### 2.4.2. KARAKTERISTIKE NATRIJ-SULFIDNIH BATERIJA

Natrij-sulfidne baterije (NaS) karakterizira niz svojstava koja ih čine zanimljivima. Imaju malen unutarnji otpor zahvaljujući keramičkom elektrolitu, što rezultira većim omjerom snage i težine te smanjenom proizvodnjom topline tijekom punjenja. U usporedbi s drugim baterijskim tehnologijama, NaS baterije imaju prednosti i nedostatke. Primjerice, imaju veću specifičnu snagu od olovnih baterija, ali zahtijevaju znatno višu radnu temperaturu. Osim toga, imaju dulji životni ciklus od litij-ionskih baterija, iako su skuplje. Istraživanja se u kontekstu ove tehnologije nastavljaju, kao i razvitak iste, a to je indikacija potencijalnih sigurnijih i učinkovitijih rješenja u budućnosti. Tehničke karakteristike NaS baterija prikazane su u *Tablici 4.* štono riječ, treba pažljivo razmotriti prednosti i ograničenja ove tehnologije pri odabiru njezine primjene.

**Tablica 4.** Tehničke karakteristike NaS baterije

|   |                              |
|---|------------------------------|
| <b>Napon ćelije</b>                       | 1.8 - 2.71 V                 |
| <b>Nazivni napon</b>                      | 2.00 V                       |
| <b>Specifična energija</b>                | 150 - 240 Wh/kg              |
| <b>Specifična snaga</b>                   | 90 - 230 W/kg                |
| <b>Gustoća energije</b>                   | 150 - 350 kWh/m <sup>3</sup> |
| <b>Gustoća snage</b>                      | 1.2 - 50 kW/m <sup>3</sup>   |
| <b>Radna temperatura</b>                  | 300-350 °C                   |
| <b>Broj ciklusa punjenja i pražnjenja</b> | 2500-40000                   |
| <b>Radni vijek</b>                        | 10-15 god.                   |
| <b>Samo-pražnjenje</b>                    | 0% po danu                   |

### 3. PROTOČNE BATERIJE

Protočne baterije predstavljaju tip sekundarnih baterija koje spremaju energiju u kemijskim otopinama smještenim unutar spremnika. U ovom sustavu, elektrolit cirkulira kroz ionsku membranu pomoću pumpi, što rezultira generiranjem električne energije putem elektrokemijske reakcije između različitih vrsta elektrolitskih otopina. Ovaj tip baterija ima niz prednosti, kao što su produljen životni vijek i visoka učinkovitost. Međutim, postoji nekoliko izazova kao što je visoka cijena materijala i potreba za adekvatnim prostorom za instalaciju. „Iako se sve električne baterije temelje na redoks<sup>7</sup> reakcijama, svaka se redoks reakcija ipak ne može iskoristiti u električnoj bateriji. Reakcija mora prije svega biti takva da od reaktanta (atoma, iona ili molekule) oksidacijom (otpuštanjem elektrona) ili redukcijom (primanjem elektrona) nastaje samo jedan produkt, a to znači da pri radu baterije ne dolazi do neželjenih paralelnih reakcija. Drugi su zahtjevi tehnološke naravi. Reaktanti moraju sadržavati dovoljno energije, a usto moraju biti ekonomični, priređeni na jeftin način i od jeftinih sirovina te na kraju – zahtjev koji postaje sve važniji – reaktanti i produkti moraju biti prijateljski za okoliš, a to znači da se lako recikliraju te da nisu opasni za čovjeka i prirodu“ (Raos, 2012).

Pionirska istraživanja protočnih baterija provela je NASA tijekom 1960-ih za potrebe svemirskih misija, pri čemu se koristila specifična vrsta protočne baterije nazvana cink-brom protočna baterija. Značajan preokret u razvoju protočnih baterija dogodio se kasnije, 1980-ih godina, s pojavom vanadij redoks baterije (eng. VRFB ili *Vanadium Redox Flow Battery*). Tijekom vremena, protočne baterije privlače sve veću pažnju kao potencijalno rješenje za pohranu električne energije i kao alternativu klasičnim baterijama.

#### 3.1. PRINCIP RADA

Princip rada protočnih baterija bit će objašnjen na primjeru VRFB baterija koje se u ovom kontekstu primjene najučestalije upotrebljavaju. One koriste redoks reakcije za

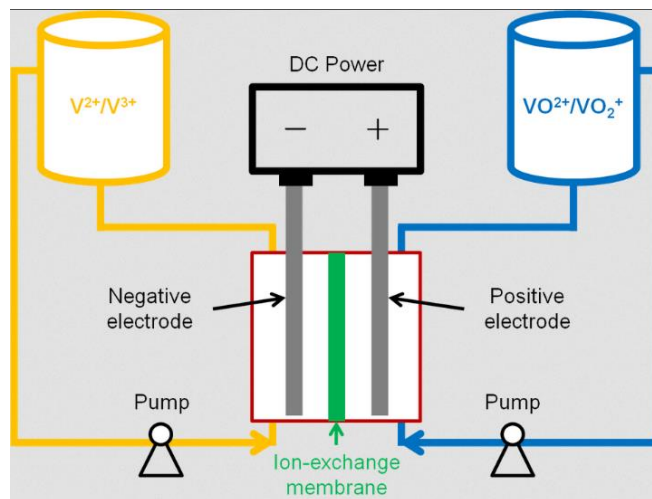
---

<sup>7</sup> Redoks baterija, skraćeno od eng. *reduction-oxidation* je vrsta baterije koja pohranjuje i oslobađa energiju putem elektrokemijskih reakcija između različitih oksidacijskih stanja elemenata. Ova se tehnologija bazira na promjenama elektronskih stanja elemenata unutar svojih elektroda, pri čemu se jedan element reducira (gubi elektrone) dok se drugi oksidira (dobiva elektrone). (Prema: Raos, 2021.)

pohranu i oslobađanje električne energije. Baterija koristi dva spremnika u kojim se nalaze otopine elektrolita vanadija s različitim stupnjevima oksidacije koji su odvojeni ionskom membranom. Osnova je ovih baterija „na redukciji (*hydrogenation*) i oksidaciji (*dehydrogenation*) organskih spojeva, u ovom slučaju na redukciji ketona u alkohole i oksidaciji alkohola u ketone. Riječ je o akumulatorskoj bateriji, ili – kako se danas voli reći – bateriji za punjenje. Zamisao je stara i posve jednostavna. U običnim baterijama, primjerice litij-ionskim, reaktanti i produkti redoks reakcija nalaze se na elektrodama. Kod protočnih baterija (RFB) reaktanti i produkti nalaze se u elektrolitu. Već postoje takve baterije, ali na bazi skupih i otrovnih vanadijevih soli, [ali postoje i nove realizacije]. [Ovo je nova tehnologija] zahvaljujući novim kemijskim spojevima, derivatima **9-fluorenona** (FL), aromatskog ketona čija se molekula sastoji samo od atoma ugljika, vodika i kisika“ (Raos, 2021).

### **3.2. PUNJENJE I PRAŽNENJE VANADIJ REDOKS BATERIJA**

Prilikom procesa punjenja, ioni vanadija u jednom spremniku oksidiraju oslobađajući elektrone, dok se istovremeno u drugom spremniku ioni vanadija reduciraju i prihvataju elektrone. Ovaj postupak rezultira nakupljanjem naboja između ta dva spremnika. Prilikom pražnjenja, ioni vanadija prolaze kroz membranu što pokreće elektrokemijsku reakciju. To rezultira nakupljanjem elektrona na membrani, generirajući električnu energiju. Ioni vanadija u oksidiranom stanju reduciraju se u niže oksidacijsko stanje, dok se ioni vanadija u reduciranom stanju oksidiraju u više oksidacijsko stanje. Elektrokemijska reakcija vanadij redoks baterije (VRFB) prikazana je na Slici 10.



**Slika 10.** Kemijska reakcija Vanadij redoks protočne baterije (VRFB)

Otopine elektrolita koje se uobičajeno koriste u VRFB baterijama obično se sastoje od iona vanadija u 2+, 3+, 4+ i 5+ oksidacijskim stanjima, s otopinom sumporne kiseline koja se koristi za razrjeđivanje otopine elektrolita. Pozitivne i negativne elektrode su obično izrađene od grafita ili karbona koji su porozni materijali, te služe za slobodno kretanje vanadijevih iona kroz njih. Membrana korištena u VRFB baterijama dopušta izmjenu elektrona dok istovremeno sprječava miješanje otopina elektrolita između dva spremnika.

### 3.3. VRSTE I KARAKTERISTIKE PROTOČNIH BATERIJA

Protočne baterije na bazi vanadija imaju nekoliko ključnih karakteristika koje ih čine prikladnih za primjenu kao skladišta energije. One imaju vrlo dug radni vijek, što znači da se mogu puniti i prazniti bez gubitka kapaciteta. Imaju visoku energetska učinkovitost od 70%, te u nekim slučajevima i do 90%. Također imaju varijabilan tj. izuzetno adaptibilan dizajn odnosno takav kakvim je relativno lako moguće manipulirati, a to omogućuje jednostavnije dimenzioniranje za različite primjene. Mogu se koristiti za mrežno i izvanmrežno skladištenje energije te su prilagodljive kako bi se zadovoljili specifični zahtjevi za isporuku energije. Međutim, postoje i ograničenja ove tehnologije, a jedno je od njih niska gustoća energije, što znači da su potrebi veći spremnici za skladištenje većih količina elektrolita. Ovaj nedostatak ih čini neprikladnim za primjenu ondje gdje je prostor ograničen. Osim toga VRFB baterije relativno su skupe za proizvodnju, najvećim dijelom zbog vanadija koji je

rijedak i skup element čija cijena može varirati što čini cijenu izrade VRFB baterija prilično nepredvidljivom. Unatoč ograničenjima, VRFB se smatra obećavajućom tehnologijom za skladištenje energije, posebice gdje je potreban dug životni ciklus i visoka učinkovitost.

Cink-brom protočne baterije koriste cink i bromid kao otopinu elektrolita, s membranom koja odvaja te dvije otopine unutar spremnika. Tijekom punjenja cink se pumpa kroz anodu, dok brom u katodi oksidira u  $\text{Br}_2$ , a tijekom pražnjenja cink se reducira u elektrolit dok se brom reducira natrag u ione bromida, stvarajući razliku potencijala na membrani. Ova vrsta baterija pruža velike snage i gustoću energije.

Protočne baterije na bazi željezo-krom koriste željezo i krom kao aktivni materijal otopljen u elektrolitu. Za vrijeme punjenja željezo oksidira u  $\text{Fe}^{2+}$  ione, dok se krom reducira u  $\text{Cr}^{3+}$  ione. Tijekom pražnjenja, ioni se željeza reduciraju natrag u željezo dok krom oksidira natrag u krom oslobađajući energiju na membrani. Ove su baterije jeftinije od VRFB zbog jeftinijih i dostupnijih resursa, ali imaju nižu učinkovitost i duže vrijeme punjenja.

Postoje i organske protočne baterije koje koriste organske molekule kao aktivne materijale u otopini elektrolita i pumpaju se kroz bateriju za proizvodnju električne energije. Imaju visoku gustoću energije i povoljne su zbog dostupnosti materijala, ali imaju kratak životni vijek i nižu učinkovitost u usporedbi s ostalim protočnim baterijama.

Hibridne baterije koriste dvije vrste otopine elektrolita, jednu s nekom vrstom metala kao što je željezo ili skuplji vanadij i drugu otopinu s organskim materijalom. Otopina elektrolita metalnih iona osigurava visoku gustoću energije i duži životni vijek, dok organska otopina osigurava visoku gustoću specifične snage.

Osnovna je podudarnost među nabrojanim tehnologijama protočnih baterija sadržana u činjenici da koriste tekući elektrolit pohranjen u spremnike koji se pumpa kroz bateriju. Ipak, zanimljivo je da svaka od ovih tehnologija ima svoju jedinstvenu elektrokemijsku reakciju što rezultira razlikama u učinkovitosti, specifičnoj snazi i energiji, te cijeni.

### 3.4. PRIMJENA PROTOČNIH BATERIJA

Protočne baterije imaju nekoliko potencijalnih primjena zbog svojih jedinstvenih karakteristika, kao što je skladištenje energije na elektroenergetskoj razini kako bi se uravnotežila potražnja kada su opterećenja na mreži velika. Moguće je pohraniti višak energije za vrijeme niske potrošnje te osloboditi tu energiju kada je potrebno (Ridden, 2020). Mogu se također koristiti kao rezervno napajanje u slučaju nužde (Raos, 2021). Upotreba im je također moguća u ruralnim i udaljenim područjima koja nisu povezana na električnu mrežu. Punjenje protočne baterije je moguće obnovljivim izvorima energije kao što je sunce ili vjetar, kao što je prikazano na Slici 11.

Prednosti korištenja protočnih baterija uključuje njihov dug životni vijek punjenja i pražnjenja te visoka učinkovitost. Također imaju mali utjecaj na okoliš jer ne sadrže toksične materijale i moguće ih je reciklirati. Jedan od najvećih nedostataka ovih tehnologija je njihova cijena koja je vrlo velika u usporedbi s drugim tehnologijama kao što su litij-ionske baterije. Drugi problem je što zauzimaju puno prostora te ih je teško ugraditi te je, prema tome, potrebno projektirati prostor posebno prilagođen za korištenje protočnih baterija.

„Iako je [...] sustav [protočnih baterija] u prošlosti koristio skup, opasan i toksičan vanadij i brom, otopljene u kiselini za stvaranje elektrolita, u novim konstrukcijama se ti materijali zamjenjuju s organskim ili više ekološkim alternativama. U svojoj konstrukciji, istraživački tim sa Sveučilišta Južne Kalifornije primijenio je otpadni produkt iz rudarske industrije i organski materijal, koji se može dobivati iz sirovine na osnovi ugljika, kao što je ugljični dioksid, koji se već primjenjuje u drugim redoks protočnim baterijama. Tijekom ispitivanja bilo je utvrđeno da se protočna baterija s otopinom željeznog sulfata i Antrakinono disulfonskom kiselinom (AQDS) može puniti i prazniti više od 100-puta praktično bez gubitka kapaciteta i snage. Istraživači naglašavaju da primijenjeni jeftini materijali mogu voditi i do bitnih ušteda u troškovima dobave električne energije, ukoliko bi se takve baterije izrađivale u velikim količinama, u usporedbi s redoks protočnim baterijama koje primjenjuju vanadij“ (Ridden, 2020).



**Slika 11.** Prikaz djelovanja redoks protočne baterije pri pohrani električne energije iz obnovljivih izvora

*Izvor: Ridden, 2020.*

## 4. KRITERIJI UGRADNJE SKLADIŠTA ENERGIJE

Baterijska skladišta energije sve su korištenija kao oblik skladištenja energije, a tehnologije posvećene poboljšavanju njihovih performansi i optimizaciji njihove primjene, ali i njihovog tzv. ekološkog traga eksponencijalno se razvijaju u digitalno doba, a u odnosu na 20. stoljeće u kojem ove tehnologije nastaju. Zbog raznovrsnosti baterijskih skladišta energije, procjena učinkovitosti ovih sustava i različitih baterijskih tehnologija može biti kompleksna jer postoji niz tehničkih, ekonomskih, ekoloških i sigurnosnih kriterija koji se moraju uzeti u obzir. U ovom smislu, sve ovisi o kontekstu potreba i svrhovitosti koje prethode ugradnji baterijskih sustava skladištenja energije. Svaki od kriterija ugradnje i optimizacije ima svoje vlastite karakteristike i međuovisnosti, a procjena jednog dijela sustava može imati posljedice na druge kriterije sustava, stoga je planirani pristup vrlo bitan kada se govori o kriterijima ugradnje baterijskih skladišta energije.

Kada se govori o širem aspektu kriterija za ugradnju skladišta energije, tada se govori i o nekim vrlo važnim i propisanim međunarodnim regulacijama kao što je Europska energetska deklaracija, Pariška deklaracija za novu Europu, Ugovor o Energetskoj deklaraciji itd., a radi se o nadržavnim propisima. Naravno je da i svaka (europska, ali i svjetska) država raspolaže vlastitim regulacijama kada je u pitanju planiranje, konstrukcija, ugradnja i stavljanje u pogon skladišta energije, bila ona kopnena ili brodska (prema Marić, 2017). Europska je energetska povelja u ovom smislu osobito bitna i stoga će ona jedinstveno biti spomenuta, a s obzirom na to da se predmet ovog rada fokusira na tehnički aspekt radije negoli na kulturalni aspekt ugradnje skladišta energije i brodskih skladište energije. Ipak, važno je istaknuti veliki disciplinarni spektar koji se nužno uključuje u planiranje ugradnje skladišta energije, a što je više disciplina uključeno u stanoviti projekt i/ili stanovitu tematiku, to ista postaje kompleksnijom kako u teorijskom, tako i u praktičnom smislu.

„Odredbe Europske energetske povelje pokrivaju pet širokih područja:

- zaštitu i promicanje stranih ulaganja prema nacionalnim interesima,
- slobodnu trgovinu materijalima, proizvodima i opremom vezanom uz energetski sektor,
- slobodan prijenos energije kroz cjevovode i mreže,



- mehanizme za rješavanje sporova između država ili između investitora i država,
- smanjenje negativnog utjecaja na okoliš povećanjem energetske učinkovitosti cjelokupnog energetskog ciklusa“ (Marić, 2017: 4).

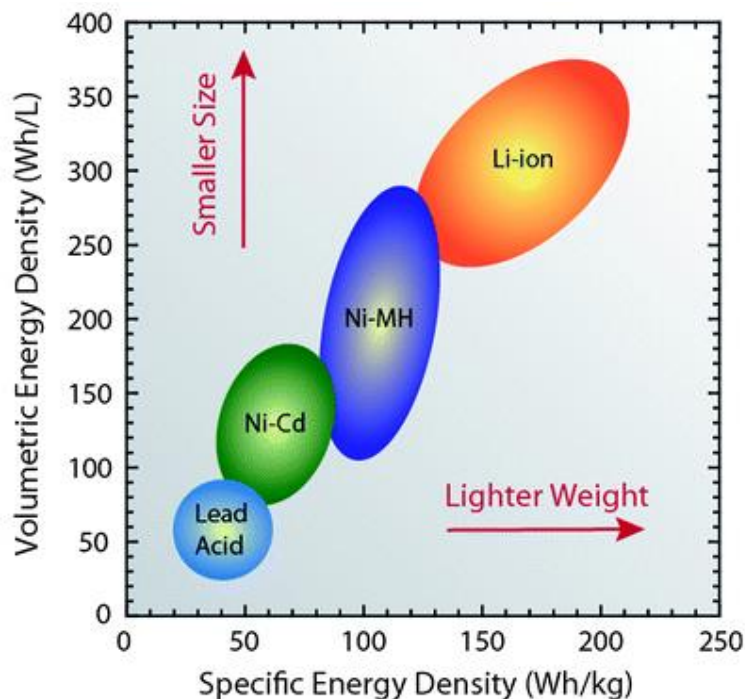
#### **4.1. TEHNIČKI KRITERIJI UGRADNJE**

Tehnički kriteriji oni su kriteriji koji se razmatraju inicijalno u jednom od prvih koraka primjene baterijskih skladišta energije. Ovi kriteriji imaju ključnu ulogu u određivanju vrste baterijske tehnologije za primjenu u određene svrhe, što ovisi o kontekstu njihove upotrebe. Postoji niz čimbenika koji su presudni poput specifične gustoće energije i snage, vijeka trajanja baterijskih skladišta, raspona napona koji će isti omogućavati, nazivne snage i mnogih drugih čimbenika koji mogu utjecati na sveukupne performanse i na učinkovitost baterijskih skladišta energije. Različite baterijske tehnologije imaju razne mogućnosti, ali i ograničenja što može utjecati na njihovu izvedbu kod različitih primjena. „Čvršćim i pouzdanijim razvojem baterija moguće je razviti i instalirati bateriju na plovilo kao pomoćni izvor energije. Također bi mogao biti glavni agregat na malim i srednjim plovilima pod uvjetom da ekonomija može biti zadovoljavajuća (Stjepović, 2023: 57). U svakom slučaju valja pregledati ključne tehničke kriterije koje je nužno uzeti u obzir prilikom evaluacije različitih baterijskih tehnologija. Razumijevanjem tehničkih kriterija moguće je odabrati pouzdan i učinkovit sustav skladištenja električne energije za određenu primjenu.

##### ***4.1.1. SPECIFIČNA GUSTOĆA ENERGIJE I SNAGE***

Gustoća energije ključan je kriterij za odabir odgovarajućeg skladišta energije za određenu primjenu jer određuje količinu energije koja se može pohraniti po jedinici volumena ili mase. Veća gustoća energije znači da baterija može pohraniti više energije za istu težinu ili obujam, što je važno za neke primjene. Gustoća energije se obično mjeri u watt-satima po kilogramu (Wh/kg) ili u watt-satima po litri (Wh/l) te u kontekstu procjene rezultira omjerom pohranjene energije i težine. Npr. kod baterije koja može isporučiti 150Wh, a teži 1,2kg, gustoća je te baterije 125Wh/kg. Količina se energije koju baterija može isporučiti računa tako da se bateriju prvo napuni do punog kapaciteta, a zatim se mjeri koliko snage ista može isporučiti u određenom vremenu. Važno je napomenuti da se gustoća energije razlikuje od gustoće snage. Na Slici 12. stoji odnos gustoće energije i snage.

Gustoća se snage odnosi na količinu energije koju baterija može isporučiti po jedinici volumena ili mase. Ona je važna za određivanje količine energije koja se može isporučiti i kao i u smislu potencijalnih primjena pri kojima je ključan faktor velika izlazna snaga. Ako stanovito skladište energije ima veliku gustoću energije tada je ono u stanju pohraniti više energije u manjoj masi. Ipak, visoka gustoća energije ne mora nužno značiti visoku gustoću snage. Uređaji koji koriste baterije visoke gustoće mogu obavljati svoj rad duže i niskom gustoćom snage, što je idealno za primjenu u prijenosnim uređajima kao što su mobiteli, laptopi, fotoaparati itd.



**Slika 12.** Odnos gustoće energije i specifične snage

Izvor: <http://homework.uoregon.edu/pub/class/hc441/bstorage.html>

Prilikom uspoređivanja gustoće energije i snage različitih baterijskih tehnologijama, važno je uzeti u obzir njihove specifične karakteristike i ograničenja, a nužno je imati na umu da neke vrijednosti mogu varirati ovisno o proizvođaču. Naposljetku, osim gustoće energije i snage valja također uzeti u obzir i ostale kriterije kao što su cijena, vijek trajanja, sigurnosni aspekti, utjecaj na okoliš itd.

#### **4.1.2. VIJEK TRAJANJA SKLADIŠTA ENERGIJE**

Vijek trajanja skladišta energije igra ključnu ulogu u ocjeni isplativosti i održivosti takvih sustava. Vijek trajanja je vremenski period tijekom kojeg skladište energije može održavati svoju funkcionalnost i učinkovitost na zadovoljavajućoj razini. Ugradnja skladišta energije, bilo da se radi o baterijama, superkondenzatorima, toplinskim skladištima ili drugim tehnologijama, obično je dugoročna investicija i kao takva, ona pretpostavlja planirani pristup. Kada se govori o vijeku trajanja skladišta energije, tada se kemijske baterije odvajaju od superkondenzatora i svih ostalih vrsta skladištenja električne energije, a te su vrste međusobno različite. Kemijske baterije što su litij-ionske baterije, imaju ograničen broj ciklusa punjenja i pražnjenja prije nego što kapacitet značajno opadne. Vijek trajanja obično se mjeri u broju ciklusa ili godinama. S druge strane, superkondenzatori imaju dulji vijek trajanja jer se temelje na elektrostatskom skladištenju energije. Vijek trajanja superkondenzatori također se mjeri u broju ciklusa i može doseći nekoliko desetaka tisuća ciklusa. Alternativno, termalne baterije i solarni spremnici topline, obično imaju dug vijek trajanja ako se pravilno održavaju. Ovdje vijek trajanja mjerimo desetljećima ili čak više. Skladišta energije temeljena na pumpama za vodu ili gravitaciji često imaju izuzetno dug vijek trajanja jer se temelje na mehaničkom principu. Održavanje ovih sustava i optimalno upravljanje njima ključni su za održavanje dugotrajnosti. Vijek trajanja solarnih panela i vjetroelektrana obično se mjeri u desetljećima. Elektronički i mehanički komponenti u ovim sustavima mogu se zamijeniti kako bi se produžio njihov vijek trajanja.

Važno je napomenuti da vijek trajanja može značajno varirati ovisno o vrsti skladišta energije, tehničkim karakteristikama, načinu upotrebe i uvjetima okoline. Pravilno održavanje, kontrola temperature i upravljanje ciklusima punjenja i pražnjenja predispozicijski su čimbenici za produženje vijeka trajanja skladišta energije. Osim toga, tehnološki napredak može i hoće poboljšati vijek trajanja i performanse skladišta energije u budućnosti.

#### **4.1.3. RASPON NAPONA**

Raspon napona jedan je od važnih kriterija prilikom odabira odnosno ugradnje skladišta energije, posebno kada se razmatra kako će skladište energije odgovarati određenoj

primjeni ili sustavu. Raspon napona odnosi se na minimalnu i maksimalnu vrijednost napona koju skladište energije može primiti ili isporučiti. Ovaj kriterij može biti i određujuć jer različite primjene i uređaji zahtijevaju različite razine napona.

Koliko raspon napona može biti važan kriterij odabira ugradnje skladišta energije, vidljivo je kod primjerice kod kućnih solarnih sustava važno je da baterija ili drugi uređaj za skladištenje može raditi unutar raspona napona koji se koristi u određenom električnom sustavu. Ovo osigurava da se energija može učinkovito pohraniti i koristiti u kući.

Električna vozila imaju specifične potrebe za napajanjem baterije. Skladište energije u vozilima mora biti kompatibilno s napajanjem i motorom vozila. Raspon napona mora biti prilagođen potrebama električnog pogona.

U industriji se koriste različite napone za različite operacije. Skladište energije u industriji mora biti sposobno podržavati raspon napona potreban za specifične procese i uređaje.

Raspon napona je važan i u prijenosnoj elektronici poput mobilnih uređaja i laptopa. Baterije u tim uređajima moraju isporučivati napon koji je kompatibilan s elektronikom uređaja.

Pri ugradnji skladišta energije, raspon napona bitan je čimbenik i stoga valja provjeriti je li kompatibilan sa sustavom u koji se ugrađuje. Stanovita skladišta energije mogu se kombinirati ili koristiti s pretvaračima kako bi se izvršila prilagodba usmjeena prema specifičnim zahtjevima napona u primjeni.

#### ***4.1.4. RADNA TEMPERATURA I KAPACITET SKLADIŠTA ENERGIJE***

Još je jedan važan tehnički faktor kod skladištenja električne energije njegova radna temperatura. Ona može značajno utjecati na učinkovitost skladišta energije. Neki sustavi imaju bolju učinkovitost pri određenim temperaturama, dok se kod drugih temperatura može povećati istovremeno utječući na povećanje unutarnjeg otpora i gubitaka energije, što je u pravilu nepovoljan indikator u kontekstu učinkovitosti.

Učinkovitost skladišta energije može varirati i ovisno o kapacitetu baterije i dubini pražnjenja. U nekim baterijama, kao što je prikazano u prethodnim poglavljima, dublje

pražnjenje može rezultirati većim gubicima energije, dok nepotpuno pražnjenje može uzrokovati memorijski efekt koji se također smatra nepoželjnim.

„Za analizu rada i određivanje potrebnog kapaciteta skladišta energije izuzetno je važno znati maksimalno dozvoljeno vrijeme unutar kojeg se pričuvni generator u slučaju potrebe mora spojiti na mrežu i početi preuzimati opterećenje. Općenito, za brodske elektroenergetske sustave razmatrani registri nalažu slijedeće: u slučaju gubitka jednog od generatora na mreži moraju se primjeniti adekvatne metode automatskog pokretanja i spajanja na mrežu pričuvnog generatora dovoljnog kapaciteta da omogući normalno upravljanje brodom i automatsko pokretanje esencijalnih pomoćnih sustava, u vremenu ne duljem od 45 sekundi. i njih gore navedeno vrijeme smanjeno na 30 sekundi“ (Cuculić, 2015: 31).

#### **4.2. KRITERIJI UČINKOVITOSTI SKLADIŠTA ENERGIJE**

Učinkovitost skladišta energije ovisi o različitim čimbenicima i karakteristikama sustava. Ključni čimbenici koji utječu na učinkovitost skladišta energije u prvom se redu u odnose na vrstu skladišta energije te njegovu namjenu. Različite tehnologije skladištenja energije imaju različite učinkovitosti. Svaka tehnologija ima svoje prednosti i nedostatke, te se učinkovitost može razlikovati između baterija, superkondenzatora, toplinskih skladišta, vodikovih spremnika i drugih tehnologija koje se koriste pri skladištenju energije. Učinkovitost će stanovitog skladišta energije ovisiti i o cikličkoj učinkovitosti istog. Radi se o omjeru energije koju je moguće dobiti tijekom pražnjenja u odnosu na energiju potrebnu za punjenje. Niži gubici tijekom cikličkog punjenja i pražnjenja doprinose većoj cikličkoj učinkovitosti, što predstavlja povoljan indikator pri određivanju kriterija učinkovitosti skladišta električne energije. Brzina punjenja i pražnjenja stanovitog skladišta energije može znatno utjecati na ukupnu učinkovitost. Brže punjenje i pražnjenje obično dovode do većih gubitaka energije. U ovom je smislu važno je istaknuti da svi skladišni energetske sustavi računaju s određenim gubicima tijekom procesa punjenja i pražnjenja. Ovi gubici mogu uključivati konverzijske gubitke (pretvaranje energije između različitih oblika), otpore unutar komponenti i izgubljenu energiju u obliku topline. Što su gubici energije manji, to je situacija u kontekstu kriterija ugradnje skladišta energije povoljnija, a ona se uvijek uspoređuje s brzinom punjenja i pražnjenja skladišta energije.

Sve se ove indikacijske varijable, kako tehničke, tako i one koje primarno određuju učinkovitost, međusobno povezuju te je nemoguće odvojiti jednu od druge, stoga se sve smatraju kriterijima učinkovitosti ugradnje. One određuju ukupnu funkcionalnost skladišta energije ovisno o njegovoj svrsi, stoga je planski pristup ugradnji skladišta energije neizostavan faktor pri njihovoj ugradnji jer do stanovitih kompromisa uvijek i nužno mora doći. Pri odabiru i projektiranju skladišta energije zato je važno pažljivo razmotriti sve ove faktore kako bi se postigla najbolja ravnoteža između učinkovitosti, performansi i ekonomske održivosti skladišta energije i njegove namjene kao i njegovog ekološkog otiska u standardizacijskom smislu.

## 5. PRIMJENA SKLADIŠTA ENERGIJE NA BRODOVIMA

Brod kao takav predstavlja jedinstven sustav. On je opremljen svim onim tehnologijama koje mu omogućuju ne samo nesmetanu plovidbu na zadanoj mu ruti, već i svim sustavima konstruiranim za podršku pri plovidbi, a u slučaju nepredviđenih situacija. Brod je u pravilu takoreći „prepušten sam sebi“ i vlastitim auto-generacijskim modelima odnosno sustavima koji omogućuju i održavanje njegovi nesmetanu plovidbu, ali i druge funkcije za koje je specijaliziran, ovisno o njegovoj namjeni. Skladišta energije koja su prisutna na stanovitom brodu, prema tome, prvenstveno odgovaraju njegovoj veličini i namjeni. To su ključne tehnologije koje se u pomorstvu neprestano razvijaju kako bi nastavili optimizirati funkciju specifičnih brodova, ali i njihovu vezu s njegovim performativnim (komercijalnim), ali i ekološkim standardima i imperativima<sup>8</sup>. Osim baterijskih skladišta energije, na brodovima se javljaju i zamašnjaci, superkondenzatori, ali sve više i alternativni, ekološki napredni oblici skladištenja.

Zbog ovih je činjenica primjena skladišta energije na brodovima vrlo bitna te ih određuje u kontekstu sveukupne kvalitete brodskih sustava. U ovom će se poglavlju razmotriti proizvodnja i skladištenje, ali i upotreba energije u brodskim sustavima, s mogućim naglaskom na velike preookeanske brodove, a s obzirom na činjenicu da se radi o brodovima koji se nose s nekim od najzahtjevnijih pomorskih zadataka i operacija u suvremeno doba, kako komercijalno, tako i ekološki, ali i digitalno, operativno itd.

### 5.1. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA BRODOVIMA

Skladišta energije igraju ključnu ulogu u upravljanju energijom na brodovima. Ona pomažu u izjednačavanju opterećenja na električnoj mreži, smanjujući pritom potrebnu snagu od konvencionalnih izvora energije. Također omogućavaju brzu dostupnost energije tijekom skokova u potrošnji (Žic, 2019). Električne centrale mjesta su na kojima se na velikim brodovima proizvodi električna energija. One sadrže pojedinačne agregate koji osiguravaju

---

<sup>8</sup> Brod predstavlja i jedinstven sustav zbog činjenice njegova kretanja tj. zbog nužnosti da se tehnologije koje se na njemu koriste podudaraju sa standardima svih zemalja u kojima pristaje, ali i kroz koje plovi. Ovaj zahtjevan zadatak omogućuje suvremenim brodovima visoku stopu tehnologizacije pa se u stanovitom smislu može reći da su preookeanski brodovi prva mjesta za implementaciju novih, superiornih tehnologija, a kada je u pitanju ne samo skladištenje energije, već i razni drugi sustavi poput AIS-a i sl. *op aut.*

skladištenje proizvedene energije. Jedan se dio proizvedene energije, onaj manji, skladišti u akumulatorskim baterijama, a u tu se svrhu veliki brodovi povezuju i s obalnim instancama koje osiguravaju skladištenje dijela proizvedene energije. Kada je riječ o veličini brodskih centrala i agregata za pohranu energije, važno je razmišljati o dimenzijama istih, a one su u pravilu razmjerne dimenzijama broda. „Dimenzioniranje izvora električne energije na brodu određuje se bilancom električne energije. Potrebna instalirana snaga izvora računa se uzimajući u obzir različita pogonska stanja broda: plovidbu, manevriranje, prekrcaj tereta u luci, mirovanje u luci itd.“ (Ordulj, 2019: 12). Osim navedenih logističkih parametara, kada se određuje veličina brodskog spremnika odnosno brodske energetske centrale, mora se u obzir uzeti u obzir i brodska plovidba tj. ruta ili vrsta plovidbe za koju je brod konstruiran. Kod prekoceanskih brodova u obzir će se tako uzeti velik broj parametara u svrhu plovidbe kao što je specifičan upravni (prostor) kroz koji se brod ima kretati, hladne i tople morske ili oceanske zone, količina dnevne i noćne plovidbe te razne izvanredne situacije koje mogu uvjetovati plovidbu. Kod izvanrednih nepovoljnih okolnosti, koriste se pomoćni generatori broda koji su dizajnirani upravo za sigurnosne potrebe. Kada se računa potrebna električna energija na brodu, koriste se tehnički i iskustveni podaci. To uključuje instaliranu snagu potrošača, faktore istodobnosti, moguću vršnu potrošnju i drugo. Sve ovo se računa uzimajući u obzir dopušteni pad napona i gubitke unutar brodske električne mreže (prema: Ordulj, 2019: 12).

U modernijim brodovima, trofazni izvori električne energije gotovo su u potpunosti zamijenili istosmjerne izvore. Zbog razvoja novih konstrukcija sinkronih generatora s brzom regulacijom napona, na brodovima se često koriste jednostavni indukcijski motori velikih dimenzija za pokretanje mnogobrojnih i raznolikih mehanizama. Istosmjerni izvori električne energije, nekad temeljni izvor električne energije na brodovima, u novije se vrijeme koriste samo na manjim ribarskim plovilima, plovnim dizalicama i drugim manjim odnosno manje zahtjevnim plovilima koji koriste istosmjerni izvor za propulziju.

### ***5.1.1. UGRADNJA BRODSKIH SKLADIŠTA ENERGIJE***

Proces ugradnje skladišta energije na brod uključuje detaljno planiranje i projektiranje ugradnje skladišta energije pri čemu je najvažnija odrednica vrsta skladišta energije. Ovdje se odabiru optimalne tehnologije skladišta, dimenzioniranje sustava prema energetske potrebama broda i određivanje najprikladnijeg mjesta za smještaj skladišta (npr. spremnici za



gorivo, baterijski spremnici ili drugi uređaji). Nakon što su definirane specifikacije i zahtjevi za skladištem energije nabavlja se odgovarajuća oprema; to uključuje kupnju baterija, goriva, generatora, elektromotora, uređaja za punjenje, sustava za upravljanje i nadzor te drugih komponenata potrebnih za skladištenje i distribuciju energije. Iza faze nabave slijedi faza same instalacije. Ovisno o vrsti skladišta i broda, ovo može uključivati postavljanje spremnika, ugradnju baterijskih banki, povezivanje električnih i mehaničkih komponenata i postavljanje sustava za punjenje i pražnjenje (prema Komarnicki, Lombardi i Styczynski, 2017; Bruder Müller, Sobotka i Waughray, 2019; Žic, 2019) . Nakon instalacije, sve komponente skladišta energije moraju biti integrirane u brodski energetska sustav, što je esencijalna procedura pri ugradnji skladišta energije u brod zato što uključuje povezivanje skladišta s brodskim elektromotorima, generatorima, inverterima i drugim relevantnim dijelovima sustava. Važno je provesti temeljita ispitivanja kako bi se ustanovilo da skladište energije ispravno funkcionira i da je kompatibilno s ostalim sustavima na brodu. Ovi testovi uključuju ispitivanje performansi, sigurnosti i stabilnosti skladišta energije.

Nakon što je skladište energije ugrađeno i testirano, važno je redovito održavanje kako bi se osigurala pouzdanost i dugovječnost sustava, a to podrazumijeva praćenje stanja baterija, redovito servisiranje komponenata i provođenje preventivnih mjera održavanja. U ovom je smislu izrazito bitno i da je osoblje na brodu prošlo obuku za pravilno rukovanje i održavanje skladišta energije. Obuka pokriva teme kao što su sigurno rukovanje baterijama, sigurno upravljanje sustavom za punjenje i pražnjenje te pravodobno uočavanje i rješavanje potencijalnih problema. U nekim slučajevima, ovisno o vrsti i veličini broda te vrsti skladišta energije, može biti potrebno ishođenje certifikata ili odobrenja od strane relevantnih pomorskih agencija i regulatornih tijela kako bi se osigurala usklađenost sa sigurnosnim standardima i propisima stoga kada se govori o ugradnji skladišta energije u brod, govori se o procesu koji može biti izuzetno složen, ali koji uvijek zahtijeva pažljivo planiranje (Bruder Müller, Sobotka i Waughray, 2019; Žic, 2019), tehničku stručnost i suradnju različitih stručnjaka. Pritom se mora voditi računa o sigurnosnim aspektima kako bi se osigurala sigurnost posade, broda i okoliša tijekom cijelog procesa ugradnje, ali i korištenja skladišta energije.

### **5.1.2 PUNJENJE BRODSKIH SKLADIŠTA ENERGIJE**

Brodski skladišta energije pune ovisno o vrsti ugrađene energijske tehnologije. Električne baterije na brodu pune se putem punjača koji su obično povezani s električnim mrežama na kopnu ili putem brodskih generatora (prema Nulleshi, 2023). U nekim slučajevima, brodovi koriste obnovljive izvore energije kao što su solarni kolektori ili vjetroagregati za punjenje baterija tijekom plovidbe. Brodovi koji koriste gorive stanice na vodik pune se vodikom koji se obično skladišti u posebnim spremnicima pod visokim tlakom. Vodik se unosi u gorive stanice, gdje se kombinira s kisikom iz zraka da bi se proizvela električna energija. Punjenje vodikom može se obavljati na obali ili putem mobilnih spremnika vodika. Superkondenzatori se brzo pune i prazne. Punjenje se obično odvija putem električnog izvora, a vrijeme punjenja može biti vrlo kratko, što je pogodno za brze cikluse punjenja i pražnjenja. Pneumatska skladišta energije pune se komprimiranim zrakom. Zrak se komprimira i skladišti u spremnicima kada je dostupna višak energije, a zatim se koristi za proizvodnju energije kroz pneumatski sustav kad je potrebno. U bilo kojem od ovih, ali i drugih slučajeva (kao što je konvencionalno gorivo) postupak punjenja brodskih skladišta energije zahtijeva precizne sustave i kontrolu kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost punjenja. Pravilno punjenje znači pouzdanu opskrbu energijom na brodu i prema tome njegovu operativnu sposobnost.

### **5.1.3 VAŽNOST BRODSKIH SKLADIŠTA ENERGIJE**

Brodski skladišta energije važna su u pomorskom sektoru kako kao tehnologija, tako i kao ulaganje u budućnost. Korištenje obnovljivih izvora energije i tehnologija skladišta energije na brodovima pomaže u smanjenju emisija štetnih plinova i doprinosi čistijem okolišu. To je posebno važno u kontekstu rastućih zabrinutosti zbog klimatskih promjena i potrebe za očuvanjem morskih ekosustava. Jedan je od dobrih primjera trajekt „Ro-Pax“ urugvajskog vlasnika *Buquebus*. Planira se da jednom kad se dovrši „će imati ukupni kapacitet od 2100 putnika, ne računajući posadu te dovoljno prostora za 225 automobila. Osim toga, ponudit će i opciju duty-free shopa na više od 2000 četvornih metara [...]Ro-Pax imat će ukupnu dužinu od 130 metara. Također je poznato da će imati ogromnu bateriju od 40 MWh, koja je najveća u jednom plovilu“ (Andrić, 2023).



**Slika 13.** Trajekt *Ro-Pax* urugvajske tvrtke *Buquebus*

*Izvor: Andrić, 2023.*

Brodsko skladišta energije mogu pomoći u smanjenju operativnih troškova brodova. Električni brodovi s baterijama mogu smanjiti troškove goriva i održavanja motora, čime povećavaju ekonomske koristi za vlasnike i operatore brodova. Neki od poznatih hibridnih brodova jesu i *Pioneerov* P&O s kapacitetom baterije od 8,8 MWh, a Saint-Malo tvrtke *Brittany Ferries* imat će kapacitet skladištenja energije od oko 11,5 MWh (Andrić, 2023). Skladišta energije omogućuju brže i preciznije upravljanje energijom na brodu. To može poboljšati brzinu reakcije i manevarskih sposobnosti broda, što je važno za sigurnu plovidbu i usklađenost s pomorskim pravilima. Električni brodovi kao što je „Ro-Pax“ opremljeni skladištima energije često imaju tiše i manje vibrirajuće pogonske sustave u usporedbi s tradicionalnim brodovima s unutarnjim sagorijevanjem. To može poboljšati udobnost posade i putnika te smanjiti negativan utjecaj na okoliš i životinjski svijet u morima, još jedna vrlo velika beneficija. Skladišta energije mogu produžiti autonomiju brodova i povećati vrijeme na moru. Uopće, brodska skladišta energije omogućuju brodovima da koriste različite izvore energije, uključujući obnovljive izvore poput sunčeve i vjetroenergije. To povećava energetske neovisnost brodova i smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima.



**Slika 14.** Napajanje *Ro-Paxa* bit će isključivo preko baterija

Izvor: Andrić, 2023.

Baterije za napajanje *Ro-Paxa* punit će se s obale (Andrić, 2023). „Pokretati brod golemih dimenzija nije lak zadatak. Zahtjevi rastu ako odbacite dizelske motore i odlučite se isključivo za električnu energiju“ (*Ibid*). To je stoga što brodska skladišta energije imaju važnu strukturalnu ulogu u tranziciji prema održivijem i ekološki prihvatljivijem pomorskom transportu; ona pomažu u smanjenju ekološkog otiska brodova, povećavaju ekonomsku i operativnu učinkovitost te pridonose sigurnijoj i održivijoj budućnosti za pomorski sektor uopće. Ekološki je aspekt u suvremenim tehnološki naprednim društvima nemoguće zanemariti kao apsolutan impreativ kada je u pitanju odgovornost čovjeka spram planete Zemlje. To znači da je smanjenje ekološkog otiska već vidljivo u nacionalnim standardima, ali i onim međunarodnim u institucionalnom smislu.

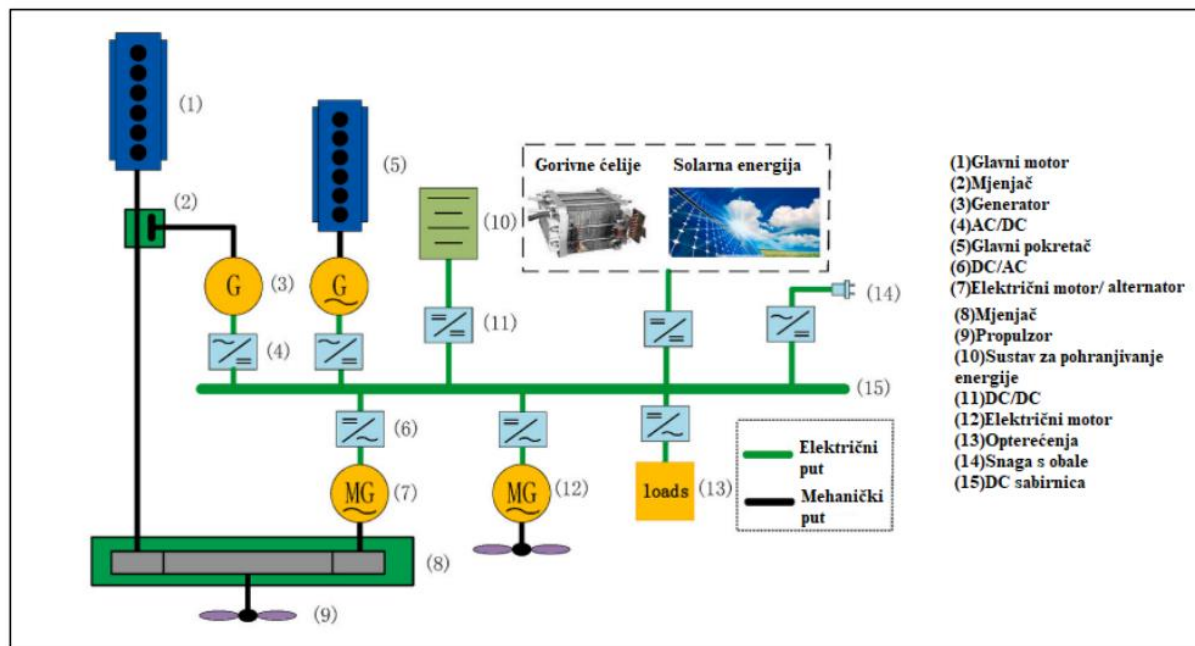
U budućnosti će zasigurno biti govora o brodskim skladištima energije to poglavito u kontekstu inovacija jer su razvoj i primjena brodskih skladišta energije koji potiču inovacije u tehnologiji, brodogradnji i energetske sektoru. To može stvoriti nove poslovne prilike i potaknuti razvoj održivih rješenja u pomorskom sektoru. Uporaba obnovljivih izvora energije i skladišta energije, poput baterija ili gorivnih ćelija na vodik, omogućuje brodovima da smanje ili potpuno eliminiraju emisije ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) tijekom plovidbe, a to je jedno od rješenja za postizanje ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova i borbu protiv klimatskih promjena. Brodska skladišta energije također mogu značajno smanjiti emisije štetnih plinova,

poput dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) i čestica izgaranja, što ima pozitivan utjecaj na kvalitetu zraka u okolini luka i obalnih područja. Električni brodovi s baterijama ili elektromotorima obično proizvode manje buke i vibracija u usporedbi s tradicionalnim brodovima s unutarnjim sagorijevanjem. Ovo je posebno važno za očuvanje morskog ekosustava i udobnost putnika i posade. Integracija skladišta energije s obnovljivim izvorima energije, kao što su solarni kolektori i vjetroagregati, potiče kulturu obnovljive energije u pomorskom sektoru. Skladišta energije omogućuju bolje upravljanje energijom na brodu, što može rezultirati većom energetsom učinkovitošću i smanjenjem gubitaka energije tijekom plovidbe. Brodska skladišta energije povećavaju autonomiju brodova i njihovu fleksibilnost u odabiru rute i vremena punjenja.

Sve pozitivne i tehnološki napredne promjene (kada su u pitanju brodska skladišta energije) pomažu u transformaciji pomorskog sektora prema održivijem modelu plovidbe, smanjujući negativan utjecaj na okoliš i promičući ekološki prihvatljive alternative tradicionalnim brodovima s unutarnjim sagorijevanjem. Time se pomorski sektor usmjerava prema budućnosti koja je ekološki odgovorna i održiva.

## **5.2. BRODOVI NA HIBRIDNI POGON I ALTERNATIVNA RJEŠENJA**

Skladišta energije se često koriste u hibridnim pogonima brodova, gdje zajedno s konvencionalnim dizelskim ili plinskim motorima omogućavaju bolju kontrolu potrošnje goriva i smanjenje emisija. Baterije ili superkondenzatori pohranjuju višak energije tijekom manjeg opterećenja, a zatim je isporučuju kad je potrebna veća snaga, kao što je ubrzanje ili pokretanje broda. Osim baterijskih skladišta i superkondenzatora, u posljednje se vrijeme kao sekundarni oblik pohrane energije na brodovima koriste solarni paneli i vjetroelektrane kako bi se proizvela energija iz obnovljivih izvora. Skladišta energije, kao što su ona baterijska, omogućuju pohranu viška energije koja se može koristiti kad nema dovoljno sunčeve ili vjetrovite energije.



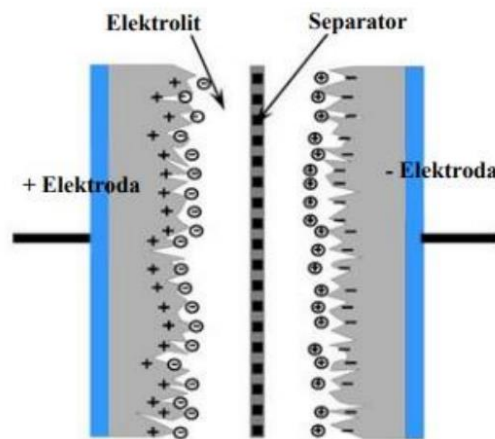
**Slika 15.** Shema hibridnog serijski-paralelnog elektroenergetskog sustava

*Izvor: Nulleshi, 2023: 24.*

Zamašnjaci su još jedan oblik skladištenja energije na brodu. Klasificiraju prema brzini rotacije, a mogu se podijeliti na spore i brze varijante. To su mehanički uređaji koji rotirajući se koriste kinetičku energiju generiranu rotacijom rotora za pohranu energije. Svi dijelovi su smješteni unutar čvrstog metalnog kućišta radi sigurnosti. Tijekom punjenja, elektromotor ubrzava rotaciju, dok tijekom pražnjenja isti elektromotor djeluje kao generator i pretvara kinetičku energiju natrag u električnu. Kapacitet zamašnjaka ovisi o njegovoj veličini i brzini rotacije rotora. U idealnim okolnostima, zamašnjak bi trebao imati što manju masu i gustoću, ali istovremeno biti izuzetno čvrst. Ove karakteristike često se postižu upotrebom kompozitnih materijala poput karbonskih vlakana i polimernih materijala. Osim čvrstoće, važno je napomenuti da ako dođe do oštećenja rotora, metalni rotor će se razbiti na više komada, dok će se kompozitni rotor raspasti na manje mekana vlakna (prema Curić, 2023). „Spori zamašnjaci koriste čelik i ostale metalne legure i omogućavaju brzinu okretaja do 10000 RPM, čime ukupni gubici iznose ~0.5%-1%. S druge strane, brzi zamašnjaci dostižu brzine do 100000 RPM, čime ukupni gubici iznose ~0.1% ukupne snage. Ovaj tip zamašnjaka koristi već spomenute kompozitne materijale. Cjenovno, brzi zamašnjaci koštaju oko pet puta više od

sporih zamašnjaka. Iako su spori zamašnjaci jeftiniji i zahtijevaju manje održavanja, brzi zamašnjaci mogu skladištiti više energije, te imaju manju masu i gubitke“ (Curić, 2023: 35).

Superkondenzatori predstavljaju vrstu uređaja za pohranu energije koji se sastoje od dvije metalne elektrode obložene višeslojnim slojevima ugljičnih nanovlakana, stvarajući strukturu sličnu spužvi s nanostrukturnim porama (Slika 13). Između elektroda smješteni su elektrolit i separator. Zbog velike površine elektroda, superkondenzatori su sposobni skladištiti znatno više energije u usporedbi s klasičnim kondenzatorima. Napon koji se može postići na superkondenzatorima ovisi o vrsti elektrolita koji se koristi. Upotrebom organskog elektrolita, najčešće acetonitrila ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ), moguće je postići nazivne napone do 3V, dok je upotreba tekućeg elektrolita, najčešće otopina sumporne kiseline ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), ograničena na nazivni napon od 1V. Iako gustoća energije superkondenzatora nadmašuje klasične kondenzatore, značajno je niža u usporedbi s baterijama ili gorivnim stanicama (prema Curić, 2023: 36).



**Slika 16.** Pojednostavljena struktura superkondenzatora

*Izvor: Curić, 2023: 36.*

„Primjena skladišta energije u brodskim elektroenergetskim sustavima predmet je dugogodišnjeg ispitivanja na brodovima američke ratne mornarice vezanog za amortiziranje impulsnih opterećenja elektroenergetskog sustava kao posljedica primjene novih vrsta oružja. U kontekstu primjene na civilnim plovnim objektima skladišta energije se u znanstvenoj i stručnoj periodici tek počinju sporadično spominjati. Zbog njihovog sve bržeg tehnološkog razvoja, rasta cijene goriva i sve

strožih ekoloških propisa, skladišta energije ipak svakim danom postaju sve interesantnija za primjenu na brodovima s dinamičkim 3 pozicioniranjem s ciljem povećanja raspoloživosti i iskoristivosti električne centrale. Pored skladištenja energije, kao njihove osnovne namjene, zahvaljujući širinskoimpulsno-moduliranim (ŠIM) pretvaračima, preko kojih se spajaju na brodsku izmjeničnu električnu mrežu, skladišta energije mogla bi služiti i za kompenzaciju jalove snage i povećanje kvalitete električne energije te tako još više povećati efikasnost broskog elektroenergetskog sustava“ (Cuculić, 2015: 2-3).

### **5.3. EKOLOŠKI STANDARDI – ODRŽIVA POTROŠNJA**

Smanjenje ekološkog utjecaja plovidbe uvijek je inicijativa za sve pohvale, osobito kad se radi o velikim preookeanskim brodovima koji predstavljaju jednu od najnametljivijih intervencija čovjeka u raznolik krajolik. Čovjek je štetna, nametljiva vrsta, a ovaj oblik tj. dio svoje prirode on ubrzano raspoznaje posljednjih nekoliko desetaka godina, uslijed velikih klimatskih promjena, mahom katastrofalnih za velike ljudske zajednice. „Više od 80% svjetske trgovine se odvija morskim putem. Pomorska je industrija odigrala ključnu ulogu u oblikovanju trenutnog globalnog gospodarstva. Procjenjuje se da će, ako se nastavi trend rasta pomorskog gospodarstva kao posljednjih 150 godina, gotovo 23 milijarde tona tereta biti prevezeno brodom do 2060. godine, u usporedbi s 8,5 milijardi tona u 2010. godini“ (Stjepović, 2021: 15).

U smislu ekologije, brodska skladišta energije zapravo imaju važno mjesto kada je u pitanju utjecaj (globalne, svakodnevne i neprestane) pomorske kulture na okoliš tj. svjetski ekosustav. S obzirom na činjenicu da je jedan od glavnih ekoloških ciljeva u pomorskom sektoru smanjenje emisija stakleničkih plinova, korištenje ekološki prihvatljivih skladišta energije (kao što su baterije) može smanjiti emisije CO<sub>2</sub>, dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) i drugih štetnih plinova. Ovo je vrlo važno za usklađivanje s regulativama o emisijama u pomorskom sektoru, a s obzirom da se radi o jednom od najvećih i uvijek rastućih gospodarskih sektora na globalnoj razini.

Osim smanjenja emisija CO<sub>2</sub>, skladišta energije omogućuju bolju integraciju obnovljivih izvora energije, poput vjetra i solarnih panela, u brodske sustave, a što doprinosi smanjenju potrebe za fosilnim gorivima i smanjenju negativnih utjecaja na okoliš. Također, korištenje električnih pogonskih sustava koji se napajaju iz skladišta energije može smanjiti buku iz



brodskih motora. To ima pozitivan utjecaj na morski život, posebno na osjetljive vrste koje reagiraju na buku. Skladišta energije omogućuju bolje upravljanje energijom na brodu, uključujući pametno upravljanje potrošnjom energije i optimizaciju rada sustava. To doprinosi povećanju energetske učinkovitosti i smanjenju gubitaka energije.

Ekološki aspekti također uključuju pitanja vezana uz recikliranje i odlaganje baterija i drugih komponenata skladišta energije nakon njihovog životnog vijeka. Važno je razviti održive metode za recikliranje i sigurno odlaganje kako bi se smanjio negativni utjecaj na okoliš, a metode odlaganja odnosno zbrinjavanja otpada koji nastaje uslijed pomorskih aktivnosti strogo je propisana norma tj. svaka zemlja ima svoje zasebne propise, a koji se temelje na međunarodnim, sve strožim standardima kada je u pitanju očuvanje podmorja i podmorskih ekosustava.

Jedna od mogućnosti skladišta energije na brodovima, a u ekološkom kontekstu jest činjenica da baterijska skladišta energije mogu smanjiti potrebu za korištenjem generiranja energije iz spaljivanja goriva, što može smanjiti onečišćenje vodnih ekosustava na kojima brodovi operiraju. Stoga, korištenje ekološki prihvatljivih brodskih skladišta energije ima potencijal značajno doprinijeti očuvanju okoliša i smanjenju ekološkog otiska pomorskog sektora.

Električni pogon s upotrebom skladišta energije može smanjiti buku i vibracije na brodu u usporedbi s tradicionalnim dizelskim motorima, što može poboljšati putničku udobnost i smanjiti nepovoljan utjecaj na okoliš. Osim toga, korištenje skladišta energije omogućava brodovima da smanje emisije stakleničkih plinova i druge onečišćivače, što je posebno važno u područjima gdje postoje strogi propisi o emisijama (Ančić. 2016).

## 6. SPAJANJE SKLADIŠTA ENERGIJE NA BRODSKU MREŽU

„Jedno od rješenja kojim se može postići poboljšanje pouzdanosti i efikasnosti elektroenergetskog sustava, redundancija napajanja u slučaju nužde, te smanjenje potrebnog broja generatora na mreži je primjena skladišta energije [...]. Dizelski generatori mogu proizvesti više energije od trenutnih potreba i taj višak uskladištiti u odgovarajućim skladištima energije, te ga kasnije koristiti kada se za to ukaže potreba“ (Cuculić, 2015: 8). Skladište je energije neizostavan dio plovila, a spajanje se skladišta na brodsku mrežu, koje se u struci naziva integracijom, može vršiti ovisno o vrsti skladišta energije i potrebama broda. Neke od najuobičajenijih metoda uključuju korištenje pretvarača energije (tzv. *invertera*), korištenje BMS-a (eng. *Battery Management/Monitoring System*), razmatranju faze (jednofazni ili trofazni sustav) i frekvenciju (obično 50 Hz ili 60 Hz) koja se koristi na brodu. Skladište energije i pretvarač moraju biti usklađeni s ovim karakteristikama kako bi se omogućila ispravna integracija. Osim fizičkog povezivanja, skladišta energije na brodskoj mreži često se integriraju putem sofisticiranih sustava za upravljanje i kontrolu (BMS). Ovi sustavi omogućuju praćenje i upravljanje tijekom punjenja, pražnjenja i održavanja skladišta energije, a također pomažu u ravnoteži mreže i optimizaciji potrošnje energije na brodu.

Važno je istaknuti da sigurnosni sustavi, koji su nositelji temeljne uloge kod procesa ugradnje brodskih skladišta energije, uključuju mjere zaštite od kratkih spojeva, prenapona i drugih potencijalno opasnih situacija koje se mogu pojaviti tijekom rada.

Nakon što je skladište energije integrirano u brodsku mrežu, redovito održavanje i nadzor su predstojeće obveze od najvećeg značaja (prema Žic, 2019). To uključuje praćenje stanja baterija, izvršavanje potrebnih testova i zamjenu komponenata prema potrebi kako bi se osiguralo pouzdano i sigurno funkcioniranje skladišta energije. S obzirom na specifične tehničke karakteristike brodova i skladišta energije, integracija može varirati, a inženjeri i tehničari odgovorni za električni sustav broda trebali bi pažljivo planirati i izvesti proces integracije kako bi se osigurala sigurna i učinkovita operacija.

## 6.1. PRETVARAČI ENERGIJE

Većina skladišta energije, kao što su baterije isporučuju električnu energiju u obliku niskonaponske istosmjerne (DC) struje. Brodska mreža, s druge strane, obično koristi izmjeničnu (AC) struju. Zbog ovog se razloga koristi *inverter* ili pretvarač koji pretvara DC električnu energiju iz skladišta u AC električnu energiju koja je kompatibilna s brodskom mrežom. Radi se o uobičajenom načinu kako se skladišta energije integriraju u električni sustav broda.

Postoji nekoliko vrsta brodskih pretvarača energije, a izbor odgovarajuće vrste ovisi o specifičnim potrebama i karakteristikama broda. DC-AC inverteri pretvaraju istosmjernu (DC) električnu energiju u izmjeničnu (AC) električnu energiju. Koriste se za napajanje električnih uređaja kao što su rasvjeta, električni motori, uređaji za klimatizaciju i dr. AC-DC pretvarači (*rectifieri*) obavljaju obrnuto od DC-AC pretvarača. Koriste se za punjenje baterija i napajanje DC uređaja na brodu. AC-AC (frekvencijski) pretvarači uređaji su koji omogućuju promjenu frekvencije izmjenične struje. Ovo može biti korisno kada je potrebno prilagoditi frekvenciju izmjenične struje koja dolazi iz vanjske mreže ili generirati različite frekvencije za različite sustave na brodu. DC-DC pretvarači omogućuju konverziju jednog naponskog nivoa istosmjernog napona u drugi. Koriste se za prilagodbu napona između različitih dijelova brodskog sustava kako bi se osigurala kompatibilnost i optimalna učinkovitost.

Neki brodski pretvarači energije mogu obavljati više funkcija istovremeno ili u različitim načinima rada (npr. stnoviti DC-AC pretvarači mogu funkcionirati i kao AC-DC pretvarači za punjenje baterija). Skladišta energije, kao što su baterije ili superkondenzatori, također obavljaju funkciju pretvaranja energije. Pohranjuju električnu energiju u obliku istosmjerne struje i mogu je ponovno isporučiti kao izmjeničnu struju kroz pretvarač kada je potrebno. Izbor odgovarajuće vrste brodskog pretvarača energije ovisi o potrebama broda, njegovim električnim sustavima i specifičnostima primjene. Pretvarači su važna komponenta u brodskim električnim sustavima jer omogućuju prilagodbu, kontrolu i distribuciju električne energije kako bi se osiguralo njihovo učinkovito i sigurno djelovanje odnosno optimalna uporaba (prema Chai et al., 2018).

## 6.2. BMS SUSTAVI

BMS sustavi elektronički su sustavi koji se koriste za upravljanje, nadzor i kontrolu baterija u različitim aplikacijama uključujući električna vozila, solarne sustave, električne brodove, industrijske postrojenja i druge sustave skladištenja energije. Radi se o važnom sustavu za siguran i učinkovit rad baterija i to takvom koji može obavljati niz funkcija. BMS sustav prati i upravlja svakim pojedinim članom baterijskog skupa kako bi osigurao ravnotežu napona između njih. Neke su od pozitivnih indikacija ovog rada sprječavanje prenaprezanja ili podnaprezanje pojedinih stanica baterije, što bi moglo skratiti njihov vijek trajanja i uzrokovati opasne situacije. BMS prati i performanse baterija uključujući kapacitet, napon, struju punjenja i pražnjenja, temperature i druge parametre. To omogućava bolje razumijevanje kako se baterije ponašaju tijekom vremena i identificira potencijalne probleme. BMS sustav automatski isključuje bateriju ili ograničava njezinu izlaznu snagu ako se otkrije preopterećenje ili prekomjerno pražnjenje, čime se sprečavaju oštećenja ili potencijalno opasne situacije, a može generirati upozorenja i obavijesti korisnika ili intervencioniste o problemima s baterijama. Također omogućava dijagnostiku kako bi se brže otkrili i otklonili eventualni problemi. BMS može kontrolirati način punjenja i pražnjenja baterija kako bi se poboljšala njihova učinkovitost i produljio vijek trajanja, a važan je i pri osiguravanju sigurnosti baterija (Balasingam et al., 2020; Echandia, 2022). Potonje uključuje zaštitu od pregrijavanja, prenapona, prenaprezanja i drugih opasnih situacija koje bi mogle dovesti do požara ili eksplozija. Mjesta osobito ovisna o kvalitetnim BMS sustavima jesu električna vozila, kod kojih su presudni u očuvanju performansi i sigurnosti baterija. BMS sustavi tj. sustavi baterijskog nadzora i upravljanja neophodni su i u mnogim drugim sustavima skladištenja energije jer doprinose njihovom optimalnom funkcioniranju i očuvanju sigurnosti tijekom stanovitog vijeka trajanja.

## 7. ZAKLJUČAK

Skladištenje energije uvijek je bilo posebna zanimacija čovjeka. Moderna društva tako raspolažu s izobiljem opcija i njihovih konfiguracija, ali su ona istovremeno obvezana raditi po pravilima brojnih institucija i nositi se sa ekološkim i administrativno-pravnim problemima s kojima se nijedna dosadašnja generacija nije morala nositi. U ovom su smislu brodska skladišta energije posebno zanimljiva jer im je, među brojnim tehničkim zahtjevima, važno uskladiti i sve eventualne razlike u zakonskom međunarodnom smislu. Pa, iako je većina ovih i ovakvih procedura standardizirana, ono što drži brodska skladišta energije zanimljivima jest njihova odlična ekološka tj. održivo-orjentirana upotreba.

Kada se govori o brodskim skladištima energije, tada se u prvom redu govori o baterijskim skladištima energije. Brodski baterijski sustavi za skladištenje energije važni su za poboljšanja na području održivosti čitavog pomorskog sektora. Odabir odgovarajuće vrste broskog baterijskog skladišta energije ovisi o brojnim faktorima, uključujući veličinu broda, tip plovidbe, energetske potrebe i ekološke ciljeve. Važno je pravilno planirati i dimenzionirati sustav kako bi se postigla maksimalna energetska učinkovitost i održivost.

Postoji nekoliko osnovnih vrsta brodskih (baterijskih) skladišta energije. Litij-ionske baterije su popularne zbog visoke gustoće energije, brzog punjenja i dugog vijeka trajanja. Imaju široku primjenu u električnim brodovima i hibridnim plovilima te pružaju visoku energetska učinkovitost. Nikl-metal hibridne baterije su stabilne i ekološki prihvatljive, ali imaju nešto manju gustoću energije od Li-ion baterija. Koriste se u manjim brodovima i električnim alatima. Olovno-kiselinske baterije su ekonomične, ali imaju nižu gustoću energije od drugih vrsta. Često se koriste u manjim plovilima, poput čamaca i jedrilica, te za pokretanje pomoćnih sustava na većim brodovima. Litij-polimerske baterije su slične Li-ion baterijama, ali imaju fleksibilniju formu. Koriste se u manjim plovilima, dronovima i podvodnim bespilotnim vozilima. Natrij-ionske baterije su u razvoju i nude potencijal za niže troškove i veću dostupnost od Li-ion baterija. Trenutačno se primjenjuju u nekim manjim brodovima i eksperimentalnim projektima. Natrij-sulfidne baterije su pogodne za skladištenje velikih količina energije, posebno u stacionarnim brodskim sustavima. Imaju visoku temperaturnu stabilnost i kapacitet za duboko pražnjenje.

Superkondenzatori imaju visoku gustoću snage, što omogućuje brzo punjenje i pražnjenje. Koriste se za kratkotrajno skladištenje energije i često su dio hibridnih brodskih sustava. Vodikove gorive stanice koriste vodik kao izvor energije i proizvode električnu energiju i vodu. Iako se ne smatraju baterijama, koriste se kao alternativa za električno napajanje na nekim brodovima, posebno onima koji se bave vodenim gorivim stanicama.

Kada se planira integracija broskog skladišta energije, osnova je procesa tehničko-tehnološka. Tehnički kriteriji i njihova pravilna provedba osiguravaju da baterijski sustav radi pouzdano i konzistentno, smanjujući rizik od neočekivanih prekida u opskrbi energijom. Tehnički ispravno integrirani sustavi skladištenja energije imaju veću energetska učinkovitost tj. da se manje energije gubi tijekom punjenja i pražnjenja baterija i da se maksimalno iskorištava kapacitet skladišta. Kvalitetna instalacija i pravilno upravljanje tehničkim aspektima osiguravaju dulji vijek trajanja baterija. Poboljšana trajnost smanjuje potrebu za čestim zamjenama baterija, što smanjuje troškove i ekološki otisak.

Baterijska skladišta energije često se integriraju s drugim energetska sustavima, kao što su solarni kolektori ili vjetroelektrane. Pravilna integracija omogućava optimalno iskorištavanje obnovljivih izvora energije i poboljšava stabilnost cijelog energetska sustava. Takvi se sustavi mogu lakše prilagoditi promjenama u potrebama i uvjetima tj. mogu se skalirati prema potrebi ili mijenjati parametri za bolje prilagođavanje specifičnim uvjetima rada.

Brodski skladišta energije vrlo su važna pomorskom sektoru kao takvom, osobito kad je u pitanju ekološka održivost. Ona predstavljaju tehnološki korak prema smanjenju emisija štetnih plinova, posebno CO<sub>2</sub> i dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>), što je bitno za sukladnost s regulativama o emisijama u pomorstvu. To ipak nije jedina važnost brodskih skladišta energije – njihovom upotrebom stvara se mogućnost učinkovitijeg iskorištavanja obnovljivih izvora energije, kao što su vjetar i solarni kolektori, što direktno smanjuje potrebu za fosilnim gorivima i njihov negativan utjecaj na okoliš. Smanjenje također predstavlja pozitivnu karakteristiku brodskih skladišta energije jer električni pogonski sustavi napajani iz skladišta energije često generiraju manje buke od tradicionalnih brodskih motora. To koristi morskom životu, posebno osjetljivim vrstama koje su osjetljive na buku. Povećana energetska učinkovitost, omogućena boljim upravljanjem energijom na brodu pridonosi ekološkoj održivosti sektora, smanjujući gubitke energije i optimizirajući rad sustava. Konačno,

recikliranje i odlaganje komponenata skladišta energije nakon njihova vijeka trajanja važan je aspekt ekološkog razmatranja. Razvoj održivih metoda recikliranja i sigurnog odlaganja ključan je kako bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš.

Brodski skladišta energije imaju značajan potencijal za poboljšanje ekološke održivosti pomorskog sektora, smanjenje emisija i negativnog utjecaja na okoliš, ali i istovremeno pružaju mogućnost ostvarivanja tehnoloških inovacija koje će oblikovati budućnost plovidbe prema čistijoj, energetske učinkovitijoj i održivijoj plovidbi. Ovaj potencijal otvara vrata za stvaranje okolišno prihvatljivih brodova koji će smanjiti svoj ekološki otisak, štiteći morski ekosustav, osiguravajući kvalitetu zraka i pridonoseći globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promjena. Brodski baterijski sustavi postaju bitan čimbenik u usmjeravanju pomorskog sektora prema održivoj budućnosti.

## 8. BIBLIOGRAFIJA

- 1) Ančić, I. (2016.) *Energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost brodskih integriranih energetske sustava. Doktorski rad.* Sveučilište u Zagrebu: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- 2) B. M. (17. siječanj 2022.) Olovno-kiselinska baterija. *Be.Manly-battery.com*. Dostupno na: <https://ba.manly-battery.com/info/why-do-lead-acid-batteries-have-to-be-fully-di-66652257.html>, preuzeto 19.07.2023., 17:51h.
- 3) Balasingam, B., Ahmed, M. i Pattipati, K. (2020.) Battery Management Systems – Challenges and Some Solutions. *Energies*, 13 (11), str. 2825. Dostupno na stranici: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2825>, 28.06.2023., 09:09h.
- 4) Boparai, K. S. i Singh, R. (2018.) Electrochemical Energy Storage Using Batteries, Superconductors and Hybrid Technologies. U: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- 5) Brudermüller, M., Sobotka, B. i Waughray, D. (2019.) *A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation*. Ženeva: World Economic Forum.
- 6) Buchmann, I. (22. listopad 2021.) BU-203: Nickel-based Batteries. *Battery University.com*. Dostupno na stranici: [BU-203: Nickel-based Batteries - Battery University](#), 13.07.2023., 20:23h.
- 7) Campbell, M. (2. siječanj 2022.) In Pictures: South America's 'Lithium Fields' Reveal the Dark Side of Our Electric Future. *Euro News Green.com*. Dostupno na stranici: <https://www.euronews.com/green/2022/02/01/south-america-s-lithium-fields-reveal-the-dark-side-of-our-electric-future>, 28.06.2023., 14:44h.
- 8) Chai, M., Bonthapalle, D. R., Sobrayen, L., Panda, S. K., Wu, D. i Chen, X. (2018.) Alternating Current and Direct Current-based Electrical Systems for Marine Vessels with Electric Propulsion Drives. *Applied Energy*, 231, str. 747-756.
- 9) Clean Energy for EU Islands. (2019.) Tranzicijski plan prema čistoj energiji: cresko-lošinjsko otočje. Rijeka *Kvarner.hr*. Dostupno na stranici: [http://www.reakvarner.hr/sites/9192/upload/userfiles/publikacije/1580204180\\_creslostinj\\_finaltransitionagenda\\_20191118\\_plan.pdf](http://www.reakvarner.hr/sites/9192/upload/userfiles/publikacije/1580204180_creslostinj_finaltransitionagenda_20191118_plan.pdf), preuzeto 22.08.2023., 17:56h.



- 10) Cuculić, A. (2015.) *Tehničko-ekonomska analiza primjene skladišta energije u elektroenergetskim sustavima plovnih objekata s dinamičkim pozicioniranjem*. Doktorski rad. Sveučilište u Rijeci: Pomorski fakultet.
- 11) Curać, M. (2023.) *Brodске istosmjerne mikromreže*. Diplomski rad. Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet.
- 12) Čuljak, T. (14. kolovoz 2022.) Kako pojeftiniti skladištenje obnovljive energije? *Nove News.net*. Dostupno na stranici: <https://novenews.net/hr/tehnologija/kako-pojeftiniti-skladistenje-obnovljive-energije-2330>, preuzeto 19.08.2023., 12:12h.
- 13) Daniel, C Li, J. i Wood, D. (2011.) Materials and Processing for Lithium-ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 196 (5), str. 2452-2460.
- 14) Echandia (12. listopad 2022.) What's the Role of the BMS in a Maritime Battery System? *Echandia.se*. Dostupno na stranici: <https://echandia.se/insights/article/battery-management-in-a-maritime-battery-system/>, 27.08.2023., 14:53h.
- 15) Edmondson, J. (25. siječanj 2021.) Hybrid Electric Vehicles: A Stay of Execution for NiMH Batteries IDTechEx.com. Dostupno na stranici: <https://www.idtechex.com/en/research-article/hybrid-electric-vehicles-a-stay-of-execution-for-nimh-batteries/22786>, 12.06.2023., 22:21h.
- 16) Energizer Brands LLC. (2018.) Nickel Metal Hydride (NiMH): Handbook and Application Manual. *Energizer.com*. Dostupno na stranici: [nickelmetalhydride\\_appman.pdf \(energizer.com\)](http://nickelmetalhydride_appman.pdf(energizer.com)), 03.07.2023., 00:12h.
- 17) Europa EU. (2023.) Ugovor o Energetskoj povelji i Protokol uz Energetsku povelju. *Eurlex.europa.eu*. Dostupno na stranici: <https://eur-lex.europa.eu/HR/legal-content/summary/the-energy-charter-treaty-and-protocol.html>, 02.09.2023., 17:43h.
- 18) Marić, I. (2017.) *Zadaće, ingerencije i organizacija regulatora i operatora tržišta energije u Republici Hrvatskoj*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- 19) Komarnicki, P. Lombardi, P. A. i Styczynski, Z. (2017.) *Electric Energy Storage Systems*. Research Gate: eBook.
- 20) N. D. (20. siječanj 2022.) Jadrolinija naručuje putničke brodove na hibridni pogon. *Energetika.net*. Dostupno na stranici: <https://www.energetika-net.com/odrzivi-promet/jadrolinija-narucuje-putnicke-brodove-na-hibridni-pogon-34086>, 19.09.2023., 18:06h.
- 21) Nulleshi, M. (2023.) *Hibridni brodski elektroenergetski sustav*. Završni rad. Sveučilište u Rijeci: Tehnički fakultet. Dostupno na stranici:

[file:///C:/Users/38591/Downloads/monika\\_nulleshi-zavrzni\\_rad.pdf](file:///C:/Users/38591/Downloads/monika_nulleshi-zavrzni_rad.pdf), 20.09.2023., 17:52h.

22)

23) Krivik, P. i Baca, P. (2013.) 'Electrochemical Energy Storage'. U: Zobaa, A. F. (ur.) *Energy storage – Technologies and Applications*. Rijeka: InTech, str. 79-100.

24) Kurzweil, P. (2010.) Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery – The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, 195 (14), str. 4424-4434.

25) Ordulj, J. (2019.) *Proizvodnja električne energije na brodovima. Završni rad*. Sveučilište u Splitu: Pomorski fakultet. Dostupno na stranici: <https://repositorij.pfst.unist.hr/islandora/object/pfst%3A781/datastream/PDF/view>, preuzeto 14.07.2023., 23:22h.

26) Prpić, H. i Ralica, I. (8. rujan 2022.) Tema: Litij-ionske baterije i njihova budućnost? *Strujni krug.hr*. Dostupno na stranici: <https://www.strujnikrug.hr/kakve-su-litij-ionske-baterije-i-koja-je-njihova-buducnost/>, preuzeto 29.06.2023., 18:09h.

27) Radin, J. i Zdenković, J. (2015.) Litij-ionske baterije. *Schrack.hr*. Dostupno na stranici: <https://www.schrack.hr/know-how/fotonapon-pohrana-energije/litij-ionske-baterije>, preuzeto 12.08.2023., 16:34h.

28) Raos, N. (29. svibanj 2021.) Tekuća električna baterija – neograničenog kapaciteta. *Bug.hr*. Dostupno na stranici: <https://www.bug.hr/znanost/tekuca-elektricna-baterija--neogranicenog-kapaciteta-21624>, preuzeto 12.08.2023., 11:39h.

29) Ridden, P. (2020.) S protočnim baterijama pohrana energije iz obnovljivih izvora postaje ekonomski prihvatljiva. *News Atlas*, 51 (2), str. 35.

30) Smrekar, M. (3. veljača 2022.) „Informacijske baterije“: efikasan način skladištenja održive energije. *Bug.hr*. Dostupno na stranici: <https://www.bug.hr/baterije/informacijske-baterije-efikasan-nacin-skladistenja-odrzive-energije-25543>, preuzeto 01.08.2023., 15:59h.

31) Songli Group. (13. svibanj 2022.) TCS Baterija: što je ventilski regulirana olovna baterija? *Songligroup.com*. Dostupno na stranici: <https://www.songligroup.com/hr/news/what-is-valve-regulated-lead-acid-battery/>, preuzeto 02.07.2023., 12:39h.

32) Stjepović, V. (2021.) *Upravljanje zaštitom okoliša u morskom brodarstvu. Diplomski rad*. Sveučilište u Dubrovniku: Pomorski fakultet.

- 33) Šimić, D. (2015.) *Energetski učinkovitia skladišta kao podloga konceptu zelene logistike. Diplomski rad.* Sveučilište u Zagrebu: Fakultet prometnih znanosti.
- 34) Williamson, S., Cassani, P. A, Lukić, S. i Blunier, B. (2011.) 'Energy Storage'. U: Rashid, M. H (ur.) *Power Electronics Handbook, 3rd Edition.* Burlighon: Elsevier, str. 1331-1357.
- 35) Zdenković, J. (2015.) Punjenje, pražnjenje i kontrola baterije. *Schrack Majstor*, 5-6 (15), str. 1-7.
- 36) Žic, B. (2019.) *Primjena baterijskih skladišta energije na brodu. Završni rad.* Sveučilište u Rijeci: Pomorski Fakultet.

## 9. POPIS SLIKA I TABLICA

### 9.1. POPIS SLIKA

- **Slika 1.** Kretanje iona pod opterećenjem (lijevo) i punjenje (desno) ..... str. 7.
- **Slika 2.** Olovno- kiselinska baterija i njezini dijelovi ..... str. 8.
- **Slika 3.** Princip rada i kemijska reakcija olovno-kiselinske baterije .....  
..... str. 10.
- **Slika 4.** Različite vrste litij-ionskih baterija ..... str. 14.
- **Slika 5.** Dijelovi litij-ionske baterije ..... str. 15.
- **Slika 6.** Kemijska reakcija prilikom punjenja i pražnjenja baterije na bazi nikla  
..... str. 20.
- **Slika 7.** Tipične Nikl-Metal-Hibridne (NiMH) baterije u AA kućištu ..... str. 21.
- **Slika 8.** Presjek NaS baterije ..... str. 24.
- **Slika 9.** Kemijska reakcija unutar NaS baterije ..... str. 24.
- **Slika 10.** Kemijska reakcija Vanadij redoks protočne baterije (VRFB) ..... str. 28.
- **Slika 11.** Prikaz djelovanja redoks protočne baterije pri pohrani električne energije iz  
obnovljivih izvora ..... str. 31.
- **Slika 12.** Odnos gustoće energije i specifične snage ..... str. 34.
- **Slika 13.** Trajekt *Ro-Pax* urugvajske tvrtke *Buquebus* ..... str. 43.
- **Slika 14.** Napajanje *Ro-Paxa* bit će isključivo preko baterija ..... str. 44.
- **Slika 15.** Shema hibridnog serijski-paralelnog elektroenergetskog sustava .... str. 46.
- **Slika 16.** Pojednostavljena struktura superkondenzatora ..... str. 47.

### 9.2. POPIS TABLICA

- **Tablica 1.** Karakteristike olovno-kiselinskih baterija ..... str. 12-13.
- **Tablica 2.** Karakteristike Litij-ionskih baterija ..... str. 17-18.
- **Tablica 3.** Karakteristike baterija na bazi nikla ..... str. 23.
- **Tablica 4.** Tehničke karakteristike NaS baterije ..... str. 25.