

# Pregled trenutnih i nadolazećih tehnologija pohrane energije

---

**Zdjelarević, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:802602>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika**

**PREGLED TRENUTNIH I NADOLAZEĆIH  
TEHNOLOGIJA POHRANE ENERGIJE**

**Završni rad**

**Ivan Zdjelarević**

**Osijek, 2023. godina.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju

Osijek, 11.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispitna  
preddiplomskom stručnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Ivan Zdjelarević
Studij, smjer:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	A 4662, 27.07.2020.
OIB Pristupnika:	98830644850
Mentor:	Zorislav Kraus, dipl. ing. el.
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	dr. sc. Željko Špoljarić
Član Povjerenstva 1:	Zorislav Kraus, dipl. ing. el.
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić, mag. ing. el.
Naslov završnog rada:	Pregled trenutnih i nadolazećih tehnologija pohrane energije
Znanstvena grana završnog rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Zadatak završnog rada	Pregled trenutnih i nadolazećih tehnologija pohrane energije
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	11.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 06.10.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Ivan Zdjelarević

**Studij:**

Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

A 4662, 27.07.2020.

**Turnitin podudaranje [%]:**

13

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Pregled trenutnih i nadolazećih tehnologija pohraneenergije**

izrađen pod vodstvom mentora Zorislav Kraus, dipl. ing. el.

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Mehanički sustavi za pohranu električne energije.....</b>	<b>2</b>
2.1.1. Crpno-akumulacijske hidroelektrane (PSH) .....	2
2.1.2. Crpno-akumulacijske hidroelektrane ispod razine mora .....	3
2.1.3. Komprimirani zrak .....	4
2.1.4. Zamašnjaci.....	5
2.1.5. Dizala.....	6
<b>2.2. Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije .....</b>	<b>6</b>
2.2.1. Olovne baterije .....	7
2.2.2. Nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterije .....	8
2.2.3. Litij- ionske baterije.....	8
2.2.4. Natrij-sumpor baterije.....	9
2.2.5. Metal-zrak baterije.....	10
2.2.6. Vanadij-redoks protočna baterija (VRFB).....	10
2.2.7. Cink-brom protočna baterija (ZBB) .....	11
2.2.8. Polisulfid-bromid protočna baterija (PSB) .....	11
2.2.9. Litij-sulfidne baterije .....	11
2.2.10. Natrij-ionske baterije (NIB).....	11
2.2.11. Litij-željena fosfatna baterija .....	12
2.2.12. Litij-silicij baterija .....	12
2.2.13. Kalcij-ionska baterija.....	12
2.2.14. Protonske baterije .....	13
<b>2.3. Kemijski sustavi za pohranu električne energije .....</b>	<b>13</b>
2.3.1. Vodik .....	14
2.3.2. Sintetički prirodni plin.....	14
<b>2.4. Električni sustavi za pohranu električne energije.....</b>	<b>15</b>
2.4.1. Ultrakondenzatori .....	15
2.4.2. Supravodljivi magnetski svitak (SMES).....	16
<b>2.5. Toplinski sustavi za pohranu električne energije.....</b>	<b>17</b>
2.5.1. Otopljene soli.....	17
2.5.2. Pijesak .....	18
<b>2.6. Termo-kemijski sustavi za pohranu energije .....</b>	<b>19</b>

<b>3. SEKTORI PRIMJENE POJEDINIH TEHNOLOGIJA ZA SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Izravna usporedba .....</b>	<b>23</b>
<b>4. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>25</b>
<b>5. LITERATURA .....</b>	<b>26</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>27</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>27</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>28</b>

# 1. UVOD

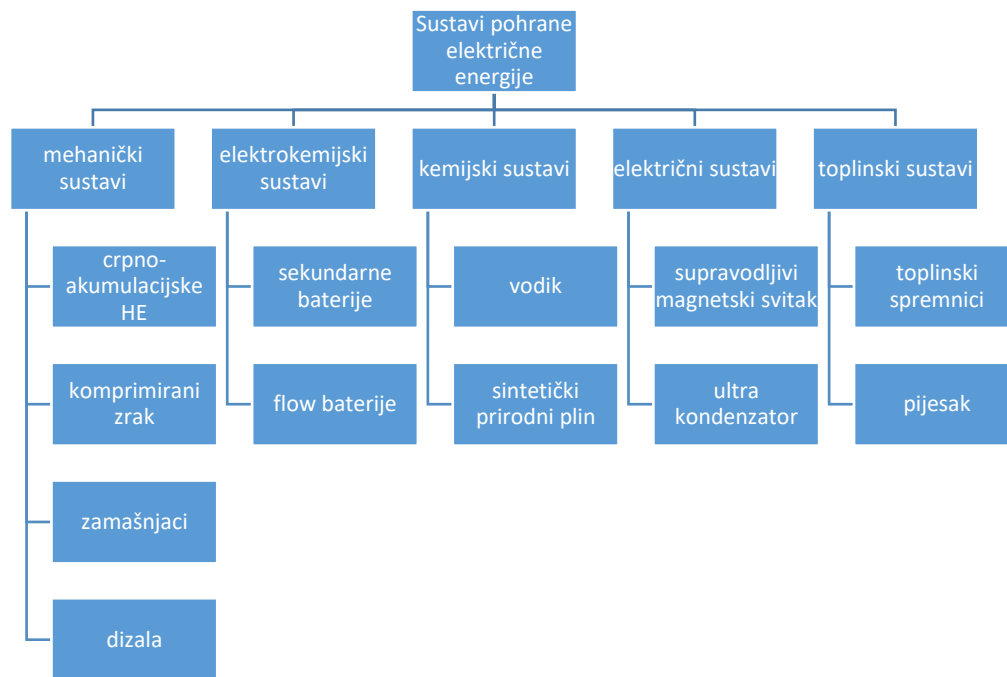
Kako bi se osigurala kontinuirana isporuka električne energije potrošačima, teži se pohrani energije na razne načine. U ovom radu opisane su trenutne i nadolazeće tehnologije pretvorbe električne energije u svrhu njezine pohrane. Prvo poglavlje je uvodno. U poglavlju nakon uvoda vidljiva je grafička podjela nekoliko raspoloživih tehnoloških rješenja za pohranu električne energije koje se primjenjuju u elektroenergetskom sustavu. To su mehanički, električni, kemijski, elektrokemijskim i toplinski sustavi. Svaki se od sustava dijeli na vlastitu tehnologiju pohrane. Za svaku tehnologiju pohrane opisan je princip rada i glavne karakteristike. Treće poglavlje sadrži primjene i usporedbe pojedine tehnologije zajedno sa svojim prednostima i nedostacima. Izneseni podaci cjelokupno popraćeni su primjerima, fotografijama i grafičkim prikazima. Na kraju je prikazan zaključak završnog rada.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je istražiti i opisati trenutne i nadolazeće tehnologije pretvorbe električne energije u svrhu njene pohrane. Navesti prednosti, nedostatke, principe rada i cijene izgradnje pojedinih postrojenja kao i navesti primjere iz realnog svijeta.

## 2. SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

U energetsom sektoru električna energija pohranjuje se kako bih se mogla koristiti kada zalihe nisu dostupne ili je potražnja za njom velika. Električna energija teško se može izravno pohraniti, ali može biti pohranjena na različite oblike. Tako bi se sustavi pohrane električne energije mogli podijeliti na električne, mehaničke, elektrokemijske, kemijske i toplinske sustave pohrane električne energije. Svaki od pojedinih načina pohrane sa sobom donosi svoje prednosti i nedostatke. Detaljna podjela prikazana je slikom 2.1.



**Slika 2.1** Grafički prikaz podjele sustava za pohranu električne energije [1]

### 2.1. Mehanički sustavi za pohranu električne energije

Mehanički sustavi za pohranu energije rade na principu pretvorbe električne energije u mehaničku, te kada nastupi stanje veće potražnje za električnom energijom pretvaraju pohranjenu mehaničku energiju u električnu. U ovom sustavu za pohranu električne energije susrećemo se s crpno-akumulacijskim hidroelektranama, zamašnjacima, komprimiranim zrakom i dizalima.

#### 2.1.1. Crpno-akumulacijske hidroelektrane (PSH)

Hydroenergija s akumulacijama jedini je oblik skladištenja obnovljive energije u širokoj komercijalnoj upotrebi danas. Pohranjivanje potencijalne energije u vodi u akumulaciji iza hidroelektrane koristi se za pohranu energije u više vremenskih horizonata, u rasponu od sati do nekoliko godina [2].

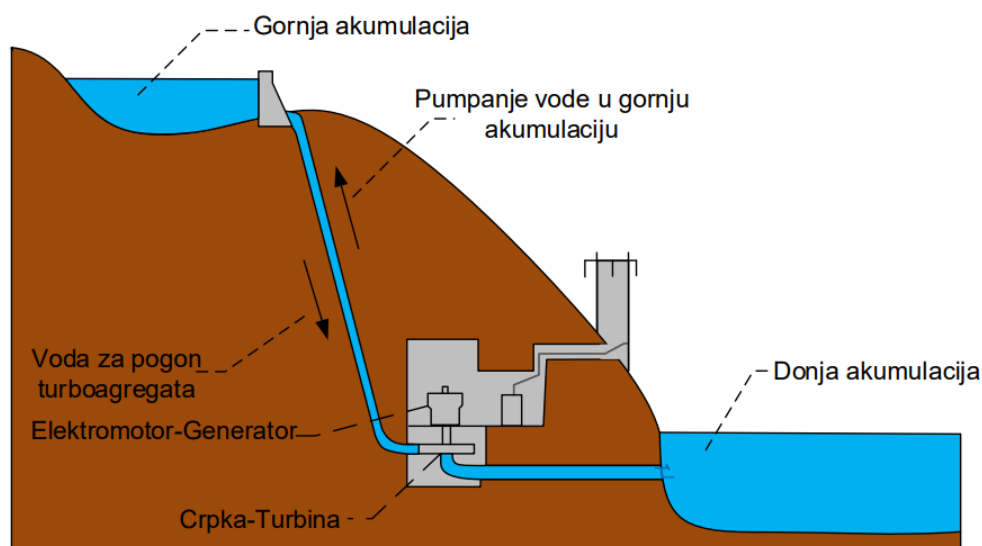


Crpno-akumulacijske hidroelektrane dizajnirane su tako da postoje gornji i donji spremnik vode. Voda iz donjeg spremnika pomoću pumpi pumpa se u gornji spremnik kada je potražnja za električnom energijom niska ili kada su cijene niske, te se time troši energija iz mreže. Zatim se, voda iz gornjeg spremnika pušta u donji spremnik, te se time pokreće vodena turbina kojom se proizvodi električna energija kada je potražnja za električnom energijom visoka i/ili cijena električne energije visoka. Utjecaj ove tehnologije na okoliš slični su onima kod konvencionalnih hidroelektrana. Međutim, pravi problem ove tehnologije je korisnost kružnog procesa koja je približno 70%.

Pohranjena energija jednaka je umnošku volumena vode u gornjem spremniku i visini vodopada prema formuli :

$$E_{PHS} = \rho \cdot g \cdot H \cdot V \quad (1)$$

$E_{PHS}$  u džulima bila bi pohranjena energija, gustoća vode  $\rho$ , akceleracija sile teže  $g$ , visina vodopada  $H$  i volumen vode pohranjene u gornjem spremniku  $V$ . Najveća prednost im je životni vijek trajanja koji doseže i preko 50 godina. Postoje više mogućih realizacija ove tehnologije kao što su iskorištavanje brane kao gornjeg spremnika, te je moguće kao donji spremnik korištenje napuštenih rudnika.



**Slika 2.2** Princip rada akumulacijske hidroelektrane [11]

### 2.1.2. Crpno-akumulacijske hidroelektrane ispod razine mora

Tehnologija koja je dana kao koncept radi na sličnom principu kao i obične reverzibilne hidroelektrane. Jedna od razlika je položaj donjeg spremnika vode koji se nalazi u jezerima ili

oceanima, dok bi se gornji spremnik nalazio na kopnu ili višoj nadmorskoj visini. Jedna od prednosti ove tehnologije je smanjivanje potrebe za izgradnjom brana ili akumulacije na kopnu, što može imati značajan utjecaj na okoliš i društvo. Osim toga, podvodno postavljanje donjeg rezervoara moglo bi pružiti dodatne prednosti poput smanjenih zahtjeva za kopnom i manjeg vizualnog utjecaja.

Postoje određeni tehnički i inženjerski izazovi koji uključuju vodonepropusnost i zadržavanje donjeg spremnika ispod razine vode. Izgradnja i održavanje može biti skupo i složeno, a podvodni okoliš predstavlja izazove poput pritiska vode, korozije i sedimentacije.

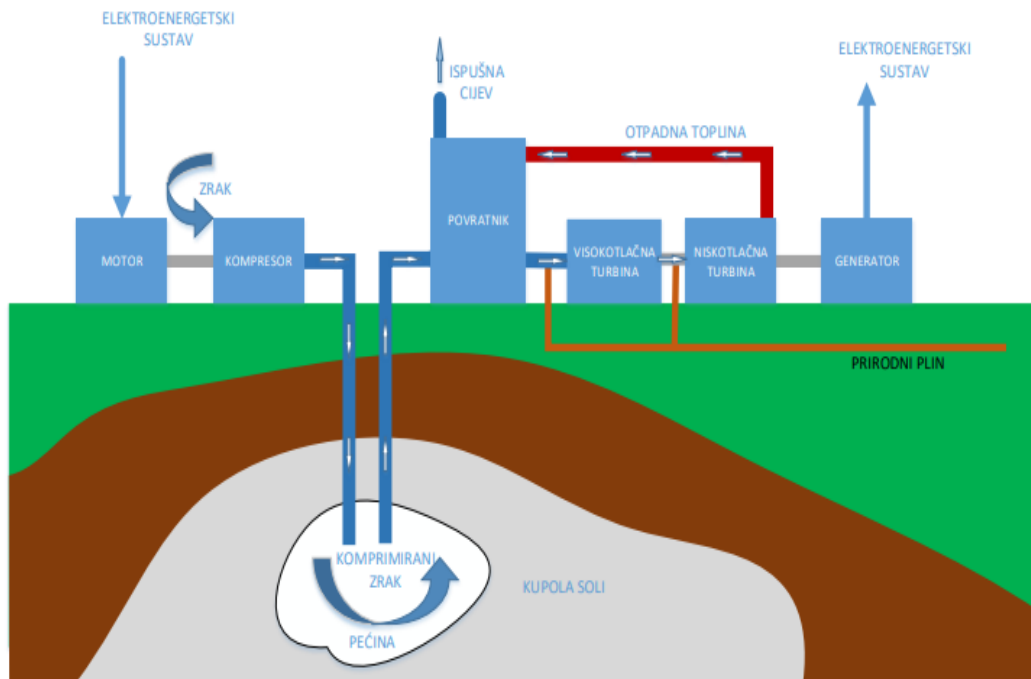
### **2.1.3. Komprimirani zrak**

Korištenje komprimiranog zraka za skladištenje energije je poznato još od 19. stoljeća i koristi se u industriji. Kao medij za pohranu koristi se zrak zbog svoje dostupnosti. Za kompresiju zraka koristi se električna energija te se taj zrak pohranjuje pod tlakom između 40-70 bara bilo u podzemnoj strukturi ili nadzemnom sustavu spremnika ili cijevi [2]. Posebno izrađeni spremnici visoke čvrstoće ne koriste se zbog svojih velikih dimenzija i visokih troškova izrade.

Kako bi se proizvela električna energija komprimirani zrak miješa se sa prirodnim plinom, zatim se taj komprimirani zrak spaljuje i širi u visokotlačnoj i niskotlačnoj plinskoj turbini, pretvarajući se u rotacijsku energiju. Turbina preko osovine pokreće generator koji proizvodi električnu energiju. Kao tipična podzemna skladišta koriste se napušteni rudnici i špilje.

Kada se zrak komprimira, zagrijava se, pa je potrebno ohladiti ga prije pohrane. Oslobođenu toplinu moguće je iskoristiti za ekspanziju ili širenje zraka, te se time postiže veći stupanj korisnosti. Ovakav sustav naziva se adijabatskim, dok se kod dijabatskog sustava oslobođena toplina ne skladišti pa su i puno jednostavniji.

Ovakva postrojenja omogućuju jeftinu pohranu velikih količina energije i brz odziv, a mana im je efikasnost koja se za dijabatski proces kreće oko 50 %, te zahtijevaju zabrtvljen spremnik zraka. Energetska učinkovitost im je oko 71 %, dok im je vijek trajanja 40 godina.



**Slika 2.3** Sustav pohrane energije komprimiranim zrakom [2]

#### 2.1.4. Zamašnjaci

Zamašnjaci su mehaničke naprave koje pretvaraju električnu energiju u kinetičku energiju vrtnje. U povijesti su prvi puta korišteni 1970-ih godina. Izrađeni su od čelika ili željeza, a oblikovani su poput diska.

Kako bi se rotacijska energija pretvorila u električnu potrebno je rotirajuću masu ubrzati pomoću elektromotora koji također ima funkciju i generatora, odnosno potrebno je smanjiti brzinu vrtnje rotacijskog diska. Zatim se zamašnjak ponovo ubrza pomoću elektromotora kako bi se napunio energijom. Brzina vrtnje je proporcionalna pohranjenoj energiji. Rotirajući prsten, osovina, magnetni ležajevi i motor glavne su komponente zamašnjaka. Kako bi se smanjila opasnost po okolinu, zamašnjaci su smješteni u čvrsti metali kontejner kako bi se spriječilo razlijetanje dijelova, uzrokovano velikim brzinama vrtnje, prilikom kvara.

Noviji zamašnjaci izrađeni su od kompozitnih materijala s većom gustoćom pohrane električne energije i bržom brzinom vrtnje. Oni se smještaju na magnetske ležajeve, a kontejneri su ispunjeni vakuumom ili plinom s niskim trenjem, poput helija, kako bi se trenje svelo na minimum. Ovakvi zamašnjaci postižu brzine vrtnje između 20 000 i 50 000 okretaja u minuti što je znatno više od prvih zamašnjaka čija je brzina dosegala nekoliko tisuća okretaja u minuti. Primjerice zamašnjak od 100 tona može pohraniti približno 10 MWh energije.

Često se koriste prilikom regulacije kvalitete električne energije u industriji kao i za naponsku stabilnost. Zamašnjaci imaju veliki koeficijent samopražnjenja pa se zbog toga koriste za kratkotrajnu pohranu. Ne zahtijevaju posebno mjesto za ugradnju što ih čini praktičnijima od ostalih mehaničkih sustava za pohranu električne energije, te imaju zanemariv utjecaj na okoliš.

### **2.1.5. Dizala**

Inovativan i nov koncept nazvan „skladištenje energije dizala“ ili „gravitacijsko skladištenje energije“ iskorištava potencijalnu energiju podignute mase pomoću dizala i njezino pretvaranje natrag u električnu energiju kada je potražnja za električnom energijom velika. Dizalo pokreće električni motor kojim se masa podiže na višu razinu kada nastupa razdoblje niske potražnje za električnom energijom, čime se pohranjuje potencijalna energija. Potencijalna energija pohranjena u masi koja se spušta pretvara se u mehaničku, zatim se mehanička energija preko regenerativnog kočnja pretvara u električnu.

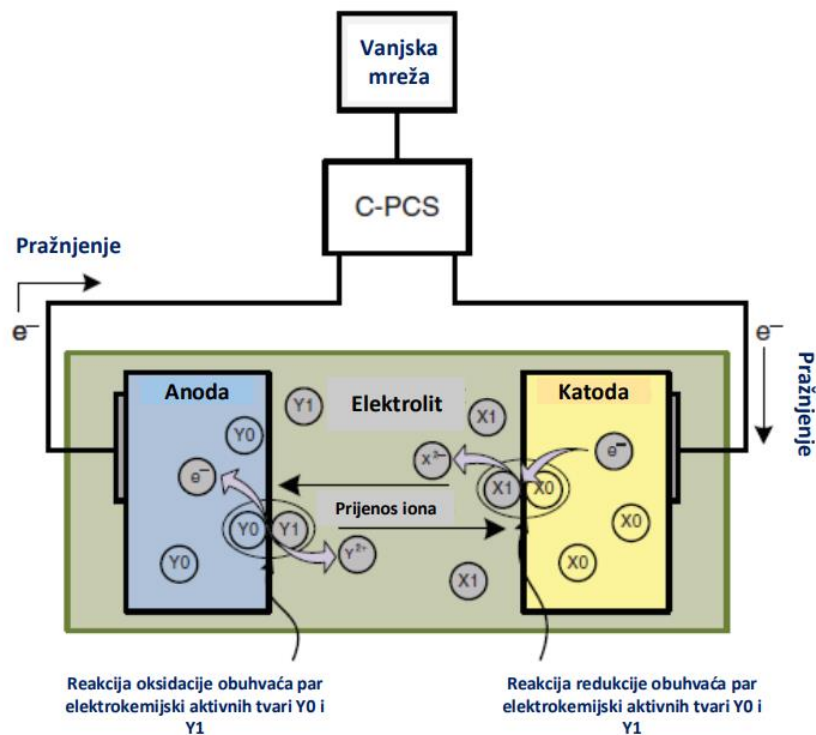
Ovaj koncept pohrane energije može se implementirati u komercijalne zgrade, visoke stambene zgrade, transportna čvorišta kao što su zračne luke i kolodvori, industrijskim objektima. Tehnologija pruža visok kapacitet pohrane energije i mogućnost pružanja brzog odziva, te su pogodna za primjenu gdje postoje predvidljiva razdoblja potražnje za energijom.

Upravljanje skladištenjem i oslobađanjem energije zahtijeva odgovarajuće sustave upravljanja, kao i učinkovite mehanizme pretvorbe za smanjenje gubitaka energije. Ekonomska održivost takvih sustava vrlo je upitna u usporedbi s već dokazanim tehnologijama skladištenja električne energije.

## **2.2. Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije**

Elektrokemijski sustav pohrane temeljen je na elektrokemijskim reakcijama redukcije i oksidacije. U procesu punjenja, energija se pretvara u kemijsku energiju, a tijekom pražnjenja se pretvara u električnu energiju. Baterijska ćelija se sastoji od dvije elektrode uronjene u elektrolit, što omogućuje elektrokemijske reakcije, a time se ostvaruje protok iona i elektrona između njih. Za vrijeme punjenja na negativnoj elektrodi (anoda) nastaje redukcija, odnosno anoda prima elektrone, dok se na pozitivnoj elektrodi (katoda) događa oksidacija, odnosno ona gubi elektrone. Spajanjem trošila na vanjski strujni krug dolazi do pražnjenja, što bi značilo da sada anoda oksidira, a katoda reducira elektrone. Bateriju je moguće napuniti promjenom smjera struje što se postiže dodavanjem vanjskog izvora.

Olovna baterija najstariji je tip baterije, a u novije vrijeme koriste se metal- zrak baterije, natrijeve baterije i protočne baterije.

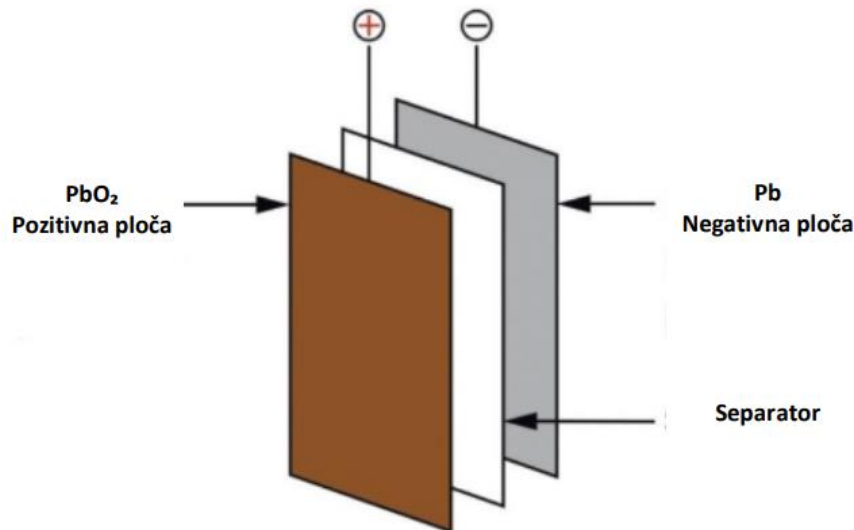


Slika 2.4 Princip rada baterije [10]

### 2.2.1. Olovne baterije

Najrasprostranjeniji tip punjivih baterija na svijetu. Nakon radnog vijeka 90 % materijala od kojih su napravljene moguće je reciklirati i koristiti prilikom proizvodnje novih. Olovne baterije mogu biti otvorenog tipa s tekućim elektrolitima i s regulacijskim ventilom.

Primjena im je vrlo široka, od korištenja u automobilima s unutarnjim izgaranjem i električnih automobila do napajanja telekomunikacijskih uređaja u industriji. Također se koriste i u fotonaponskim sustavima i za regulaciju frekvencije. Životni vijek najboljih olovnih baterija doseže i do 15 godina (oko 5 000 ciklusa), a jedan od problema im je sulfacija koja se javlja prilikom punjenja i pražnjenja. Sulfacijom dolazi do taloženja kristala olovnog sulfata na elektrode čime se smanjuje kapacitet, a time i životni vijek baterije.



**Slika 2.5** Topologija olovne baterije [4]

### 2.2.2. Nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterije

Nikal-kadmij baterije dolaze u zapečaćenom obliku što ih čini pogodnima za prijenosne primjene, te otvorenog tipa za industrijske primjene. Pouzdanost i dugačak životni vijek (preko 3 500 ciklusa) čini ih mjerodavnom tehnologijom unatoč višoj cijeni od olovnih baterija. Jedan od nedostataka ove tehnologije je smanjenje kapaciteta do kojeg dolazi kada se baterija ponovo puni iako prethodno njezin kapacitet nije maksimalno iskorišten. Od 2006. godine zabranjene su za uporabu zbog toksičnosti materijala od kojih su izrađene.

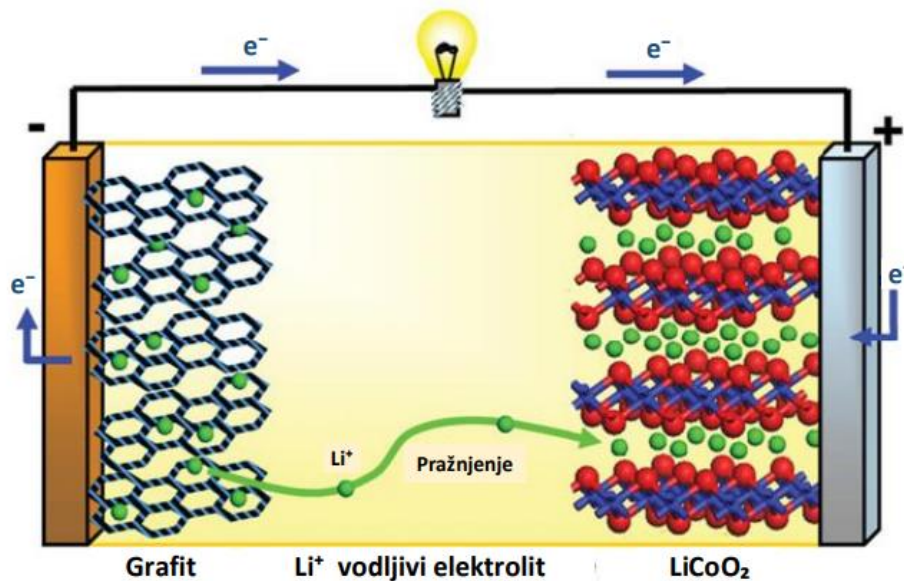
Kao zamjena za nikal-kadmij baterije razvijene su nikal-metal hidrid baterije. Tako su nikal-metal hidrid baterije usvojile pozitivna svojstva nikal-kadmij baterija, s izuzetkom deseterostrukog smanjenja nazivne snage.

### 2.2.3. Litij- ionske baterije

Prvi komercijalan proizvod pušten je 1991. godine. Pozitivna elektroda (katoda) napravljena je od litijeva metal oksida, dok se negativna elektroda (anoda) izvodi od karbona i atoma litija koji se nalaze unutar elektrolita. Otopljene soli na bazi litija čine vodljivi elektrolit.

Obično se koriste moduli s više ćelija koji se povezuju serijski i/ili paralelno te se kontroliraju sustavima za upravljanje baterijama. Napon ćelije ove tehnologije dostiže 3,7 V što u kombinaciji s malom težinom litija rezultira visokom specifičnom energijom (75-120 Wh/kg). Prikladne su za prijenosne primjene kao i za pohranu električne energije kod ćelija većih dimenzija. Litij-ion

baterije zahtijevaju sužen raspon napona i temperature, pa tako prekomjernim zagrijavanjem može doći do zapaljavanja i eksplozije.



Slika 2.6 Litij-ionska baterija [4]

#### 2.2.4. Natrij-sumpor baterije

Ford Motor Company je razvio natrij-sumporne (NaS) baterije u 60-ima, a tehnologija je kasnije prodana japanskoj tvrtki NGK. Zbog niske cijene izrade obuhvatile su tehnologije za stacionarnu primjenu. Otopljeni natrij tvori negativnu elektrodu, dok je pozitivna elektroda napravljena od otopljenog sumpora. Elektrode su razdvojene krutim elektrolitom od beta-aluminija. Kako bi elektrolit zadržali u tekućem stanju baterije mora se održati na temperaturi većoj od 300 °C. Korisnost ove baterije doseže 85 %, te imaju vrlo nizak koeficijent samo-pražnjenja i niska održavanja.



Slika 2.7 Shematski prikaz ćelije NaS baterije i baterijskog modula [2]

### 2.2.5. Metal-zrak baterije

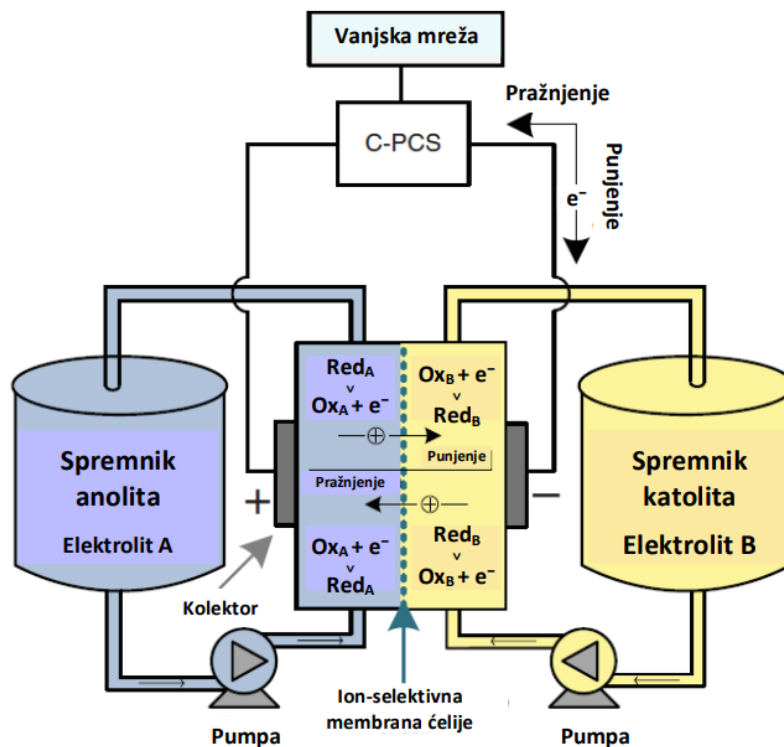
Metal-zrak elektrokemijska ćelija ima anodu od čistog metala i katodu spoјenu na neiscrpan izvor zraka [2]. U elektrokemijskoј reakciji, koristi se samo kisik iz zraka [2].

Jedine tehnički izvedive su cink-zrak baterije sa teoretskom specifičnom energijom bez kisika od 1,35 kWh/kg. Nakon razvoja tankih elektroda temeljenih na gorivim ćelijama, napravljene su male gumb prizmaste ćelije za medicinske svrhe, posebno za srčanu telemetriju i slušna pomagala.

### 2.2.6. Vanadiј-redoks protočna baterija (VRFB)

Baterije koje se razlikuju od prethodno opisanih po tome što imaju dva elektrolita u odvojenim spremnicima. Tijekom punjenja se oba elektrolita pumpaju kroz elektrokemijske ćelije gdje se elektrokemijski aktivni materijal otopljen u elektrolitu A oksidira na negativnoj elektrodi, a onaj u elektrolitu B reducira na pozitivnoj elektrodi[4]. Proces koji se odvija za vrijeme pražnjenja obrnut je procesu za vrijeme punjenja. Pumpe su odgovorne za kretanje elektrolita kroz ćelije, što stvara naboj tijekom punjenja i pražnjenja baterije.

Optimalna radna temperatura im je između 10 i 40 °C, te u slučaju viših temperatura okoline primjenjuju se rashladni sustavi. Važno je napomenuti kako elektrolit nije zapaljiv jer sadrži visok udio vode.



Slika 2.8 Princip rada protočnih baterija [4]



### **2.2.7. Cink-brom protočna baterija (ZBB)**

I u ovom slučaju baterije kao i kod vanadij-redoks protočne baterije, elektrolit odvojen je u dva različita spremnika. Spremnici su odvojeni mikro-prozirnou poliolefinskom membranou, te sadrže otopine cink-bromid soli. Tijekom punjenja baterije, cink se nakuplja na negativnoj elektrodi, dok se brom pretvara u gusto ulje na pozitivnoj elektrodi. Tijekom pražnjenja, cink se otapa u elektrolitu, a ioni bromida se reduciraju na katodi.

Ovom tehnologijou baterije, dobivanje dva elektrona od jednog atoma cinka rezultira visokou gustoćou energije. Međutim ovdje dolaze i negativne strane ove baterije, što je skupa cijena izrade i štetnost broma za ljudski organizam.

### **2.2.8. Polisulfid-bromid protočna baterija (PSB)**

Protočna baterija s dva odvojena spremnika s dva različita elektrolita gdje se u području negativne elektrode nalazi natrijev polisulfid, a natrijev bromid u području pozitivne elektrode. Tijekom pražnjenja, natrijev polisulfid u anodi oksidira i gubi elektrone koji odlaze u vanjski krug. Slobodnu kretnju natrijevih iona između spremnika omogućuje polimerni separator. Maksimalni napon između anode i katode iznosi 1,5 V.

Tehnologija baterija prigodna je za pohranu na duži vremenski period jer imaju mali koeficijent samo-pražnjenja. Ograničene na stacionarne primjene zbog niske specifične energije.

### **2.2.9. Litij-sulfidne baterije**

Tehnologija baterija koja je još uvijek u istraživanju, a temelj ove tehnologije je litijev sulfid ( $\text{Li}_2\text{S}$ ) kao potencijalni katodni materijal. Imaju visoku gustoću energije i male troškove izrade u usporedbi s litij-ionskim baterijama. Litijev sulfid ima sposobnost pohrane velike količine litijevih iona zbog visokog specifičnog kapaciteta, što rezultira visokim kapacitetou pohrane energije. Veća prirodna zastupljenost i niža cijena litijeva sulfida ide u korist ove tehnologije u usporedbi nekih drugih materijala koji se koriste u litij-ionskim baterijama. Tip ove baterije još nije zaživio zbog loše električne vodljivosti litijevog sulfida, što rezultira niskou učinkovitošću baterije. Teorijski povećati učinkovitost moguće je ugradnjou vodljivih aditiva za poboljšanje vodljivosti katode.

### **2.2.10. Natrij-ionske baterije (NIB)**

Novi tip punjivih baterija kod kojih se umjesto litijevih iona koriste natrijevi ioni kao nosioci naboja. Kao i kod litij-ionskih baterija pohranjuju i oslobađaju energiju kretanjou iona između

elektroda tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja. Zbog veće zastupljenosti i široko rasprostranjenosti, natrij-ionske baterije ekološki su isplativije i ekološki održivije.

Potencijal za velikom gustoćom snage čini ih prikladnima za velike izlazne snage. Ioni natrija veći su i teži od iona litija, što dovodi do strukturnih promjena i ograničenja u izboru materijala za elektrode. Ovaj tip baterije bez svojih ograničenja bio bi idealan za primjenu kao što je mrežno skladištenje energije.

#### **2.2.11. Litij-željena fosfatna baterija**

Kao katodni materijal koriste litij željezo fosfat koji ima visoku toplinsku i kemijsku stabilnost, dug vijek trajanja u usporedbi s drugim kemijskim sastavima litij-ionskih baterija. Anode izrađena od grafita i elektrolit na bazi otopljenih litijevih soli u organskom otapalu sastavni su dio ove baterije.

Prikladne su za primjene koje zahtijevaju visoku razinu sigurnosti, kao što su električna vozila i sustavi pohrane energije. Mogu izdržati velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja bez značajnijeg smanjenja kapaciteta. Jedna od mana ove baterije je manja gustoća energije u usporedbi s drugim kemijskim sastavima litij-ionskih baterija.

#### **2.2.12. Litij-silicij baterija**

Baterija temeljena na litij-ionskim baterijama na bazi silicija, odnosno anoda ove baterije napravljena je od silicija umjesto od tradicionalnog grafita. Imaju potencijal pohraniti više energije u usporedbi s grafitom, što dovodi do veće gustoće energije i dugotrajnosti baterije.

Međutim, tijekom procesa punjenja i pražnjenja dolazi do značajnog širenja i skupljanja volumena silicija, što dovodi do stvaranja sloja čvrstog elektrolita koji sprječava protok litijevih iona. Time opada kapacitet baterije tijekom vremena.

#### **2.2.13. Kalcij-ionska baterija**

Vrsta baterija koja koristi kalcijeve ione kao nositelje naboja. Rade na principu litij-ionskih baterija tako što pohranjuju električnu energiju kretanjem iona između pozitivne i negativne elektrode baterije prilikom punjenja, dok se obrnuti proces događa prilikom pražnjenja.

Kao alternativa litiju, kalcij se razmatra jer je zastupljeniji i cjenovno niži od litija. Jedan od razloga zašto ova baterija nije još uvijek u uporabi je taj što nema pogodnog materijala za izradu elektroda. Razmatraju se kalcij kobalt oksid, kalcij vanadij oksid i kalcij titan oksid kako bi se optimizirale performanse ove baterije. Drugi izazov je razvoj prikladnih elektrolita koji će podržati

transport iona kalcija, a istražuju se elektroliti, kao što su kalcijeve soli otopljene u organskom otapalu.

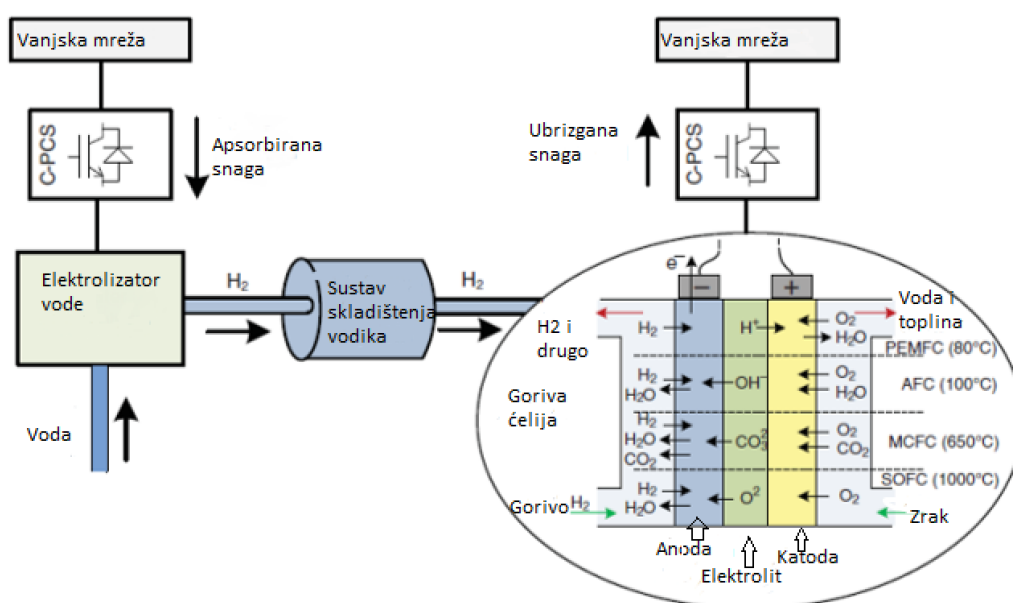
### 2.2.14. Protonske baterije

Koncept ove baterije koristi protone (vodikove ione) kao nositelje naboja. Ključna razlika je uporaba reverzibilne vodikove elektrode. Tijekom punjenja, protoni generirani iz vodikove elektrode pohranjuju se u materijal elektrode. Kada se baterija isprazni, protoni se oslobađaju s elektrode i putuju kroz elektrolit, generirajući električnu struju dok migriraju od anode do katode. Kako bi se komercijalizirale potrebno je razviti prikladan elektrolit koji će učinkovito provoditi protone uz održavanje stabilnosti.

### 2.3. Kemijski sustavi za pohranu električne energije

Na pohranu značajnih količina električne energije velik utjecaj imaju vodik i sintetički prirodan plin. Takav kemijski sustav za pohranu energije ima glavnu svrhu pretvaranja viška struje u vodik elektrolizom vode. [2]

Zbog visoke zapaljivosti, europske regulative zahtijevaju da udio vodika u prirodnom plinu koji se transportira plinovodima bude između 0,2% i 12%, ovisno o zemlji.



Slika 2.9 Koncept regenerativne gorive ćelije [4]

### **2.3.1. Vodik**

Vodik je najlakši i najrasprostranjeniji element u svemiru. Moguće ga je dobiti iz fosilnih goriva ili elektrolizom vode. Sustav regenerativne gorive ćelije sastoji se od proizvodnje vodika u elektrolizeru vode i spremnika za pohranu vodika čijim se danjim korištenjem u gorivoj ćeliji proizvodi električna energija. Pomoću obnovljivih izvora energije, kao što su energija vode i vjetra, moguće je napajati elektrolizer.

Pri niskim temperaturama elektrolizer rastvara vodu na vodik i kisik. Taj proces naziva se elektroliza koju dijelimo na alkalnu elektrolizu i elektrolizu pomoću protonske vodljive membrane. Još u razvoju postoje i takozvani visoko-temperaturni elektrolizeri koji iskorištavaju toplinu otpuštene kod nuklearnih reaktora za pretvaranje vode u vodenu paru na temperaturama između 800-1000 °C. Na katodi para se razdvaja na molekule vodika i ione kisika koji se do anode odvođe difuzijom kroz čvrsti difuzni elektrolit gdje nastaju molekule kisika. Ovisno o količini proizvedenog vodika, za male količine koriste se čvrsti metalni spremnici ili nano- cjevčice koje imaju mogućnost pohrane vodika visoke gustoće, dok se za pohranu velikih količina vodika koriste podzemne solne peći gdje se vodik stlačuje na 200 bara. Ovakve peći imaju mogućnost pohrane 100 GWh energije. Unutar gorive ćelije dolazi do kemijske reakcije pri čemu nastaje električna energija, voda i toplina. Gorive ćelije sastoje se od anode, katode i elektrolita koji ima ulogu razmjene iona između elektroda. Za manje snage (oko 100 kW) pogodnije su ćelije s protonski vodljivom membranom, dok se za veće snage koriste gorive ćelije s oksidnim člancima (nekoliko MW).

Kapacitet pohrane energije definiran je volumenom pohranjenog vodika, pa s tim ove ćelije u stanju su pružati energiju nekoliko sati. Visoka snaga i veći broj punjenja i pražnjenja u odnosu na baterije neke su od prednosti ove tehnologije. Nedostaci su im visoka zapaljivost vodika i niska energetska učinkovitosti koja doseže 40 %.

### **2.3.2. Sintetički prirodni plin**

Ovaj sustav pohrane električne energije još se naziva i Power-to-gas sustavom, te se temelji na pretvorbi električne energije, dobivene iz obnovljivih izvora energije, u plin koji se iskorištava u različite primjene (npr. tercijarni sektor, industrija, plinskim mrežama...).

Uz pomoć biokatalizatora dobiveni vodik se u reakciji s ugljikovim dioksidom pretvara u sintetički metan. Proizvedeni vodik ima mogućnost skladištenja, te ponovnog iskorištenja za pokretanje plinskih turbina ili kao gorivo u gorivim ćelijama. Udio vodika u prirodnom plinu kod

plinskih mreža ima svoja ograničenja zbog zapaljivosti samog plina, dok se prirodni plin može zamijeniti proizvedenim sintetičkim plinom.

Ova tehnologija ima mogućnost pohrane većih količina energije tijekom dužeg vremenskog perioda. Procesi za proizvodnju vodika i sintetičkog metana imaju različite razine učinkovitosti, koje ovise o različitim faktorima poput medija za pohranu, transporta i tehnologije elektrolizera. Pretvaranje električne energije u vodik i sintetički metan ima učinkovitost od otprilike 50-60 %. Prilikom procesa iz kojeg se dobiva metan najveći gubici su oni u obliku topline.

## 2.4. Električni sustavi za pohranu električne energije

### 2.4.1. Ultrakondenzatori

Ultrakondenzatori razvijeni su iz tehnologije kondenzatora. Njihova princip rada temelji se na spremanju elektrostatske energije u električnom polju. Za razliku od konvencionalnih kondenzatora, elektrode ultrakondenzatora uronjene su u elektrolit s otopljenim ionima koji pridonese povećanju kapaciteta.

Kad se na elektrode i elektrolit primijeni napon, dolazi do polarizacije. Elektrode i elektrolit stvaraju dvostruke slojeve koji omogućuju razmjenu iona. Sloj solventnih molekula razdvaja pozitivan i negativan naboj elektrode i elektrolita jer se ponaša kao dielektrik. Električno polje između plus i minus sloja iona stvara napon. Shodno tome, pohrana energije pomoću ultrakondenzatora ovisi o naponu između pojedinih slojeva kao i o kapacitetu.

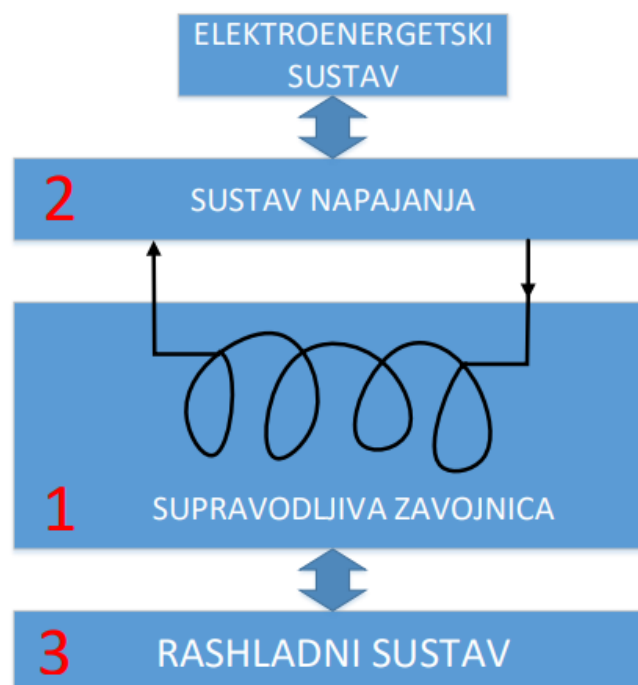
$$E_{SC} = 1/2 \cdot C \cdot U^2 \quad (2)$$

$E_{SC}$  bila bi pohranjena energija,  $C$  kapacitet ultrakondenzatora i napon između slojeva  $U$ . Količina energije koju ultrakondenzator može pohraniti također ovisi i o dielektriku. Većim probojnim naponom dielektrika između slojeva povećava se i napon između slojeva. To nam utječe na izbor dielektrika. S elektrolitima na bazi vode može se postići napon od 1 V, dok se s organskim elektrolitima napon može povećati čak do 2,5 V.

Ultrakondenzatori imaju dug životni vijek, što znači da se mogu puniti i prazniti mnogo puta bez značajnog pogoršanja performansi. Mogu izdržati stotine tisuća do milijuna ciklusa punjenja i pražnjenja, također ih i karakterizira njihova učinkovitost koja doseže 80 %. Općenito imaju manju specifičnu gustoću energije, što znači da mogu pohraniti manje energije po jedinici mase ili volumena, te su neprikladni za pohranu energije na duži vremenski period. Međutim, njihova velika gustoća snage kompenzira nižu specifičnu gustoću energije. Kao nedostatak imaju visok stupanj samopražnjenja koji iznosi i do 20 % nazivnog kapaciteta za 12 h, kao i visoku cijenu.

### 2.4.2. Supravodljivi magnetski svitak (SMES)

Supravodljiva magnetska pohrana energije (SMES- *Superconducting Magnetic Energy Storage*) je tehnologija pohrane energije koja koristi supravodljive zavojnice za stvaranje magnetskog polja. Kada struja teče kroz zavojnicu, stvara se magnetsko polje koje pohranjuje energiju. Da bi zavojnica postala supravodljiva, mora se ohladiti ispod kritične temperature materijala čiji se raspon kreće između  $-269$  i  $-193$  °C. Kada se struja primijeni, supravodljivi materijal nema otpor, što znači da su gubici energije minimalni. Najveći udio energije troši se na ostvarivanje supravodljivih uvjeta. Zbog toga se u sustavima za hlađenje kao rashladni medij koriste tekući dušik i tekući helij. Količinu energije koju ovakvi sustavi mogu pohraniti ovise o veličini i dizajnu supravodljive zavojnice. Veće zavojnice s jačim magnetskim poljem mogu pohraniti više energije. SMES sustavi se koriste kada je potrebna velika izlazna snaga i za stabilizaciju mreže a, prednosti su im velika gustoća snage, brzo vrijeme odziva, visoka učinkovitost koja doseže i do 90 %. Međutim, ovi sustavi prikladniji su za kratkotrajnu pohranu energije zbog visokog samopražnjenja koje iznosi i do 15 % nazivnog kapaciteta po satu. Također još neki od nedostataka su visoka cijena i potreba za nisko temperaturnim hlađenjem.



**Slika 2.10** Sastavni dio supravodljivog magnetskog svitka [2]

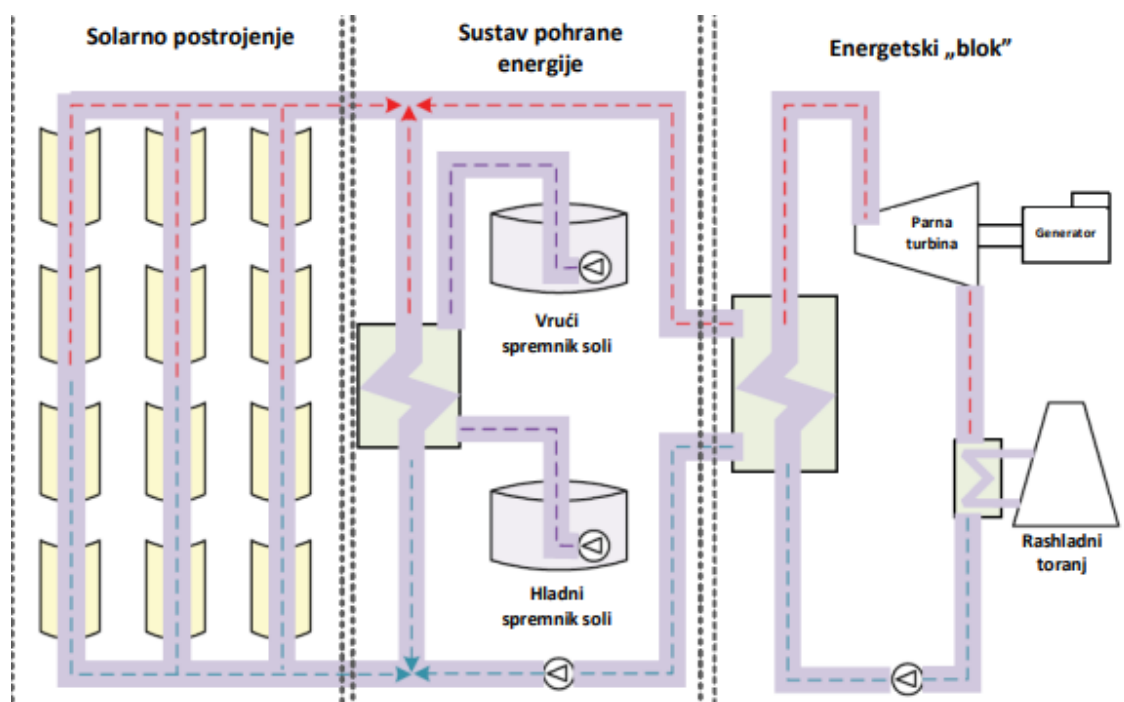
## **2.5. Toplinski sustavi za pohranu električne energije**

Toplinski sustavi temelje se na skladištenju energije u obliku topline, te danjim iskorištavanjem te topline za grijanje i proizvodnju električne energije. Koriste različite vrste medija kao što su latentni, plinoviti, tekući, toplinski i kruti medij.

### **2.5.1. Otopljene soli**

Solarne termoelektrane najviše koristi ovaj način pohrane toplinske energije zbog svoje jednostavnosti. Kapacitet pohrane energije definiran je specifičnim toplinskim kapacitetom za osjetljive medije (kruti, tekući i plinoviti), te ga izražavamo u kJ/kgK. Da bi se gubici smanjili medij treba biti odvojen od okoline. Toplina se prenosi putem mehanizama za prijenos zasnovanima na razlici temperatura.

Parabolični kolektor prikuplja toplinu iz sunčevog zračenja i usmjerava ju prema cijevima s radnim medijem. Putem sustava s dva izmjenjivača topline zagrijani radni medij prolazi kroz jedan izmjenjivač topline gdje se toplina predaje otopljenim solima iz hladnog spremnika, te se pohranjuje u vrući spremnik za korištenje tijekom manjka sunca. Drugi izmjenjivač topline služi da bi se toplina predala vodi i na taj način proizvela para za pokretanje parne turbine te samim time i pokretanje generatora. Radni medij se ponovo zagrijava pomoću kolektora nakon što preda toplinu vodi. Sustavom s dva izmjenjivača i spremnikom otopljene soli omogućena je proizvodnja električne energije tijekom manjka sunca. Primjer ovakvog tipa solarne elektrane nalazi se u Andasolu, gdje se u razdoblju bez sunca može proizvoditi električna energija do 7,5 h neprekidno.



**Slika 2.11** Prikaz fotonaponske elektrane sa sustavom za pohranu energije koristeći otopljene soli [4]

### 2.5.2. Pijesak

Skladištenje energije na temelju pijeska koristi jedinstvena toplinska svojstva pijeska za pohranu i oslobađanje energije. Pijesak je široko dostupan i jeftin materijal, što ga čini prikladnim za velike primjene pohrane energije. Električna se energija pretvara u toplinu pomoću indukcijskih grijača, te se nastala toplina prenosi na sloj pijeska, podižući njegovu temperaturu. Energija je pohranjena unutar toplinske mase pijeska, koja zadržava toplinu dulje vrijeme. Propuštanjem medija (zraka ili tekućine) kroz sloj pijeska dolazi do apsorpiranja topline, te se zatim toplina dovodi do izmjenjivača topline. Toplina izvučena iz pijeska iskorištava se za proizvodnju, kojom se pokreće turbina povezana s električnim generatorom koji proizvodi električnu energiju.

Skladištenje energije pomoću pijeska može pomoći pri integraciji obnovljivih izvora energije pohranjivanjem viška električne energije tijekom razdoblja niske potražnje. Ova tehnologija još uvijek se razvija, te je potrebno poboljšati ukupne performanse kako bi se optimizirala učinkovitost i komercijalna održivost.



## 2.6. Termo-kemijski sustavi za pohranu energije

Tehnologija koja je još uvijek u razvijaju, a temelji se na reverzibilnim kemijskim reakcijama. Višak električne energije koristi se za pokretanje endotermne kemijske reakcije. Endotermnom reakcijom kemijska tvar ili smjesa pretvara se u stanje više energije, pohranjujući energiju u obliku kemijskih veza. Ovakve reakcije obično se odvijaju na temperaturama iznad 500 °C. Medij koji se koristi u TCES sustavima obično su otopljene soli i otopine amonijaka/vode i hibridni metali, međutim o izboru medija ovise toplinska stabilnost i kapacitet skladištenja energije.

Toplina se dovodi iz vanjskog izvora, kao otpadne topline i koncentrirane solarne energije, te se zagrijavanjem medija dolazi do kemijskim reakcija. Energija koja se stvara kemijskim reakcijama apsorbira se i pohranjuje unutar veza produkata reakcije. Ovaj proces je endoterman, što znači da apsorbira toplinu iz okoline. Kada je potrebna pohranjena energija u TCES sustavu prolazi obrnutu reakciju. To se postiže primjenom topline na medij za pohranjivanje energije, obično dovođenjem pare. Toplina iz pare pokreće egzotermnu reakciju što dovodi do oslobađanja pohranjene energije u obliku topline, te se tom toplinom pokreće toplinski stroj, kao što je parna turbina ili Stirlingov motor. Nakon pražnjenja, dovođenjem dodatne električne energije dovodi do ponovnog pokretanja endotermne reakcije.

Termo-kemijsko skladištenje energije (TCES) nudi način skladištenja toplinske energije među godišnjim dobima uz vrlo male gubitke topline. Kombinacija solarnih toplinskih kolektora (STC) i TCES sustava omogućit će niz različitih aplikacija grijanja, kao što je grijanje kućnih prostora i tople vode, kao i nisko temperaturne primjene topline industrijskih procesa na način s niskim udjelom ugljika[5].

Ovakvi sustavi nude prednost dugoročnog skladištenja toplinske energije velike gustoće, te ih čini idealnima za primjene gdje je potrebna toplina tijekom duljeg razdoblja ili kada postoji potražnja za toplinom i za električnom energijom.

### 3. SEKTORI PRIMJENE POJEDINIH TEHNOLOGIJA ZA SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Najzastupljenija tehnologija pohrane električne energije je ona pomoći reverzibilnih hidroelektrana. Prva takva elektrana izgrađena je u Švicarskoj 1904. godine, a zatim i u drugim dijelovima svijeta. Često se izvode u kombinaciji s nuklearnom elektranom što omogućuje rad nuklearne elektrane punim kapacitetom neprekidno. Jedino crpno-akumulacijska hidroelektrana je spremna pružiti dovoljno velike kapacitete za skladištenje viška električne energije proizvedene od strane nuklearne elektrane tijekom razdoblja niže potražnje za energijom. 2022. godine ukupni kapacitet crno-akumulacijskih hidroelektrana za pohranu energije u svijetu iznosio je 135 GW, a zemlje s najvećim kapacitetima crpno-akumulacijskih hidroelektrana su Kina s 30 GW i Japan s 27.6 GW.

Međutim, najveća crpno-akumulacijska hidroelektrana po imenu Bath County nalazi se u Sjedinjenim Američkim Državama s maksimalnim proizvodnim kapacitetom od 3 003 MW. Primjer crpne hidroelektrane u Hrvatskoj nalazi se u mjestu Fužine sa snagom od 5 MW. Elektrana koristi vodeni pad između akumulacije Lokvarskog jezera i umjetnog jezera Bajer.

1978. godine u Njemačkoj izgrađena je najveća elektrana na komprimirani zrak sa svojih 290 MW, te je to i danas najveća takva elektrana na svijetu.

Elektrokemijskim sustavima pohrane koriste se električni i hibridni auti. Prilikom odabira baterije namijenjene električnom vozilu razmatraju se: težina, temperaturni opseg, gustoća energije, životni ciklus. Litij-ionske baterije prednjače u industriji električnih automobila. Imaju potencijal isporučiti 400-450 Wh električne energije po kilogramu težine[7]. Također imaju dug životni vijek i visoku energetska učinkovitost.

Olovne baterije koriste se u automobilskoj industriji i manjim skladištima energije. Međutim, razvijene su i većih razmjera (oko 10 MW) za uporabu u elektranama. Karakterizira ih njihova težina i niska cijena. Za razliku od olovnih baterija, nikal-kadmijeve baterije puno su lakše, te imaju veću energetska gustoću. Prije dolaska litij-ionskih baterija, korištene su u prijenosnim računalima i mobitelima. Najveća ikad napravljena nalazi se u Aljasci i zauzima površinu veličine 9000 m<sup>2</sup>.

Za razliku od olovnih i nikal-kadmijevih baterija koje radne na sobnoj temperaturi, natrij-sumporne baterije rade na temperaturama od 300 °C. Velika gustoća energije čini ih idealnima za primjenu u automobilima. Međutim, zbog eksplozivnosti tekućeg natrija u kontaktu sa vodom

nemaju visoki stupanj sigurnosti. Demonstracijski projekti i rani komercijalni projekti reda si su od 500 kW do 6 MW.

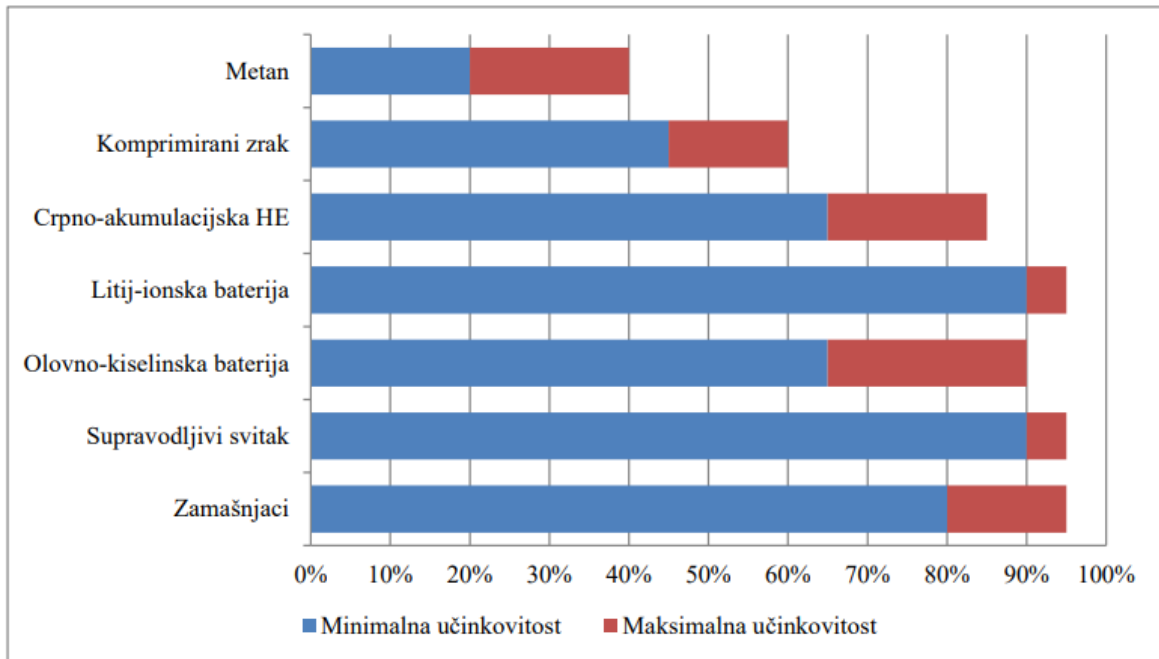
**Tablica 3.1** Područja primjene pojedinih tehnologija [9]

Tehnologija	Osnovna primjena	Što trenutno znamo	Izazovi
Komprimirani zrak	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Upravljanje energijom</li> <li>➤ Rezerva</li> <li>➤ Integracija obnovljivih izvora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tehnologija osnovana i u funkciji od 1970. godine.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Geografski ograničena</li> <li>➤ Niža učinkovitost zbog povratne pretvorbe</li> <li>➤ Sporije vrijeme odziva u odnosu na zamašnjake i baterije</li> <li>➤ Utjecaj na okoliš</li> </ul>
Crpno – akumulacijske hidroelektrane	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Upravljanje energijom</li> <li>➤ Regulacija putem promjenjivih brzina crpke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Razvijena tehnologija</li> <li>➤ Trenutno najisplativiji oblik pohrane</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Geografski ograničena</li> <li>➤ Lokacija postrojenja</li> <li>➤ Utjecaj na okoliš</li> <li>➤ Visoki ukupni troškovi projekta</li> </ul>
Zamašnjaci	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Izravnavanje opterećenja</li> <li>➤ Regulacija frekvencije</li> <li>➤ Peglanje vrhova</li> <li>➤ Pобоljšanje tranzijentne stabilnost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Modularna tehnologija</li> <li>➤ Rastući potencijal na ljestvici korisnosti</li> <li>➤ Dug životni ciklus</li> <li>➤ Visoka vršna snaga bez pregrijavanja</li> <li>➤ Brza reakcija</li> <li>➤ Visoka povratna učinkovitost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ograničenja zbog vlačne čvrstoće rotora</li> <li>➤ Ograničeno vrijeme za pohranu energije zbog visokih gubitaka uslijed trenja</li> </ul>
Olovne baterije	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Regulacija</li> <li>➤ Pобоljšanje stabilnosti mreže</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Niska cijena</li> <li>➤ Sadržaj za reciklažu</li> <li>➤ Dobar životni vijek baterije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ograničena dubina pražnjenja</li> <li>➤ Niska gustoća energije</li> <li>➤ Velike dimenzije</li> <li>➤ Korozija elektroda</li> </ul>

Tehnologija	Osnovna primjena	Što trenutno znamo	Izazovi
Natrij-sumporne baterije	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Kvaliteta napajanja</li> <li>➤ Obnovljivi izvor</li> <li>➤ Integracija</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Visoka gustoća energije</li> <li>➤ Dug ciklus pražnjenja</li> <li>➤ Brz odziv</li> <li>➤ Dug životni vijek</li> <li>➤ Dobar potencijal na ljestvici korisnosti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Radna temperatura je između 250°C i 300°C</li> <li>➤ Korozija i krhke staklene brtve</li> </ul>
Litij-ionske baterije	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Kvaliteta napajanja</li> <li>➤ Regulacija frekvencije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Visoka gustoća energije</li> <li>➤ Dobar životni ciklus</li> <li>➤ Visoka učinkovitost punjenja / pražnjenja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Visoki troškovi proizvodnje</li> <li>➤ Iznimno osjetljive na više temperature i preopterećenje</li> <li>➤ Netolerancija na duboko pražnjenje</li> </ul>
Protočne baterije	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Peglanje vrhova</li> <li>➤ Vremenski pomak</li> <li>➤ Regulacija frekvencije</li> <li>➤ Kvaliteta napajanja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Sposobnost obavljanja velikog broja ciklusa pražnjenja</li> <li>➤ Niža učinkovitost punjenja / pražnjenja</li> <li>➤ Vrlo dug životni vijek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tehnologija u razvoju, nije zrela za razvoj komercijalnih razmjera</li> <li>➤ Komplicirana konstrukcija</li> <li>➤ Niska gustoća energije</li> </ul>
Super-vodljivi magnetski svitak	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Kvaliteta napajanja</li> <li>➤ Regulacija frekvencije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Najviša povratna učinkovitost pražnjenja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Niska gustoća energije</li> <li>➤ Previsoki troškovi materijala i proizvodnje</li> </ul>
Ultra kondenzator	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Kvaliteta napajanja</li> <li>➤ Regulacija frekvencije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Vrlo dug životni vijek</li> <li>➤ Visoko reverzibilna</li> <li>➤ Brzo pražnjenje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trenutno previsoki troškovi</li> </ul>
Termo-kemijska pohrana energije	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Regulacija mreže</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ekstremno visoka gustoća energije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trenutno previsoki troškovi</li> </ul>

### 3.1. Izravna usporedba

Slika 3.1 daje detaljnu usporedbu efikasnosti pojedinih tehnologija, te je moguće uvidjeti da litij-ionska baterija i supravodljivi svitak imaju najbolju učinkovitost.



**Slika 3.1** Usporedba efikasnosti pojedinih tehnologija [8]

Pri odabiru korištenja pojedine tehnologije osim učinkovitosti gleda se i cijena tehnologije i količinu resursa koju zahtijeva.

**Tablica 3.2** Usporedba gubitaka energije pojedinih tehnologija[8]

Zamašnjaci	Supravodljivi svitak	Olovne baterije	Litij – ionske baterije	Crpno – akumulacijska HE	Komprimirani zrak	Metan
3 – 20 % po satu	10 – 12 % po danu	5 % po mjesecu	5 % po godini	0 – 0,5 % po danu	0 – 10 % po danu	0 – 1 % po danu

Unatoč velikim gubicima po danu , tehnologija koja koristi komprimirani zrak i supravodljive zavojnice i dalje je mjerodavna s ostalim tehnologijama.

**Tablica 3.3** Cijena pojedinih tehnologija [8]

Tehnologija	Životni ciklus	Specifični investicijski troškovi / proizvedenom kWh
Zamašnjaci	20 godina	1000 – 5000 EUR
Supravodljivi svitak	1000000 ciklusa	30000 – 2000000 EUR
Olovna baterija	1000 – 2000 ciklusa	25 – 250 EUR
Litij – ionska baterija	500 – 3000 ciklusa ili 5 godina	800 – 1500 EUR
Crpno akumulacijske HE	-	100 – 500 EUR
Komprimirani zrak	-	40 – 100 EUR

Supravodljivi magnetski svitak ima daleko veći broj životnih ciklusa u odnosu na ostale tehnologije. Zbog svojih velikih spremišta crpno-akumulacijske HE i komprimirani zrak nisu navedeni jer se te tehnologije koje se grade na specifičnim mjestima uz nekoliko godina planiranja unaprijed.

## 4. ZAKLJUČAK

Kako bi se smanjio utjecaj izgaranja fosilnih goriva na okoliš teži se proizvodnji energije iz obnovljivih izvora energije. Nedostatak obnovljivih izvora energije je tzv. isprekidana dostupnost energije, što rezultira razlikom u potražnji i proizvodnji u nekom trenutku, te dolazi do nestabilnosti mreže. Problem je posebno izražen kod kojih proizvodnja ovisi o dobu dana i vremenskim uvjetima. Rješenje problema nalazi se u sustavima za pohranu električne energije. U razdoblju velike proizvodnje višak energije se pohranjuje u sustavima za pohranu, te kada dođe do povećane potražnje, pohranjena energija se može iskoristiti za proizvodnju električne energije. Samim time osigurava se kontinuirana i pouzdana isporuka električne energije prema potrošačima. Dugoročnim korištenjem ovih sustava pohrane energije mogu se postići značajne uštede unatoč visokim cijenama izgradnje pojedinih sustava za pohranu. Važno je napomenuti kako su spomenute novije tehnologije skladištenja energije još uvijek u razvoju, te će u budućnosti osigurati još jeftinije i efikasnije skladištenje energije.

## 5. LITERATAURA

- [1] International Electrotechnical Commission – IEC "Electrical Energy Storage", 2011.
- [2] Atle Harby, Julian Sauterleute, Magnus Korpås, Ånund Killingtveit, Eivind Solvang, Torbjørn Nielsen, Transition to Renewable Energy Systems, 2013 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [3] Energy.Storage.Association, dostupno na: <https://energystorage.org/why-energystorage/technologies/solid-electrode-batteries/>
- [4] Francisco Díaz-González, et al.: "Energy Storage in Power Systems", John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [5] IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 556, 9th Edition of the International SOLARIS Conference 30–31 August 2018, Chengdu, China
- [6] Bent Sorensen, Paul Breeze, Galen J. Suppes, Nasir El Bassam, Dr. Semida Silveira, Shang-Tian Yang, Aldo Vieira da Rosa, Harsh K. Gupta, Sukanta Roy, Mukesh Doble, Michel Broussely, Preben Maegaard, Frano Barbir, Gianfranco Pistoia, Soteris Kalogirou, Truman Storvick "Renewable Energy Focus Handbook" Elsevier Inc. 2009.
- [7] IEEE „Electrification magazine“, Volume 2, Number 2, June 2014.
- [8] Global Energy Network Institute "Energy Storage Technologie and their Roll in Renewable Energy Integration", 2012.
- [9] U.S. Department of Energy "Grid Energy Storage", 2013.
- [10] F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt “Energy 3 Storage in Power systems“, Wiley 2016.



## **SAŽETAK**

U ovom radu opisane su trenutne i nadolazeće tehnologije skladištenja energije. Navedene su prednosti i nedostaci pojedinih sustava, kratko su opisani principi rada i glavne karakteristike sustava zajedno s učinkovitosti, te cijenama sustava. Također, navedena su područja primjene i mjesta iz realnog svijeta gdje se koriste neke od navedenih tehnologija.

**Ključne riječi:** Sustavi pohrane, efikasnost, napon, baterija, elektrolit

## **ABSTRACT**

Current and upcoming energy storage technologies are described in this paper. The advantages and disadvantages of individual systems are listed, the operating principles and main characteristics of the system are briefly described along with the efficiency, as well as the price of the system. Also, areas of application and places from the real world where some of the mentioned technologies are used are listed.

**Key words:** Systems storage, efficiency, voltage, battery, electrolyte

## **ŽIVOTOPIS**

Ivan Zdjelarević rođen je 18. srpnja 2001. u Našicama. Nakon završenog smjera Tehničar za elektroniku u srednjoj školi Isidora Kršnjavoga u Našicama, upisuje preddiplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika na osječkom Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Svoj obrazovni put planira nastaviti upisom diplomskog studija Elektrotehnike. Od stranih jezika poznaje engleski u govoru i pismu.