

KONSTRUKCIJA I IZRADA VODIKOVE GORIVE ČELIJE

Štiglić, Sebastian

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:460441>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-06**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PRIJEDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

SEBASTIAN ŠTIGLIĆ

**KONSTRUKCIJA I IZRADA VODIKOVE
GORIVE ĆELIJE**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2023.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PRIJEDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

SEBASTIAN ŠTIGLIĆ

**KONSTRUKCIJA I IZRADA VODIKOVE
GORIVE ĆELIJE**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Filip Žugčić, mag.ing.el.

Karlovac, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Filipu Žugčiću, mag.ing.el. , kolegi Tihomiru, doc.dr.sc i svojoj obitelji na svoj pruženoj potpori i strpljenu tijekom studija i pisanja rada.

Sebastian Štiglic

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE | IV |
| POPIS OZNAKA | V |
| SAŽETAK..... | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. O gorivoj ćeliji | 1 |
| 1.2. Povijest..... | 2 |
| 1.3. Funkcija..... | 3 |
| 1.4. Karakteristična krivulja..... | 4 |
| 1.5. Primjena gorivih ćelija | 4 |
| 2. VRSTE GORIVIH ĆELIJA | 7 |
| 2.1. AFC (alkalne gorive ćelije)..... | 7 |
| 2.2. PAFC (goriva ćelija s fosfornom kiselinom) | 8 |
| 2.3. PEFC (goriva ćelija s polimernom membranom) | 9 |
| 2.4. SOFC (goriva ćelija s čvrstim oksidima)..... | 10 |
| 2.5. MCFC (goriva ćelija s rastaljenim karbonatima)..... | 11 |
| 3. KONSTRUKCIJA I IZRADA GORIVE ĆELIJE..... | 12 |
| 3.1. Uređaj za elektrolizu | 12 |
| 3.2. Goriva ćelija | 13 |
| 4. TESTIRANJE VODIKOVE ĆELIJE..... | 16 |
| 4.1. Test 1..... | 16 |
| 4.2. Test 2..... | 17 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 34 |
| PRILOZI..... | 35 |
| LITERATURA..... | 36 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Shema gorive ćelije..... | 1 |
| Slika 2. | Dizajn jednostavne gorive ćelije..... | 2 |
| Slika 3. | Goriva ćelija Williama Grove-a..... | 3 |
| Slika 4. | Karakteristična krivulja gorive ćelije..... | 4 |
| Slika 5. | Toyota Mirai..... | 6 |
| Slika 6. | Goriva ćelija korištena u Apollo programu..... | 6 |
| Slika 7. | Prikaz rada gorive ćelije s alkalnim elektrolitom..... | 8 |
| Slika 8. | Shema gorive ćelije s fosfornom kiselinom i PAFC modul Fuji electric..... | 9 |
| Slika 9. | PEFC korištena u automobilu..... | 9 |
| Slika 10. | Prikaz rada SOFC u obliku cijevi..... | 10 |
| Slika 11. | Goriva ćelija s rastaljenim karbonatima..... | 11 |
| Slika 12. | Alat i materijal korišten u izradi..... | 12 |
| Slika 13. | Izrezana metalna pločica s izbušenim rupama i brtvom..... | 13 |
| Slika 14. | Kučište metalne pločice i brtve prije sastavljanja..... | 14 |
| Slika 15. | Sastavljena goriva ćelija..... | 15 |
| Slika 16. | Goriva ćelija u izometrijskom presjeku..... | 15 |
| Slika 17. | Izvor napajanja (lijevo) i osciloskop (desno)..... | 16 |
| Slika 18. | Test očitavanja napona na gorivoj ćeliji..... | 17 |
| Slika 19. | Goriva ćelija nakon zamjene kućista..... | 18 |
| Slika 20. | Digitalni multimetar (desno) i izmjereni napon na ćeliji (lijevo)..... | 19 |
| Slika 21. | Promjena u elektrolitu i na elektrodi nakon elektrolize..... | 19 |
| Slika 22. | Grafički prikaz vrijednosti iz tablice 1..... | 21 |
| Slika 23. | Promjena na posudi uzorkovana korozijom..... | 23 |
| Slika 24. | Promjena na sendvič ćeliji..... | 23 |
| Slika 25. | Grafički prikaz mjerenja na ćeliji..... | 24 |
| Slika 26. | Grafički prikaz prema tablice 3..... | 26 |
| Slika 27. | Serijski spoj..... | 27 |
| Slika 28. | Grafički prikaz dobiven iz tablice 4..... | 28 |
| Slika 29. | Grafički prikaz prema tablice 5..... | 30 |
| Slika 30. | Srednje vrijednosti u serijskom i paralelnom spoju..... | 31 |
| Slika 31. | Srednje vrijednosti u zajedničkom načinu rada..... | 32 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Izmjerene vrijednosti napona na sendvič ćeliji u zajedničkom načinu rada..... | 20 |
| Tablica 2. Mjerenje na ćeliji 1..... | 22 |
| Tablica 3. Mjerenje na sendvič ćeliji..... | 25 |
| Tablica 4. Mjerenja napona na sendvič ćeliji u zajedničkom načinu rada - serijski spoj..... | 28 |
| Tablica 5. Mjerenje napona na sendvič ćeliji u serijskom spoju..... | 29 |
| Tablica 6. Usporedba srednjih vrijednosti izmjerenih na ćeliji..... | 33 |

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|----------|----------|---------------|
| <i>I</i> | A | Jakost struje |
| <i>P</i> | W | Snaga |
| <i>U</i> | V | Napon |

SAŽETAK

Tema završnog rada je konstruirati jednostavnu gorivu ćeliju. U nastavku ovoga poglavlja opisane su općenito gorive ćelije, njihova primjena, vrste gorivih ćelija, njihova povijest, opisan je njihov princip rada i dizajn i na kraju poglavlja uspoređene su gorive ćelije u odnosu na baterije. U drugom poglavlju se opisuje odabir dizajna i konstrukcija gorive ćelije. U trećem dijelu se opisuje pokus i dobiveni rezultati, a na kraju se nalazi zaključak o gorivim ćelijama.

Ključne riječi: goriva ćelija, vodik, katoda, anoda, elektrolit

SUMMARY

The topic of this work is to construct a simple fuel cell. In the continuation of this chapter, fuel cells are described, their application, types of fuel cells, their history, their working principle and design, and at the end of the chapter, fuel cells are compared in relation to batteries. The second chapter describes different types of fuel cell design and construction. The third part describes the experiment and obtained results, and last chapter is a conclusion about fuel cells.

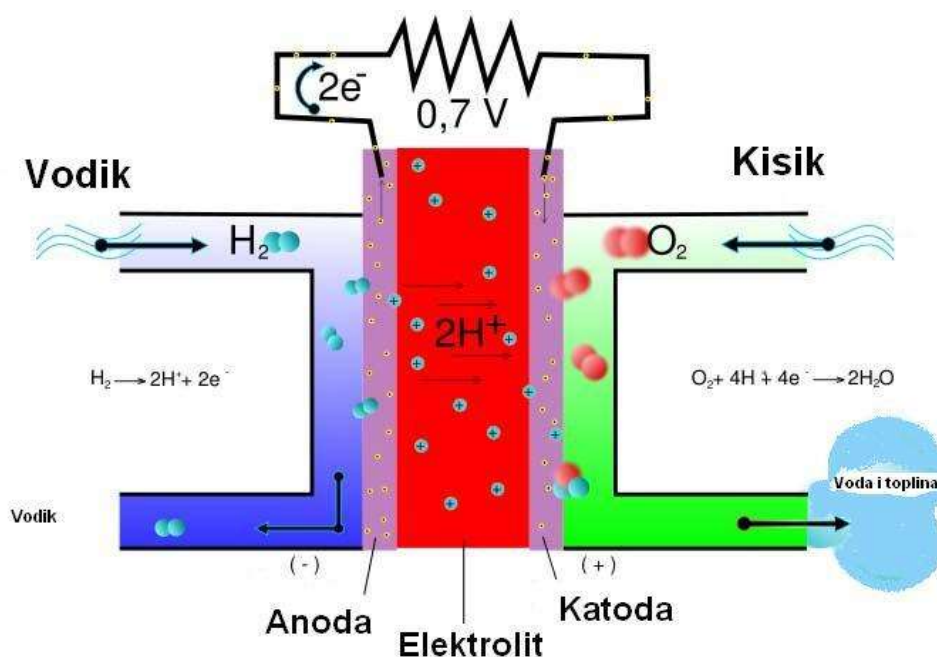
Keywords: fuel cell, hydrogen, katode, anode, electrolyte

1. UVOD

Produkt vodikovih gorivih ćelija je čista voda, pa su one vrlo ekološki prihvatljive. Najčešće se koriste kao pohrana i proizvodnja električne energije za elektroenergetski sustav, ali imaju svoju primjenu u automobilskoj industriji, a vrlo su popularan izbor kao izvor napajanja u svemirskim letjelicama i u vojnim svrhama gdje zasad visoka cijena nije problem.

1.1. O gorivoj ćeliji

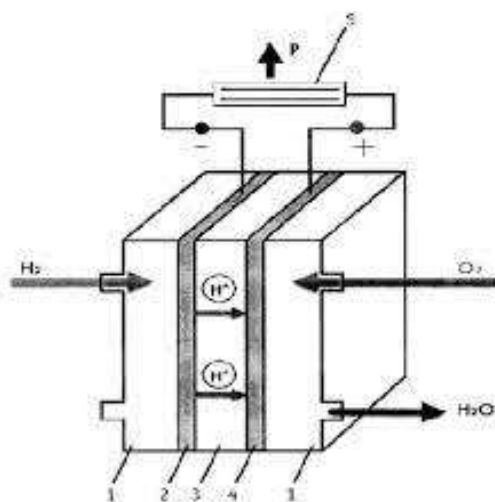
Gorive ćelije su uređaji koji neposredno pretvaraju kemijsku energiju goriva u električnu energiju, a sastoje se od dvaju elektroda (anoda i katoda) uronjenih u isti elektrolit. Slično baterijama, one stvaraju istosmjernu struju kroz kemijsku reakciju[1]. Goriva ćelija će proizvoditi uz električnu struju i određenu količinu topline. Gorivo je kemijski element vodik koji se dovodi na anodu gdje oksidira, a rezultat je oslobađanje elektrona koji putem vanjskog kruga dolaze na katodu. Elektroni na katodi reduciraju kisik, koji je oksidacijsko sredstvo u kemijskoj reakciji. Kemijska reakcija oksidacije je da atom vodika postaje ioniziran i nosi pozitivan električni naboj i kao takav može proći kroz elektrolit do katode. Negativno nabijeni elektroni prenose struju preko vodiča do trošila[2]. Kisik ulazi u gorivu ćeliju na katodi i tamo se spaja sa elektronima koji se vraćaju iz strujnog kruga i vodikovim ionima koji su putovali kroz elektrolit do katode, pri čemu nastaje voda.



Slika 1. Shema gorive ćelije

Elektroliti mogu biti tekući ili čvrsti[2]. Tekući elektroliti su tekućine koje otapaju ionske kristale ili rastopljive soli. Elektrode su metali ili materijali s poluvodičkim svojstvima čija površina katalizira kemijske reakcije. Kao katalizator obično se koristi platina. Elektrode moraju imati dobra mehanička svojstva, visoku specifičnu površinu i poroznost, i dobru otpornost na korozivno djelovanje elektrolita i spojeva koji nastaju kao rezultat reakcije.

Iz opisanog vidljivo je da je princip rada gorive ćelije sličan galvanskom članku, uz razliku što se gorivoj ćeliji konstantno dovodi gorivo.



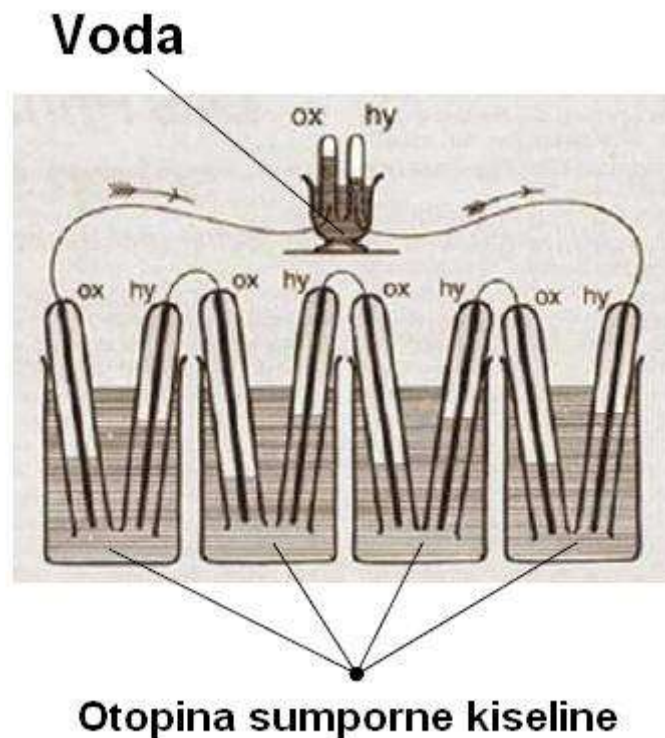
Slika 2. Dizajn jednostavne gorive ćelije

1-Ploče za protok plina, 2-Anoda, 3-Polimerna membrana, 4-Katoda, 5-Električno opterećenje

Napon koji se dobije od jedne gorive ćelije je premali za korisnu upotrebu, stoga se stotine ovakvih sklopova anoda-membrana-katoda spajaju serijski tako da čine više gorivih ćelija u jednoj.

1.2. Povijest

Otkrića koja su dovela do operative gorive ćelije smještaju se u rano 19. stoljeće, sa Sir William Robert Grove kome se pripisuje otkriće u 1839. godine[3]. On je otkrio da se elektrokemijskim spajanjem vodika i kisika dobiva električna struja. Budući da se pomoću strujnog generatora električni učinak mogao proizvoditi mnogo jednostavnije, gorive ćelije se nisu uspjele nametnuti.

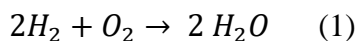


Slika 3. Goriva ćelija Williama Grove-a

Početkom 1930.-ih F.T. Bacon dolazi do rješenja da umjesto kiselinskog elektrolita koristi alkalni elektrolit. Zanimanja za gorive ćelije nije bilo sve do 1960.-ih kad su SAD za svemirski program odabrale gorive ćelije, koje su služile za opskrbljivanje vodom i električnom energijom u letjelicama[4].

1.3. Funkcija

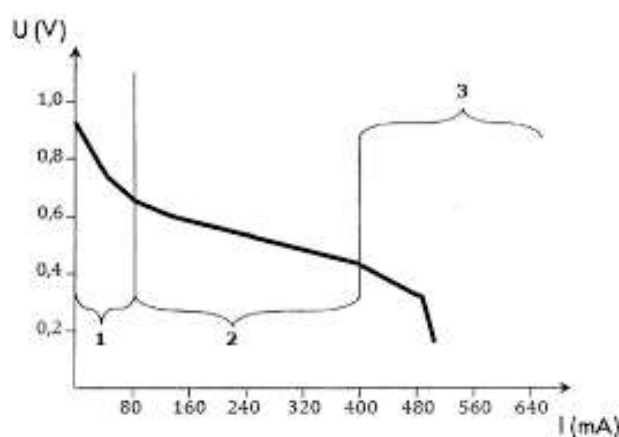
Kada govorimo o gorivim ćelijama najčešće se kao gorivo spominje vodik. Korištenje vodika kao goriva je 100% čisto, budući da on izgara reakcijom:



Ne samo da reakcijom (1) nastaje čista voda, već se ona može elektrolizom rastaviti na vodik i kisik te ponovno ući u reakciju. Jedan od koncepata vezanih za gorive ćelije jest da se višak energije iz obnovljivih izvora koristi za elektrolizu vode, nakon čega bi se dobiveni vodik spremio i iskoristio kasnije u razdobljima kada energije nedostaje (primjerice noću kada nema sunca). Tu dolazi do prednosti nad baterijom jer ne treba biti napunjena, i što elektrode se ne mijenjaju tijekom kemijskih reakcija. U bateriji, pohranjena energija je u samim elektrodama, dok u gorivoj ćeliji, energija je pohranjena u gorivu[2].

1.4. Karakteristična krivulja

Teorijski mogući napon vodikove gorive ćelije u idealnim uvjetima je 1,23V. U praksi, gubici u obliku unutarnjeg otpora i nedovoljne difuzije smanjuju tu vrijednost. Stvarni napon dobiven od individualne ćelije je od 0,4 do 0,9V [2]. Razlika između teorijskog i stvarnog (izmjerenog) napona se naziva nadpotencijal. Kod malih struja, karakteristična krivulja je određena katalitičnim procesima koji se odvijaju na elektrodama. Porast u struji ovisi o brzini spajanja vodika i kisika, odnosno brzini kojom elektroni prelaze kontaktnu površinu između molekula plina i katalizatora platine. Takav oblik nadpotencijala se zove aktivacijski nadpotencijal. Svaka ćelija ima unutarnji otpor, koji je uzrokovan otporom na tok struje u elektrolitu i vanjskim žicama. Ohmski pad napona dolazi do izražaja pri višim strujama, napon linearno pada s povećanjem struje. Difuzijski nadpotencijal se javlja ako su plinovi potrošeni brže elektrokemijskom reakcijom kod katalizatora nego što mogu doći do katalizatora kroz difuziju. Tipičan znak ovog difuzijskog nadpotencijala je iznenadno savijanje prema dolje strujno-naponske karakteristične krivulje. Napon se smanjuje oštro dok struja raste [2].



Slika 4. Karakteristična krivulja gorive ćelije

1.5. Primjena gorivih ćelija

Gorive ćelije se odlikuju visokim stupnjem djelovanja i vrlo malim utjecaja na okoliš, stoga im se predviđa značajan porast upotrebe u budućnosti. Stupanj djelovanja gorive ćelije je puno veći od ostalih termičkih procesa za proizvodnju energije i produkti izgaranja kod gorive ćelije ne sadrže štetne sastojke. No goriva ćelija nije bez problema, jedan od najvećih je upotreba plemenitih metala i platine kao materijala elektroda što značajno utječe na cijenu i time popularnost upotrebe gorivih ćelija. Jedan od najskupljih materijala u mnogim gorivim ćelijama, platina, također koristi

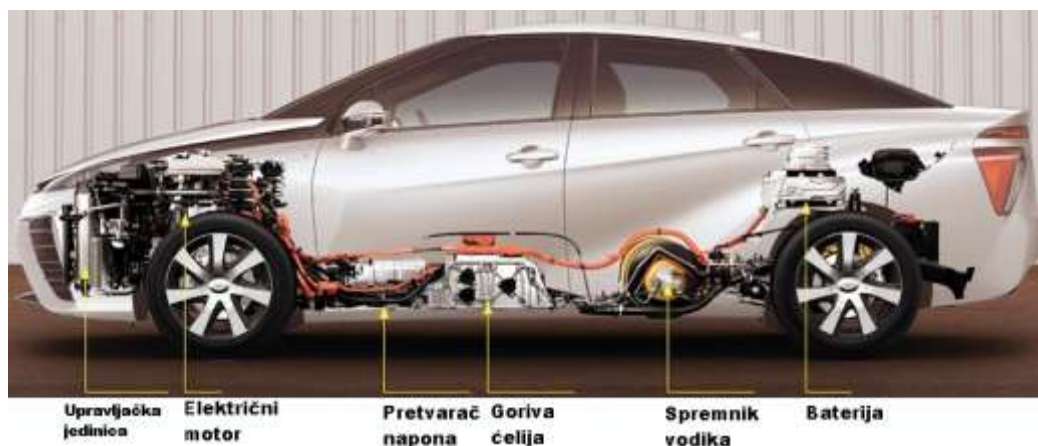
automobilska industrija u katalizatorima zbog potrebe smanjenja emisija ispušnih plinova [1].

Ako se uspiju pronaći alternativni materijali kao zamjena skupim metalima, upotreba gorivih ćelija će se značajno proširiti.

Jedna od sve popularnijih primjena gorivih ćelija je kao pogon automobila, posebice kao pogon transportnih vozila tipa kamiona zbog brzine punjenja gorivom koje je vremenski identično punjenju benzinom ili dizelom. Tu je očita prednost nad baterijskim električnim automobilima koji trebaju i po deset puta više vremena kako bi se napunili.

Pogonski motor bio bi istosmjerni električni motor napajan iz gorive ćelije. Potreban je DC-DC pretvornik koji se sastoji od dva modula koji upravljaju radom vozila. Prvi modul služi za pokretanje, a drugi za vožnju. Vodik se nalazi u visokotlačnom spremniku, a zračnim kompresorom opskrbljujemo ćeliju kisikom. Prilikom pokretanja vozila, pomoću 12 V akumulatora pokreće se zračni kompresor koji dovodi kisik u ćeliju, a tamo kisik stupa u kemijsku reakciju sa vodikom koji je doveden iz visokotlačnog spremnika i time dobivamo istosmjernu električnu struju kojom opskrbljujemo visokonaponsku sabirnicu. Prilikom procesa pokretanja, napon pretvaramo od niskog prema visokom pomoću DC-DC pretvarača. Kada sustav postigne stacionarno stanje, odnosno stabilni istosmjerni napon, vozilo može krenuti u vožnju. Tada struja dolazi do elektromotora koji pokreće automobil. Velika prednost FCEV vozila je što nema nikakvih ispušnih plinova, ali problem predstavlja vodik jer bi se morale izgraditi nova mreža crpnih postaja, no isti problem se javlja i kod baterijskih električnih automobila koji isto zahtijevaju izgradnju novih punionica.

Neki od automobila novije generacije na gorive ćelije su Hyundai Nexo, Toyota Mirai i tako dalje. Hyundai Nexo je predstavljen 2018. godine, a neki od najvažnijih podataka su mu snaga gorive ćelije 95 kW, snaga baterije 40 kW. Toyota Mirai je predstavljena 2015. godine, a ima snagu motora od 114 kW, a kapacitet baterije je 1,6 kWh.



Slika 5. Toyota Mirai

Gorive ćelije se osim u automobilskoj industriji koriste i kao izvori energije u teško pristupačnim područjima, istraživačkim stanicama, u vojnim misijama kao i u svemirskim postajama. Iako njihova popularnost se smanjuje u aplikaciji na ISS u korist visoko efikasnih solarnih panela [1]. Ima mnogo različitih tipova stacionarnih ćelija pa njihova efikasnost varira od 40 do 60%, ali kad se toplina koja je otpadni produkt gorive ćelije koristi za grijanje zgrada u kogeneraciji njihova efikasnost naraste i do 80%.



Slika 6. Goriva ćelija korištena u Apollo programu

2. VRSTE GORIVIH ČELIJA

Gorive ćelije se mogu podijeliti prema načinu rada i prema vrsti elektrolita.

Prema načinu rada se dijele na:

- Primarne gorive ćelije- tijekom rada potrebno je stalno dovodjenje novog goriva i oksidansa iz vanjskog spremnika, a produkti reakcije se odvođe.
- Sekundarne (regenerativne) gorive ćelije- reakcije se regeneriraju u polazne reaktante potroškom energije.

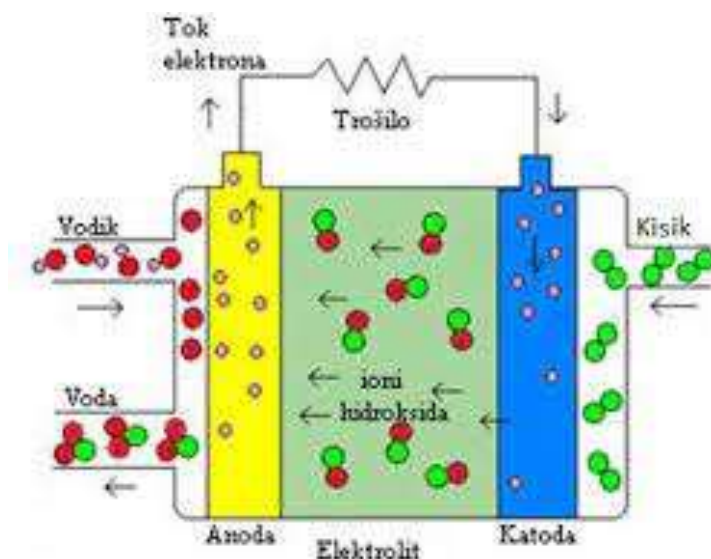
Prema vrsti elektrolita ćelije se dijele na:

- S alkalnim elektrolitom
- S fosfornom kiselinom
- S polimernom membranom kao elektrolitom
- S čvrstim oksidima kao elektrolitom
- S rastaljenim karbonatima kao elektrolitom

2.1. AFC (alkalne gorive ćelije)

Alkalne gorive ćelije koriste komprimirani vodik i kisik, a kao elektrolit se koristi lužnata otopina koja se nalazi unutar porozne matrice najčešće azbestne. Uglavnom se koristi otopina kalij-hidroksida sa vodom, a omjer ovisi o radnoj temperaturi. Kod viših radnih temperatura, oko 250 °C, koristi se 85%-tna otopina kalijevog hidroksida (kalijeve lužine), dok se kod nižih, oko 120 °C, koristi 35 – 50%-tna otopina [4]. Negativni ioni hidroksida (OH^-) idu od katode prema anodi. Vodikovi plinovi na anodi djeluju sa OH^- ionima pri čemu proizvode vodu i otpuštaju elektrone. Elektroni se pojavljuju na anodi, te opskrbljuju vanjski električni krug a potom se vraćaju na katodu, djeluju sa kisikom i vodom čime se stvara još iona hidroksida koji se šire kroz elektrolit. Stupanj djelovanja ima najviše do 50%. Veliki nedostatak je što za rad koristi vrlo čisti vodik budući da CO onečišćuje elektrode, a CO_2 reagira s elektrolitom stvarajući K_2CO_3 mijenjajući njegov sastav. Čak i mala koncentracija CO_2 je vrlo štetna. Ako se atmosferski zrak koristi kao oksidans tada se iz njega mora ukloniti CO_2 . Iako to nije tehnički komplicirano, povećava cijenu i veličinu uređaja. Kod ovog tipa članka potreban je katalizator, ali izbor nije ograničen samo na Pt, već se mogu koristiti i Bi, Ag, neki metalni oksidi te plemeniti metali. AFC ima dug životni vijek koji može dosegnuti preko 15000h i elektrode se mogu lako zamijeniti i elektrolit manje utječe na koroziju elektroda [5].

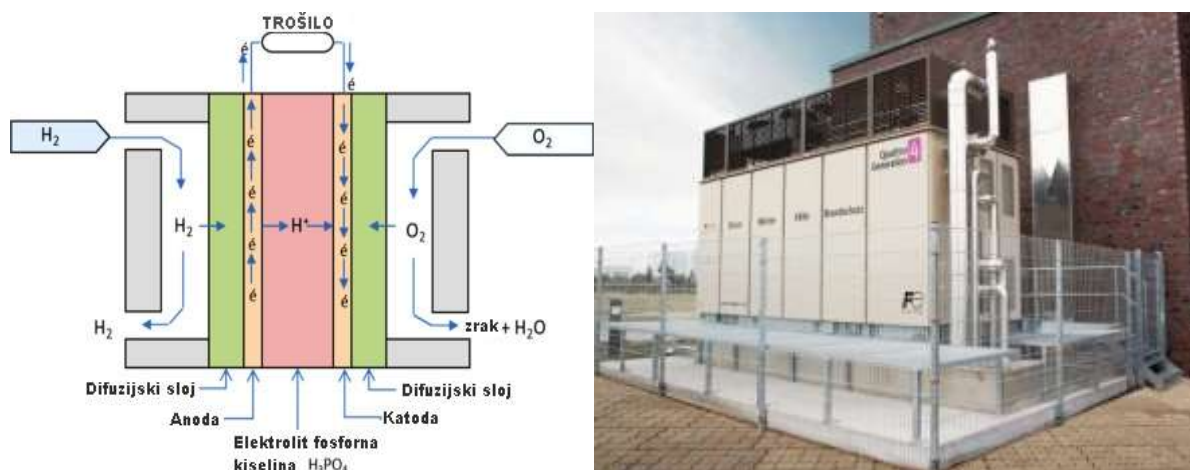
Ovaj tip gorivih ćelija jedan je od prvih razvijenih za praktičnu primjenu. Koristio se kao jedan od izvora energije u Apollo svemirskom programu [2]. Zbog više radne temperature osim za mobilne primjene razmatra se i kao stacionarni izvor energije .



Slika 7. Prikaz rada gorive ćelije s alkalnim elektrolitom

2.2. PAFC (goriva ćelija s fosfornom kiselinom)

Koristi se 100% koncentrirana fosforna kiselina kao elektrolit. Pozitivno nabijeni vodikovi ioni prolaze kroz elektrolit od anode prema katodi. Elektroni generirani na anodi putuju kroz vanjski električni krug, te se vraćaju na katodu, gdje elektroni, vodikovi ioni i kisik formiraju vodu. Za ubrzanje kemijske reakcije stavlja se na obje elektrode katalizator od platine. Radna temperatura ovog tipa ćelije se kreće između 150-200°C, jer je fosforna kiselina loš vodič pri nižim temperaturama. Stvaranje CO oko elektroda može zagađivati gorivu ćeliju, no manje je osjetljiva u usporedbi s AFC. PAFC može koristiti zrak umjesto čistog kisika [5]. Prednost PAFC ćelije je da koncentrirani fosforni kiselinski elektrolit može raditi iznad točke ključanja vode, dok je ograničenje nekih od kiselinskih elektrolita u tome da trebaju vodu za vodljivost. Nedostatak je što zbog kiseline potrebno je koristiti komponente ćelije otporne na koroziju. Vodik za ćeliju dobiva se iz ugljikovodikovih goriva pomoću vanjskih reformatora. Ako je gorivo benzin, mora se izdvojiti sumpor jer bi mogao oštetiti katalizator na elektrodama. Stupanj djelovanja PAFC ćelije iznosi prosječno do 30%, ali se može povisiti na 40% ako iskoristimo višu radnu temperaturu ćelije i primijenimo kogeneraciju. PAFC se uglavnom koristi u stacionarne primjene [6].



Slika 8. Shema gorive ćelije s fosfornom kiselinom i PAFC modul Fuji electric

2.3. PEFC (goriva ćelija s polimernom membranom)

Ova goriva ćelija koristi polimernu tvar kao elektrolit u obliku tankog, propusnog lista. Membrana je mala i lagana, a s obje strane membrane stavlja se katalizator od platine zbog ubrzanja reakcije. Elektrode i elektrolit su krute tvari a jedina tekućina je voda nastala elektrokemijskom reakcijom vodika i kisika. Kako bi ova ćelija radila, membrana mora propuštati vodikove protone ali spriječiti prolazak elektrona i težih plinova. Regulacija količine vode u ćeliji je ključna za učinkovit rad jer radni uvjeti moraju biti takvi da voda ne isparava brže nego što nova nastaje zato što elektrolitna membrana mora biti hidratizirana. Radna temperatura je zbog toga niža i kreće se u rasponu 60-80°C, što je prednost jer omogućuje brzo puštanje u rad i minimalizira probleme s korozijom. To ujedno olakšava izbor materijala za ćeliju. Nedostatak je što niža temperatura ograničava primjenu u kogeneraciji.



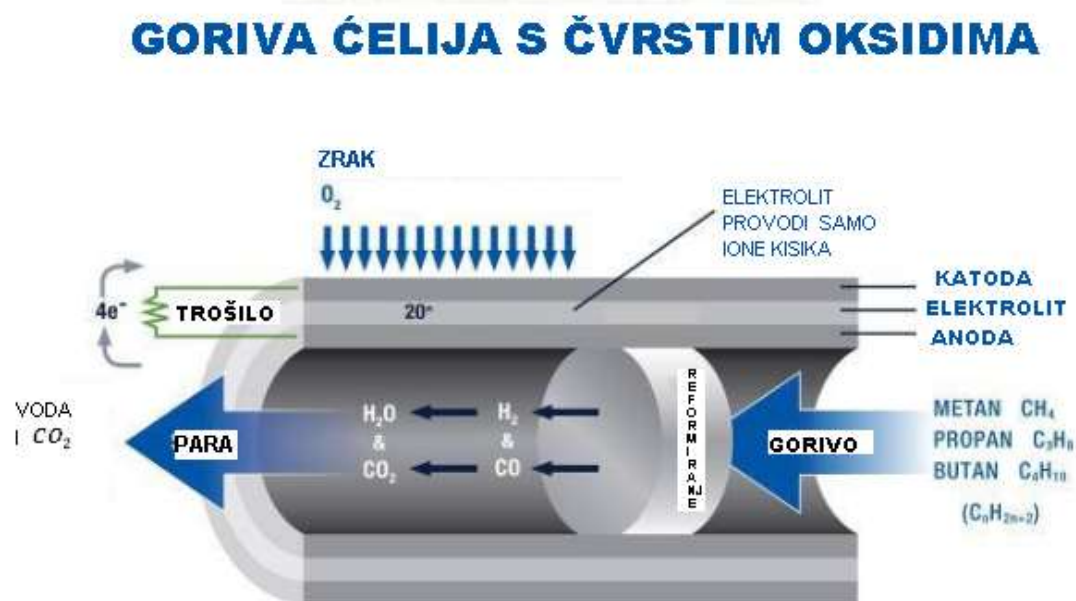
Slika 9. PEFC korištena u automobilu

Stupanj djelovanja PEFC ćelije se kreće do 60%, a osim čistog vodika kao gorivo može se koristiti metanol ili benzin, uz prethodno reformiranje.. S obzirom na snagu koju može razviti i činjenicu da ova ćelija radi na nižim temperaturama, dalji razvoj je usmjeren prema mobilnoj upotrebi, najviše u automobilskoj industriji. Kada se upotrebljava na vozilima, goriva ćelija pruža visoku učinkovitost i dobivamo vozilo s vrlo niskom emisijom [5].

2.4. SOFC (goriva ćelija s čvrstim oksidima)

Za SOFC ćeliju se umjesto tekućine koristi čvrsta keramika kao elektrolit, obično mješavina cirkonij-oksida i kalcij-oksida [2]. Čvrsti elektrolit sa obje strane je zatvoren elektrodama od specijalnog poroznog materijala. Pri visokim radnim temperaturama između 600-1000°C ioni kisika se počinju kretati kroz kristalnu rešetku. Kada plinovi goriva s vodikom prođu kroz anodu, negativno nabijeni ioni kisika krenu kroz elektrolit i oksidiraju gorivo. Elektroni generirani na anodi putuju kroz vanjski električni krug do katode. Stupanj djelovanja iznosi oko 50%, odnosno 70% ukoliko se koristi kogeneracija koja je logičan izbor zbog više radne temperature ćelije. Moguće su izvedbe SOFC ćelija u obliku mnoštva cijevi ili u obliku više ploča. Nije potreban katalizator niti je potrebno reformirati gorivo i izdvojiti vodik, ali zato je keramika skuplja. Kako SOFC radi na visokim temperaturama, prisustvo nečistoća nije veliki problem [5].

Nedostatak je temperaturno naprezanje materijala i korozija kod ostalih metalnih dijelova. SOFC tip članaka koristi se uglavnom za stacionarne primjene, iako se radi i na mobilnim [6].



Slika 10. Prikaz rada SOFC u obliku cijevi

2.5. MCFC (goriva ćelija s rastaljenim karbonatima)

Elektrolit kod ovog tipa ćelije obično je alkalijski karbonat sadržan u keramičkoj matrici $LiAlO_2$. Radna temperatura je u rasponu $600 - 700\text{ }^\circ\text{C}$ u kojem alkalijski karbonati formiraju visoko vodljivu rastopljenu sol, pri čemu karbonatni ioni pružaju ionsku vodljivost [4]. Na anodi, vodik djeluje sa ionima te se kao rezultat stvara voda, ugljični dioksid i elektroni. Elektroni putuju kroz vanjski krug (trošilo) i vraćaju se na katodu. Na katodi kisik iz zraka i CO_2 reciklirani na anodi djeluju sa elektronima stvarajući pri tome CO_3 ione, koji pune elektrolit i prenose struju kroz gorivu ćeliju. Prednost MCFC je što mogu izdvojiti vodik iz niza goriva koristeći ili unutarnji ili vanjski reformator. Time se omogućuje korištenje prirodnog plina kao goriva. Kao katalizator se koristi nikal, koji je jeftiniji od platine[2]. Upotreba takvog katalizatora uvelike smanjuje troškove. Nema problema s zagađenjem CO , štoviše i on elektrokemijski reagira.

Stupanj djelovanja ove ćelije doseže do 60%, a raspon snaga može biti od nekoliko kW do par MW. Nedostaci su visoke temperature koje povećavaju koroziju i skraćuju životni vijek materijala. Stoga potrebno je koristiti visokokvalitetni nehrđajući čelik kao konstrukcijski materijal. Razvoj ovih ćelija ide u smjeru stacionarne proizvodnje energije, zbog visoke radne temperature nije primjerena za mobilne upotrebe [6]. Ali zato je odlična za kogeneraciju.



Slika 11. Goriva ćelija s rastaljenim karbonatima

3. KONSTRUKCIJA I IZRADA GORIVE ĆELIJE

Projektiranje gorive ćelije vođeno je idejom upotrebe i recikliranja postojećih materijala koji su lako dostupni, kako bi ovaj pokus mogao biti s jednostavnošću izveden od strane zainteresiranih čitaoca.



Slika 12. Alat i materijal korišten u izradi

3.1. Uređaj za elektrolizu

Vodik kao gorivo je neophodan za izvođenje ovoga pokusa i stoga potrebno je koristiti vodik pohranjen u bocama ili napraviti uređaj s kojim bi se radila elektroliza vode i pritom dobilo dva elementa (vodik i kisik) potrebna za rad gorive ćelije. Postupak elektrolize je vrlo jednostavan, potreban nam je izvor struje, dvije elektrode, voda, kućište (posuda) u kojem će se odvijati reakcija i gumene cijevi za odvod nastalih plinova iz posude i dovod istih do gorive ćelije.

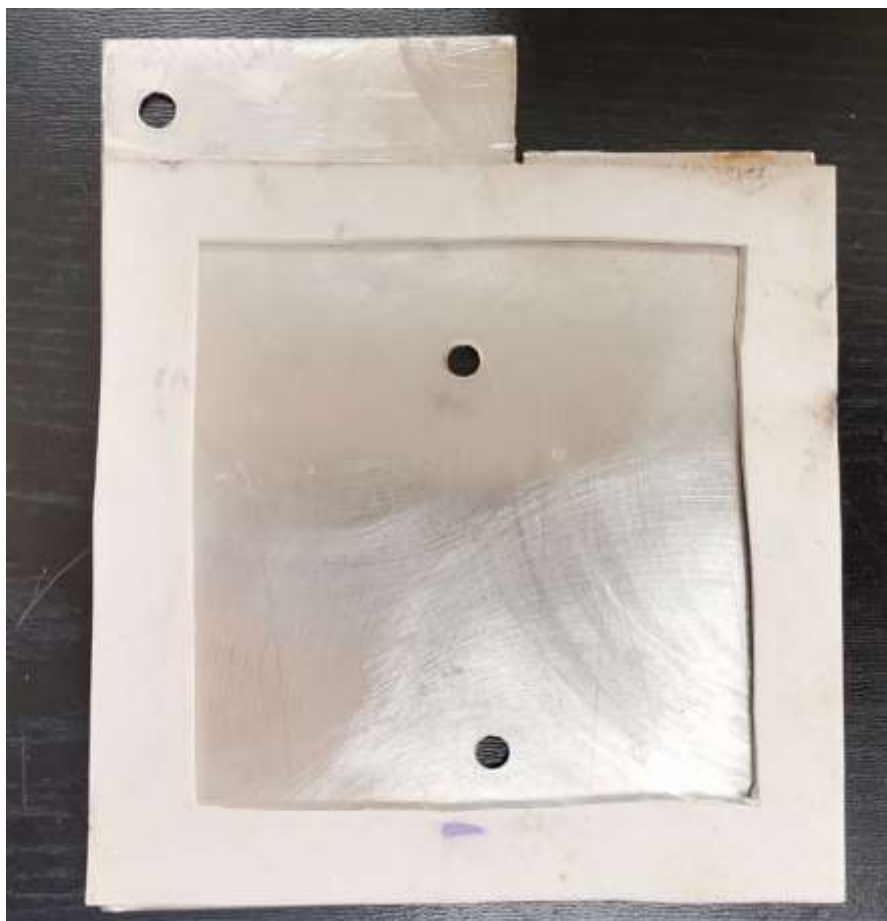
Za kućište je odabrana staklenu posudu s poklopcem zapremnine cca 3dcl. Na poklopcu su izbušene dvije rupe $\varnothing 8$ za elektrode i još dvije rupe $\varnothing 8$ kroz koje će se provući gumene cijevi unutarnjeg promjera 5mm. Kao elektrode koriste se čelične navojne šipke $\varnothing 6$ izrezane na mjeru 10cm. Za rezanje korištena je kutna brusilica i rezna ploča za čelik, a dio kontakta šipki sa poklopcem izoliran je sa gumom. Nakon što je sav materijal pripremljen, provučene su gumene cijevi i elektrode kroz poklopac na željenu poziciju i upotrijebljen je silikon za učvršćenje pojedinih elemenata a ujedno i kao izolacija. Nakon jednog dana silikon se osušio, a onda se testirala posuda ulijevanjem vode i spajanjem elektroda na izvor struje. Promatranjem primijećena

je pojava mjehurića oko elektroda što ukazuje na odvijanje reakcije elektrolize i dobivanja potrebnog goriva za ćeliju.

3.2. Goriva ćelija

Odabrani dizajn gorivih ćelija je tzv. sendvič konstrukcija, što znači da su korištene metalne aluminijske ploče kao elektrode koje slažemo jednu do druge a između ploča se nalazi elektrolit i tako u više slojeva.

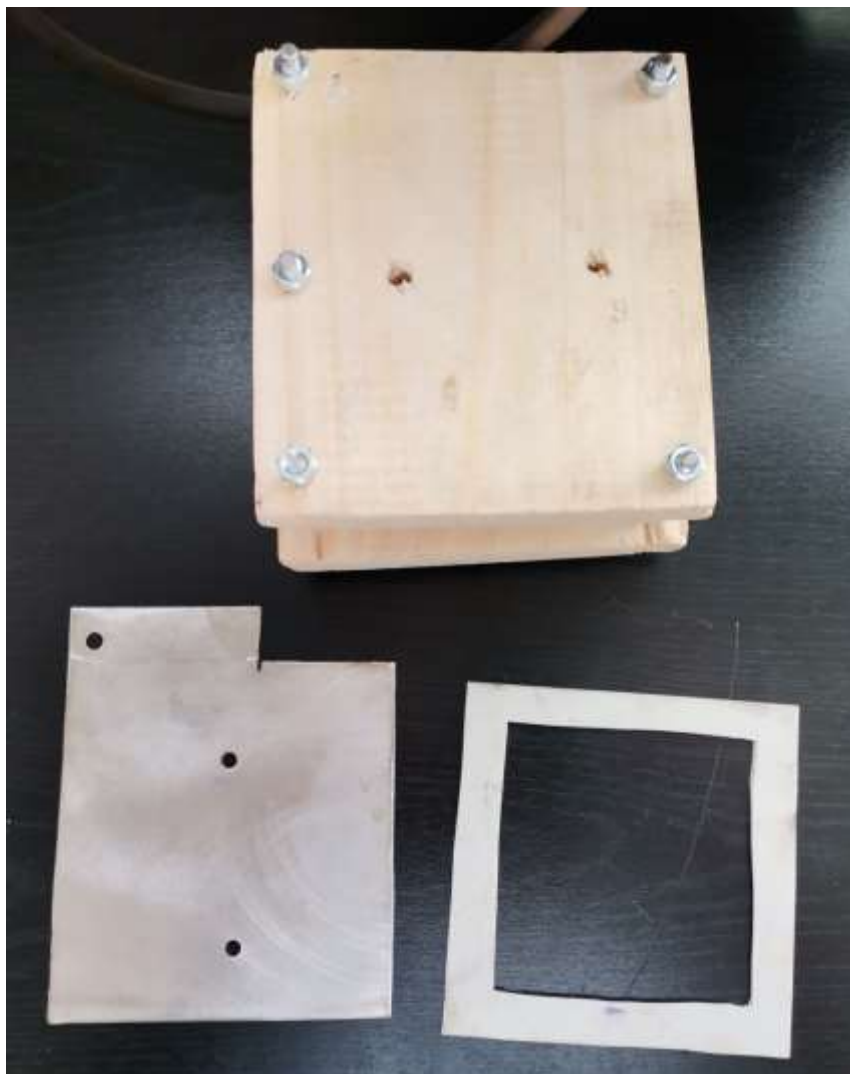
Aluminijska ploča je izrezana na pločice dimenzija 13x11cm koristeći kutnu brusilicu. Zbog ručnog izrezivanja i načina rezanja potrebno je poboljšanje rubova sa brusnom pločom, a dodatno je sve obrađeno sa brusnim papirom P60 kako bi dobili bolju kvalitetu površine.



Slika 13. Izrezana metalna pločica s izbušenim rupama i brtvom

Za kućište je odabran komad 1" daske koja je izbrušena, a zatim izrezana na dva komada potrebnih dimenzija.

Izbušene su potrebne rupe $\varnothing 6$ na metalnim pločicama i na kućištu kako bi se moglo sve sklopiti sa navojnom šipkom. Potom su izrezane gumene brtve dimenzija 11x11 cm, s 1 cm širinom brtve i debljinom 2 mm.



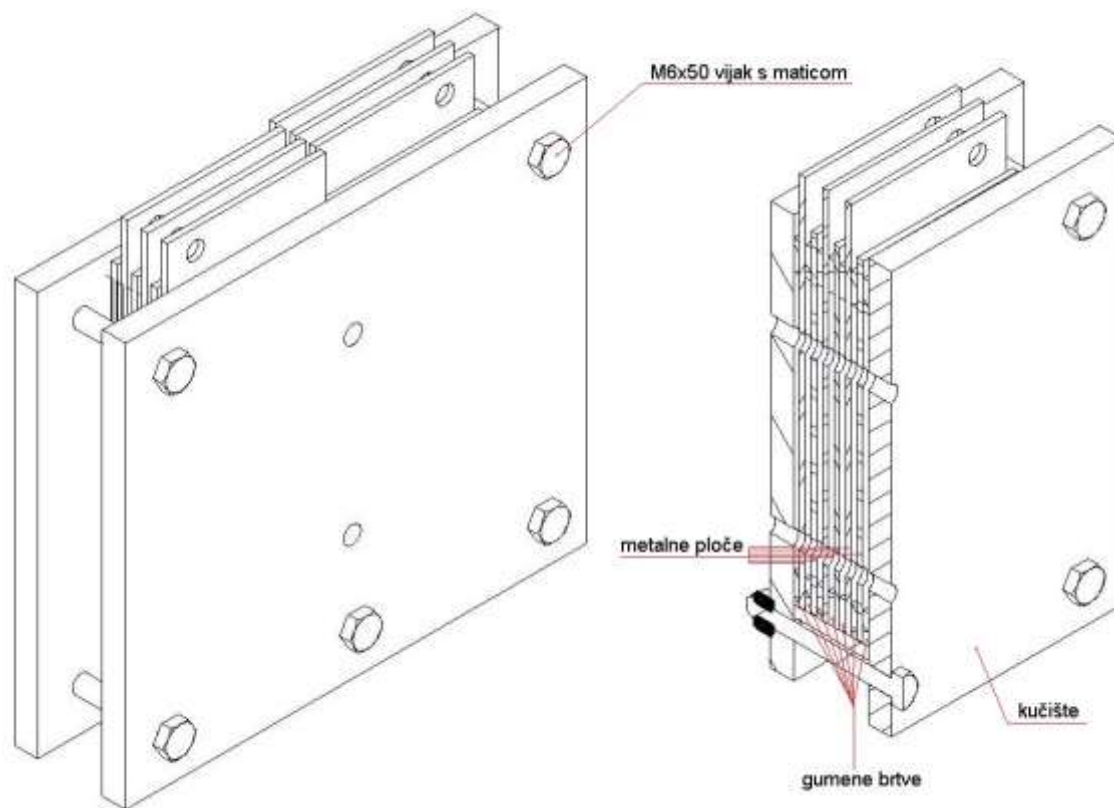
Slika 14. Kućište metalne pločice i brtve prije sastavljanja

Sastavljanje se odvijalo stavljanjem drvene ploče kao početne, gumene brtve na nju, zatim metalnu pločicu pa brtvu, drugu metalnu pločicu i ponavljanjem radnje dok se ne upotrijebe sve brtve i pločice, ukupno 6 pločica i 7 brtvi. Na kraju stavljena je druga drvena ploča, potom je provučeno pet šipki kroz zato predviđene rupe, stavljene matice i zategnute. Ukupna širina takve ćelije je iznosila 6,5 cm.

Posljednji korak je staviti gumene cijevi na zato predviđene rupe na kućištu i uliti elektrolit (vodu) kroz otvor. Ustanovljeno je da nema propuštanja elektrolita kroz gorivu ćeliju i time je izrada završena. Sljedeće što preostaje je spojiti izvor struje na posudu za elektrolizu i spojiti multimeter na gorivu ćeliju i očitati dobiveni napon.



Slika 15. Sastavljena goriva ćelija

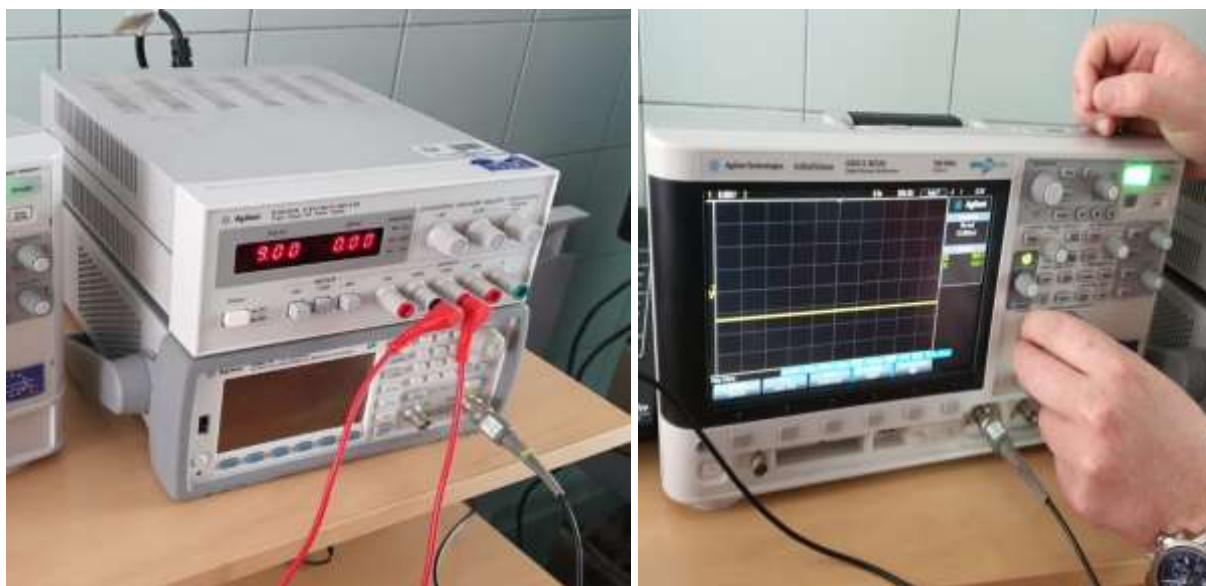


Slika 16. Goriva ćelija u izometrijskom presjeku

4. TESTIRANJE VODIKOVE ČELIJE

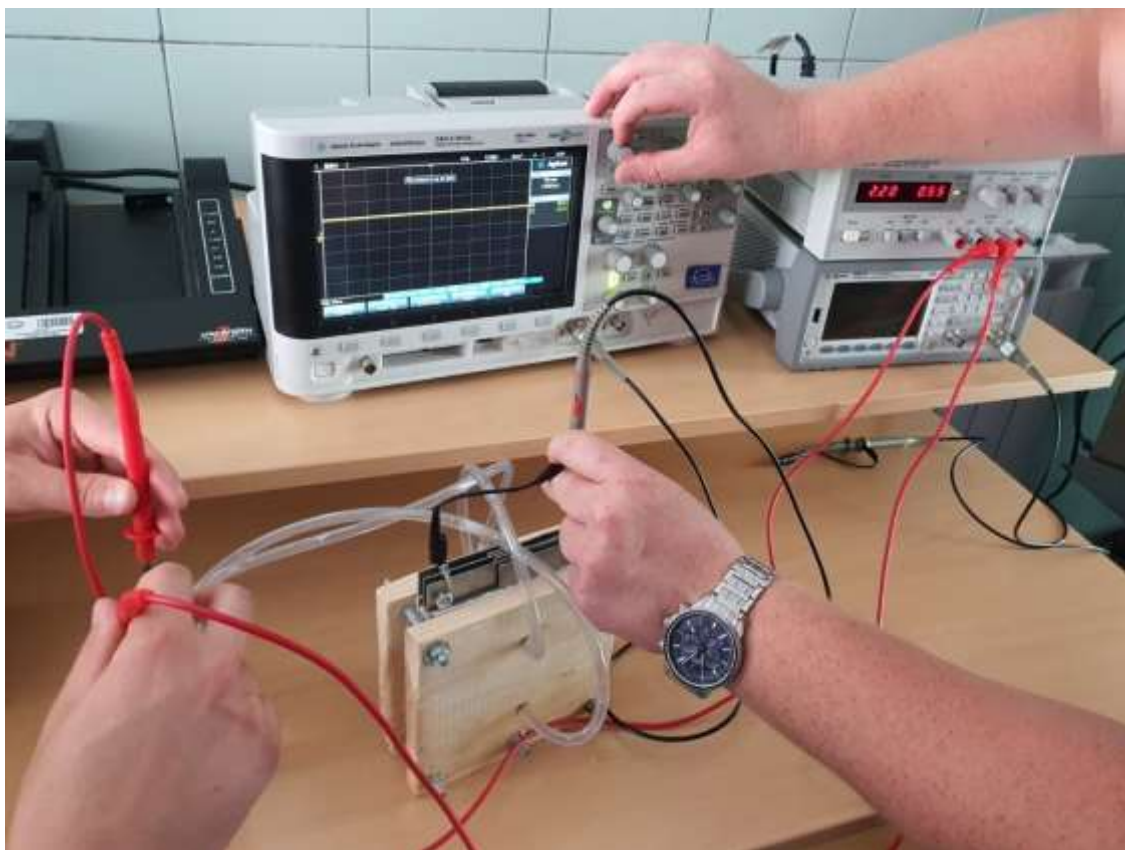
4.1. Test 1.

Testiranje je obavljeno u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu. Od opreme korišteni su izvor napajanja Agilent e3630a snage 35W s izlazom napona $\pm 20V$ i jakosti struje 0,5A, te osciloskop Agilent dso-x 2012a dvokanalni, pojasne širine 100MHz, 2GSPS.



Slika 17. Izvor napajanja (lijevo) i osciloskop (desno)

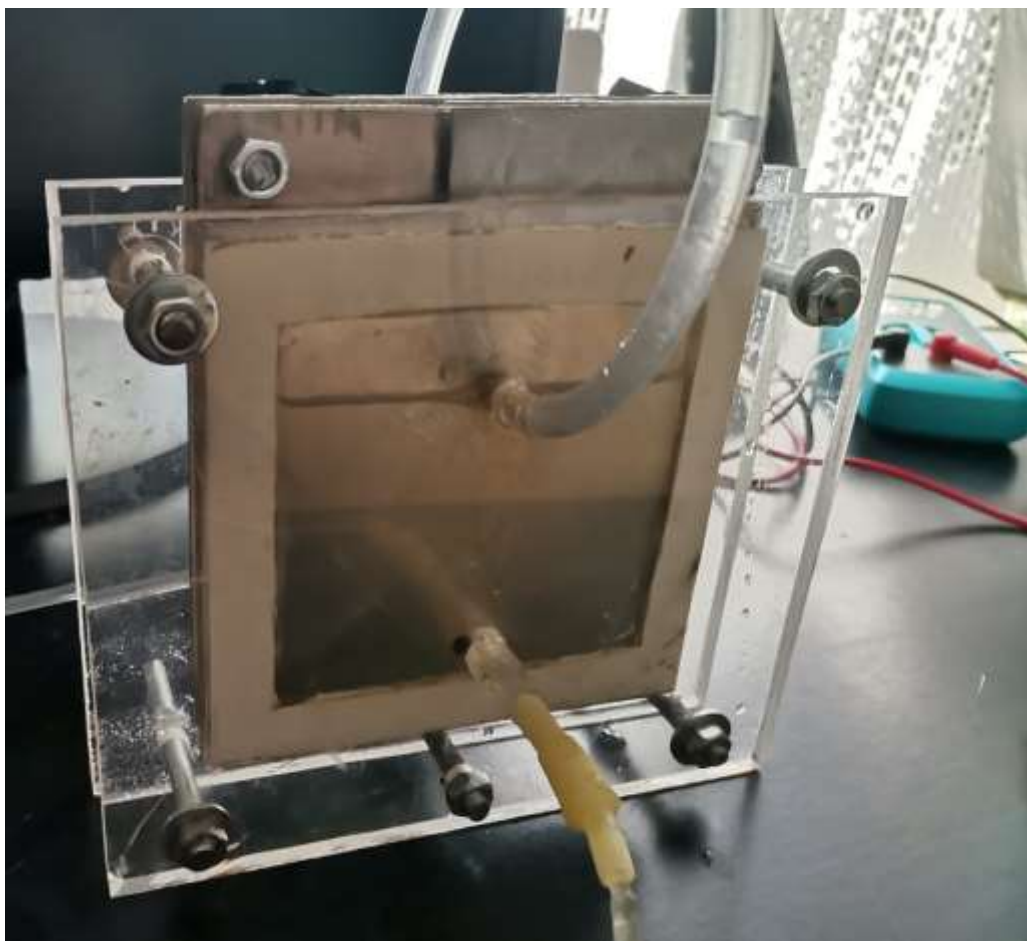
Izvor napajanja je spojen na posudu za elektrolizu, a osciloskop na gorivu ćeliju zatim je očitani dobiveni napon u vrijednosti od 0,055V. Potom je odspojen izvor napajanja sa posude za elektrolizu pa spojen osciloskop s kojeg je očitani napon u vrijednosti od 0,7V. U tom načinu rada posuda za elektrolizu radi u obrnutom smjeru i spajanjem vodika i kisika stvara struju. Time je pokazana prednost gorive ćelije u njezinoj mogućnosti rada u dva načina, stvaranja struje i elektrolize. Doznali smo pad napona zbog gubitaka u sustavu prijenosa vodika i kisika između posude za elektrolizu (izmjereno napon od 0,7V) i gorive ćelije (očitan napon 0,055V) i gubitaka zbog otpora u elektrodama, koji iznosi 12,7 puta. Efikasnosti posude za elektrolizu iznosi 3,3 puta, isporučeni napon napajanja iznosio je 2,32V, a izmjereno napon na posudi za elektrolizu 0,7V.



Slika 18. Test očitavanja napona na gorivoj ćeliji

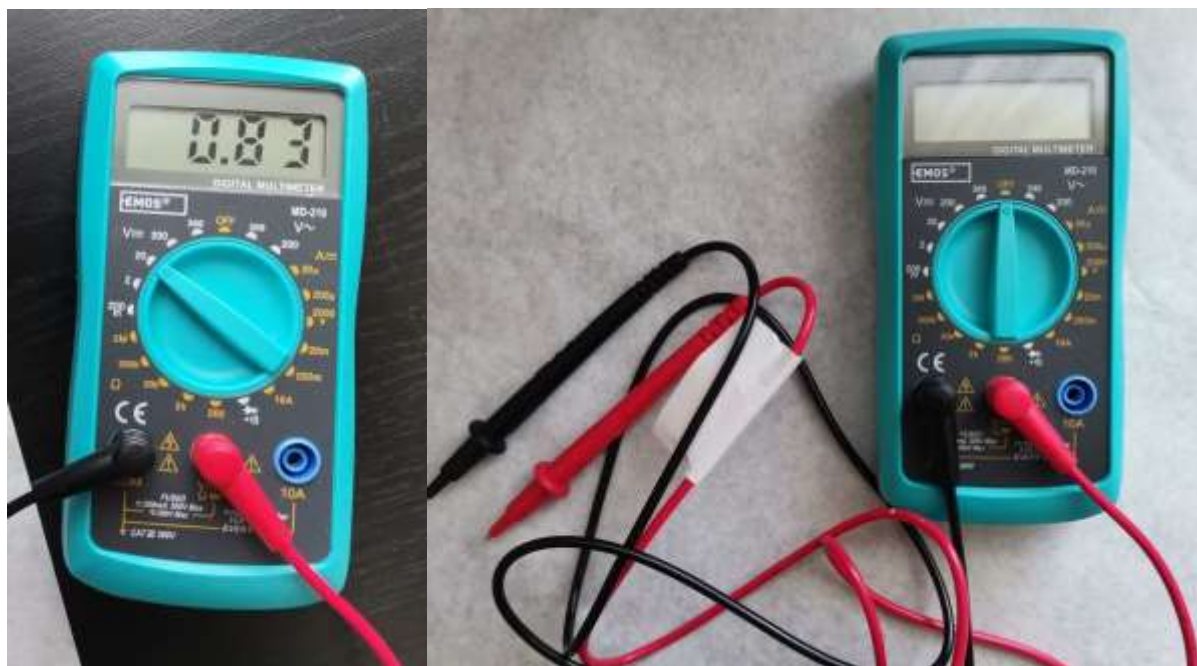
4.2. Test 2.

Nakon prvog testiranja primijećeni su nedostaci zbog izbora materijala kućišta gorive ćelije pa je isto zamijenjeno s dvije ploče pleksiglasa debljine 8mm, duljine 16cm i visine 14cm. Drvo se pokazalo lošiji izbor zbog upijanja elektrolita i problema sa brtvljenjem što je rezultiralo s postupnim gubljenjem elektrolita tijekom upotrebe ćelije. Sama zamjena je brzo i jednostavno napravljena, a karakteristika ćelije se neće tom promjenom promijeniti. Od preostalih komada pleksiglasa napravljena je nova posuda za elektrolizu dimenzija $D \times V \times \check{S} = 7,5 \times 16 \times 6 \text{cm}$. Korištene su elektrode istih dimenzija stoga očekuju se i identični rezultati na ponovljenom testu. Promjenu u dobivenim rezultatima se jedino očekuje zbog promjene promjera cijevi koje su smanjene kako bi se probali smanjiti gubici u prijenosu vodika i kisika između dviju komponenti i s time povećali efikasnost gorive ćelije.



Slika 19. Goriva ćelija nakon zamjene kućista

U ponovljenom testu mjerenje je obavljeno s digitalnim multimetrom EMOS md-210 s mogućnošću mjerenja u rasponu 200mV-300V DC. Izmjereni su naponi na posudi za elektrolizu nakon odspajanja izvora u iznosu od 0,72V koji postepeno opada kako se koncentracija proizvedenog vodika i kisika smanjuje. Posuda u režimu rada kao goriva ćelija pokazuje zanemarivu razliku u odnosu na prvi test što je u skladu s očekivanjem. Drugo mjerenje je izvedeno s izvorom spojenim na posudu, a multimetrom spojenim na gorivu ćeliju sendvič konstrukcije. Promjena u izmjerenom naponu na gorivoj ćeliji u odnosu na prvi test je mala, no najveća promjena je u samom transportu vodika i kisika koji je zbog manjeg promjera cijevi efikasniji pa ćelija puno brže kreće u rad i brže postiže maksimalni napon koji je moguće dobiti s ovim komponentama. Mjeren je i napon na sendvič konstrukciji nakon rada u modu elektrolize pa je nakon odspajanja izvora s istoga, spojen multimetar i izmjereni napon od 0,83V. Očekivano sendvič konstrukcija je efikasnija zbog veće površine elektroda a pošto se parovi ploča ponašaju kao zasebna ćelija, sendvič konstrukcija broji 3. ćelije u paralelnom spoju stoga jakost struje je uvećana u odnosu na jakost struje na posudi za elektrolizu.



Slika 20. Digitalni multimetar (desno) i izmjereni napon na ćeliji (lijevo)

Nakon obavljenog testa vidljive su promjene u elektrolitu i na navojnim šipkama korištenim kao elektrode, dok u sendvič konstrukciji promjene su samo u elektrolitu a na elektrodama nema primjetnih promjena zbog korištenja aluminijskih ploča.



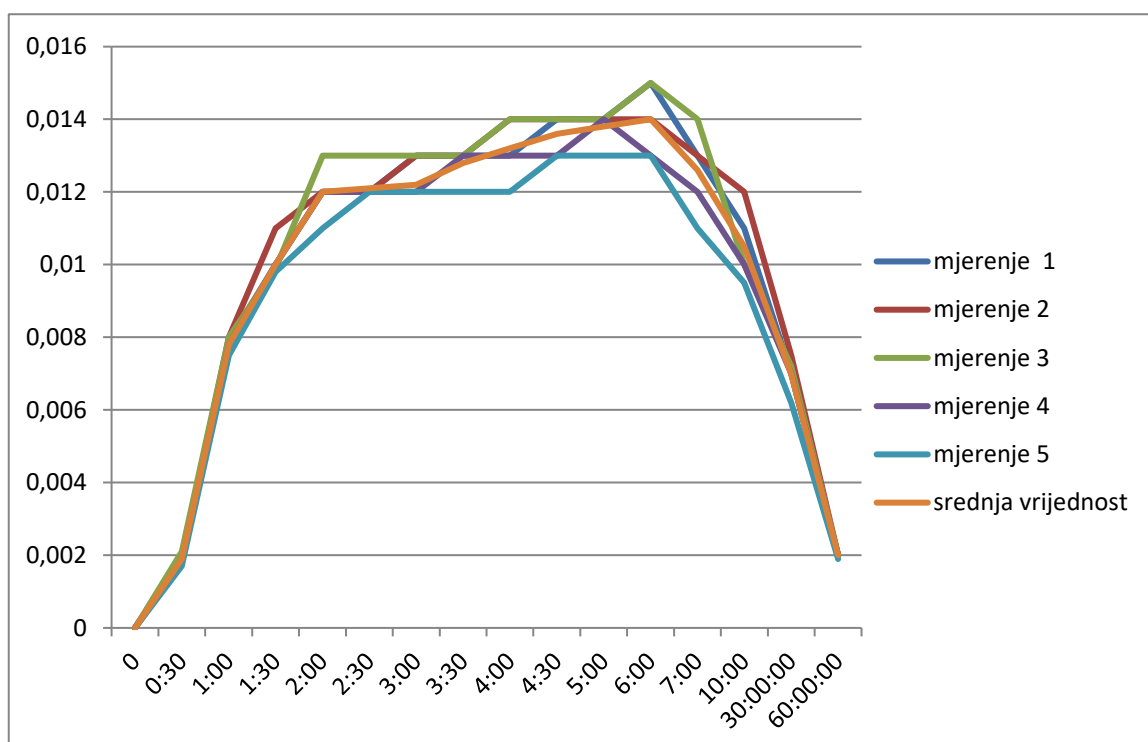
Slika 21. Promjena u elektrolitu i na elektrodi nakon elektrolize

Dodatna mjerenja su obavljena u razmaku od dva dana od prvog mjerenja, treće mjerenje nakon tjedan dana, četvrto mjerenje nakon dva tjedna i peto mjerenje nakon mjesec dana. Zbog uočenih promjena kod prvog mjerenja na elektrodama zbog djelovanja elektrolita, mjerenja su napravljena s većim vremenskim razmakom od prvotno planiranog rasporeda kako bi se bolje utvrdio utjecaj elektrolita na ćeliju. U tablici 1. unesene su vrijednosti napona izmjerene na sendvič ćeliji u zajedničkom radu s ćelijom za vršenje elektrolize. Vrijednosti označene crvenom bojom predstavljaju vrijednost očitane u trenutku odspajanja izvora s ćelije za elektrolizu, a time i prestanak stvaranja kisika i vodika.

Tablica 1. Izmjerene vrijednosti napona na sendvič ćeliji u zajedničkom načinu rada

| Vrijeme [min] | Broj mjerenja | | | | | Srednja vrijednost napona[V] |
|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|
| | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0:30 | 0.002 | 0.0019 | 0.0021 | 0.0018 | 0.0017 | 0.0019 |
| 1:00 | 0.0079 | 0.008 | 0.008 | 0.0078 | 0.0075 | 0.0078 |
| 1:30 | 0.01 | 0.011 | 0.0099 | 0.01 | 0.0098 | 0.01 |
| 2:00 | 0.012 | 0.012 | 0.013 | 0.012 | 0.011 | 0.012 |
| 2:30 | 0.012 | 0.012 | 0.013 | 0.012 | 0.012 | 0.0121 |
| 3:00 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.012 | 0.012 | 0.0122 |
| 3:30 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.012 | 0.0128 |
| 4:00 | 0.013 | 0.014 | 0.014 | 0.013 | 0.012 | 0.0132 |
| 4:30 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.013 | 0.013 | 0.0136 |
| 5:00 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.013 | 0.0138 |
| 6:00 | 0.015 | 0.014 | 0.015 | 0.013 | 0.013 | 0.014 |
| 7:00 | 0.013 | 0.013 | 0.014 | 0.012 | 0.011 | 0.0126 |
| 10:00 | 0.011 | 0.012 | 0.01 | 0.01 | 0.0095 | 0.0105 |
| 30:00 | 0.007 | 0.0075 | 0.0072 | 0.007 | 0.0062 | 0.00698 |
| 60:00 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.0019 | 0.002 |

Zbog lakšeg pregleda izmjerene vrijednosti su iskazane i u grafičkom prikazu [slika 22.]. Vidljiv je vrlo mali pad vrijednosti kod kasnijih mjerenja zbog utjecaja korozije na elektrode i utjecaja na elektrolit. Uočljivo je odstupanje od 30 sekundi zbog uključanja i potrebe za zasićenjem kao i zbog gubitaka u transferu kisika i vodika do sendvič ćelije. Potom je vidljiv brzi rast napona u rasponu od 30 sekundi do 1:30 minute, a potom blagi rast do maksimuma u šestoj minuti. Blagi rast napona je u skladu s očekivanjima da će proizvedeni vodik i kisik u ćeliji za elektrolizu nastaviti transport do sendvič ćelije i nakon odspajanja izvora u trećoj minuti u cilju izjednačavanja koncentracija vodika i kisika u sustavu. To je jedan od razloga zašto imamo izuzetno blagi pad napona na ćeliji, zato i nakon sat vremena uspijevamo očitati napon na ćeliji.



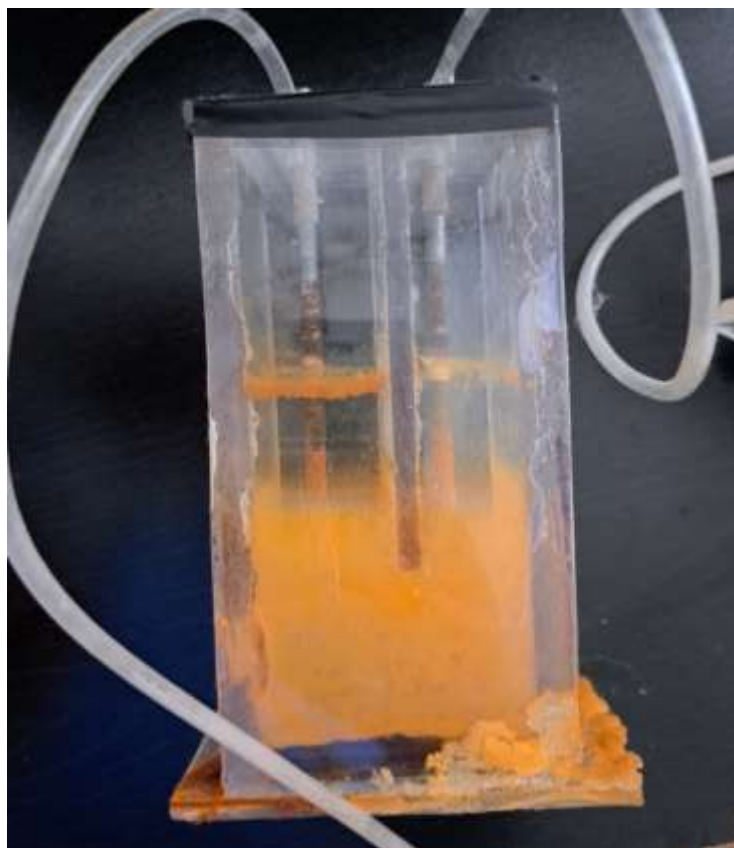
Slika 22. Grafički prikaz vrijednosti iz tablice 1.

Tablica 2. prikazuje vrijednosti izmjerene na ćeliji za elektrolizu u vremenskom razdoblju od jednog sata. U vremenskom periodu od nula do 3. minute ćelija je spojena na izvor napona i vrši elektrolizu, a nakon 3. minute izvor odspajamo i ćelija radi u režimu proizvodnje napona. Maksimalan napon ostvaren na ćeliji sa spojenim izvorom je 0,73 V, što je ujedno i maksimalni napon koji bi ćelija mogla ostvariti sa stalnim dovodenjem vodika i kisika. Glavna prepreka takvoj konfiguraciji ćelije je definitivno izbor elektrolita i njegova količina u ćeliji, jer time se smanjuje ili povećava površina kontakta između elektroda i elektrolita. Stoga kod svakog mjerenja posvećena je pažnja razini elektrolita kako bi površina kontakta ostala ista kod svakog mjerenja.

Tablica 2. Mjerenje na ćeliji 1.

| Vrijeme [min] | Broj mjerenja | | | | | Srednja vrijednost napona[V] |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0:30 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.71 | 0.718 |
| 1:00 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| 1:30 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| 2:00 | 0.72 | 0.72 | 0.73 | 0.72 | 0.72 | 0.722 |
| 2:30 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.73 | 0.72 | 0.722 |
| 3:00 | 0.72 | 0.73 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.722 |
| 3:30 | 0.67 | 0.671 | 0.667 | 0.658 | 0.654 | 0.664 |
| 4:00 | 0.627 | 0.63 | 0.626 | 0.618 | 0.614 | 0.623 |
| 4:30 | 0.607 | 0.61 | 0.604 | 0.6 | 0.594 | 0.604 |
| 5:00 | 0.59 | 0.6 | 0.586 | 0.581 | 0.58 | 0.587 |
| 6:00 | 0.581 | 0.578 | 0.569 | 0.562 | 0.56 | 0.57 |
| 7:00 | 0.552 | 0.562 | 0.55 | 0.55 | 0.546 | 0.552 |
| 10:00 | 0.482 | 0.491 | 0.477 | 0.473 | 0.471 | 0.478 |
| 30:00 | 0.4 | 0.43 | 0.38 | 0.374 | 0.37 | 0.39 |
| 60:00 | 0.35 | 0.345 | 0.33 | 0.328 | 0.326 | 0.335 |

Cilj mjerenja je bio dobiti karakteristiku ćelije i provjeriti utjecaj korozije na elektrode pošto je materijal podložan koroziji. Rezultati mjerenja su pokazali manji utjecaj korozije na elektrode u vremenskom periodu od mjesec dana.



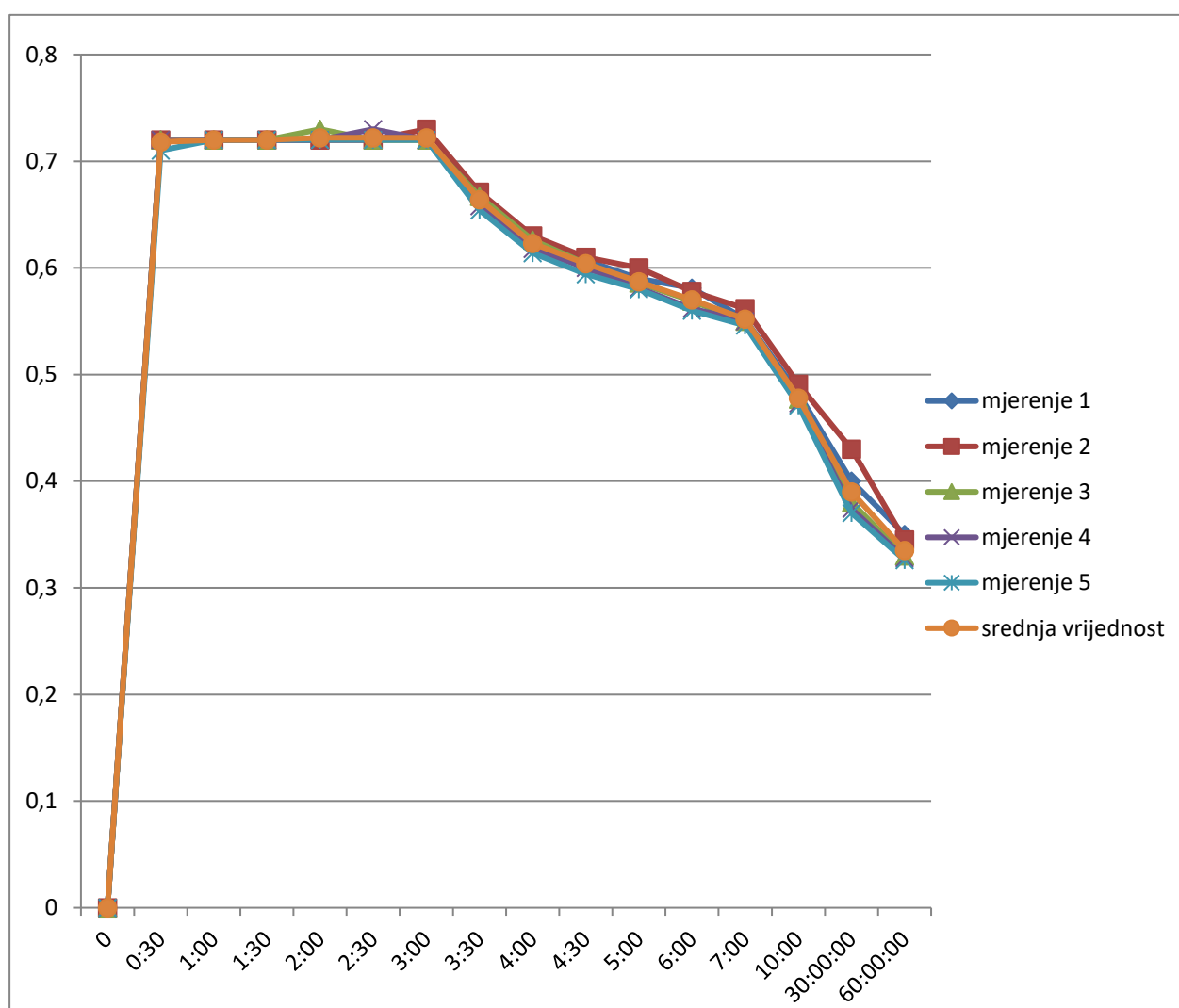
Slika 23. Promjena na posudi uzorkovana korozijom

Promjene na posudi [slika 23.] snimljena 3 mjeseca nakon posljednjeg mjerenja, ukazuje da dugoročno izlaganje elektrolita na elektrode dovodi do stvaranja sloja hrđe od nekoliko milimetara kao i kristaliziranja soli tijekom isparavanja vode.



Slika 24. Promjena na sendvič ćeliji

Promjena u elektrolitu na sendvič ćeliji nastala je jer tijekom transfera kisika i vodika između dviju ćelija došlo je do prijenosa dijela elektrolita a time i čestica hrđe. Hrđa je nastala i na području oko rupa na pločama zbog korištenja HSS svrdla koje je odradilo svoj zadatak, ali je kontaminiralo područje oko rupe prijenosom materijala sa svrdla na rupu i omogućilo nastajanje korozije. Za bolji učinak ubuduće potrebno nabaviti svrdla za aluminij i time spriječiti pojavu korozije. Ideja korištenja aluminija u konstrukciji sendvič ćelije bila je s ciljem izbjegavanja pojava korozije i time štetnog djelovanja na performanse same ćelije. Sama ideja je potvrdila pretpostavku da je aluminij bolji izbor u izgradnji ćelije unatoč nastalih manjkavosti tijekom izrade i time djelomično uspješno izvedenog pokusa.



Slika 25. Grafički prikaz mjerenja na ćeliji

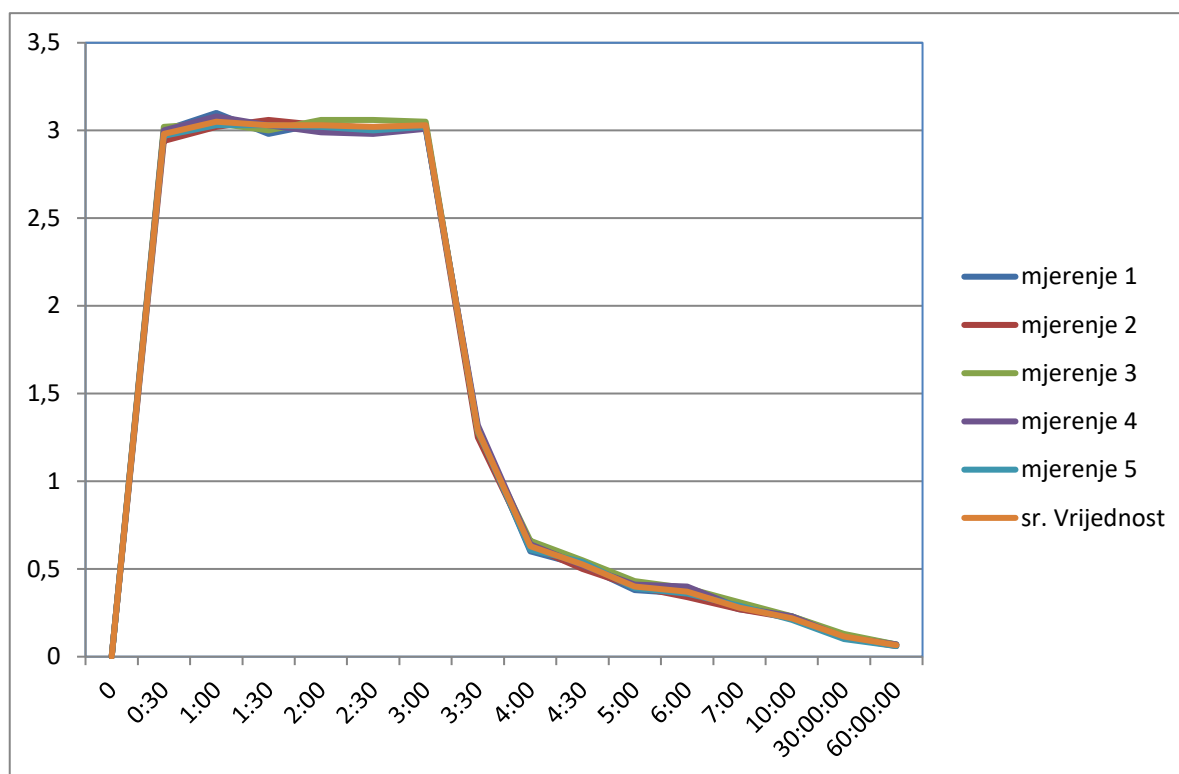
Sljedeće mjerenje je napravljeno na sendvič ćeliji kako bi se dobila karakteristika ćelije u paralelnom spoju. Mjerenje je obavljeno istim instrumentima i vremenskim odmakom kao i prijašnje mjerenje. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 3. Maksimalni napon očitani na ćeliji u vrijeme kad je spojena na izvor napona iznosi 3,1 [V], što predstavlja maksimalni mogući napon kojim ćelija može provoditi elektrolizu. Nakon odspajanja izvora s ćelije vidljiv je brži pad napona do četvrte minute a nakon četvrte minute slijedi blaži pad napona. Zadnji očitani napon iznosi 0,07 [V] što je značajnije manje nego kod prošle ćelije.

Tablica 3. Mjerenje na sendvič ćeliji

| Vrijeme [min] | Broj mjerenja | | | | | Srednja vrijednost napona[V] |
|---------------|---------------|------|------|------|------|------------------------------|
| | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0:30 | 3 | 2.94 | 3.02 | 3 | 2.97 | 2.98 |
| 1:00 | 3.1 | 3.02 | 3.04 | 3.08 | 3.03 | 3.05 |
| 1:30 | 2.98 | 3.06 | 3 | 3.03 | 3.03 | 3.03 |
| 2:00 | 3.04 | 3.03 | 3.06 | 2.99 | 3.02 | 3.03 |
| 2:30 | 3.01 | 3 | 3.06 | 2.98 | 3 | 3.02 |
| 3:00 | 3.03 | 3.02 | 3.05 | 3.01 | 3.02 | 3.03 |
| 3:30 | 1.3 | 1.25 | 1.28 | 1.32 | 1.29 | 1.29 |
| 4:00 | 0.6 | 0.63 | 0.66 | 0.64 | 0.61 | 0.63 |
| 4:30 | 0.52 | 0.5 | 0.55 | 0.52 | 0.54 | 0.525 |
| 5:00 | 0.38 | 0.4 | 0.43 | 0.41 | 0.39 | 0.4 |
| 6:00 | 0.36 | 0.34 | 0.39 | 0.4 | 0.36 | 0.37 |
| 7:00 | 0.27 | 0.27 | 0.31 | 0.28 | 0.29 | 0.28 |
| 10:00 | 0.23 | 0.22 | 0.23 | 0.23 | 0.21 | 0.22 |
| 30:00 | 0.12 | 0.11 | 0.13 | 0.11 | 0.1 | 0.115 |
| 60:00 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.066 |

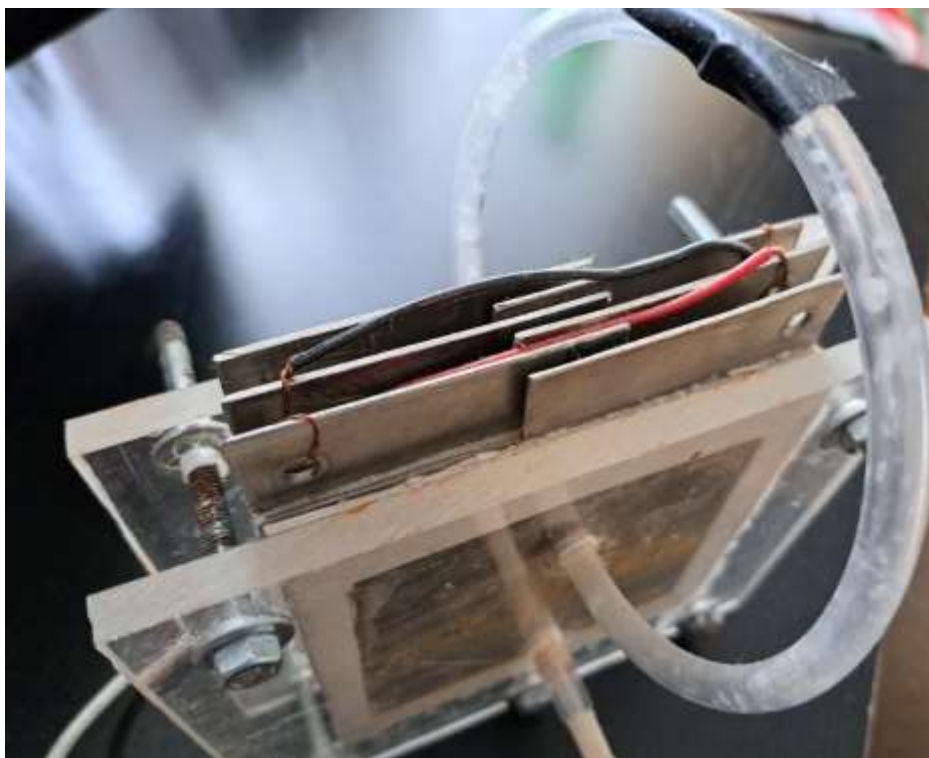
U usporedbi s karakteristikom na ćeliji 1 vidljiva je veća razlika u naponu od početka mjerenja do 3. minute gdje sendvič ćelija ima 4 puta veći napon. U razdoblju od 5. minute do kraja mjerenja

sendvič ćelija ima brži pad napona i konačni izmjereni napon je 5 puta manji nego na ćeliji 1. Razlika proizlazi iz površine elektroda koja je veća kod sendvič ćelije i količini elektrolita koja je manja i stoga imamo veći napon i brže pražnjenje tj. pad napona kod sendvič ćelije.



Slika 26. Grafički prikaz prema tablici 3.

Sljedeći korak je bio prespojiti ploče na sendvič ćeliji u konfiguraciju kako bi se dobio serijski spoj ćelija. To je učinjeno s dva komada žice dužine 10 cm kojima su se povezali negativan kraj s pozitivnim između prvog para ploča i drugog, kao i između drugog i trećeg para ploča [Slika 27.]



Slika 27. Serijski spoj

Mjerenje je napravljeno istim postupkom i mjernim instrumentima. Izmjereni rezultati su prikazani u tablici 4. iz koje je kasnije napravljen graf [Slika 28]. Ostvarena vrijednost u trenutku odspajanja izvora je iznosila 0.041[V], dok maksimalnu vrijednost od 0,077 [V] ćelija postiže u 10. minuti.

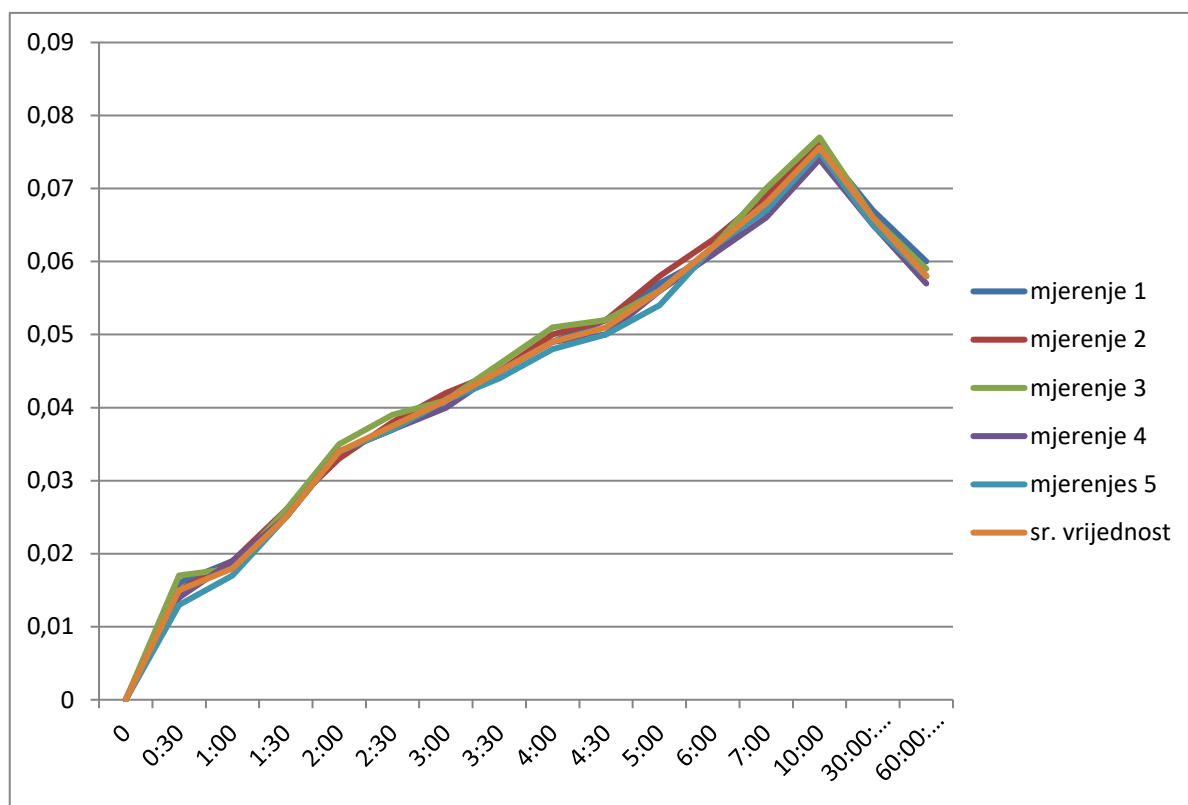
Tablica 4. Mjerenja napona na sendvič ćeliji u zajedničkom načinu rada - serijski spoj

| Vrijeme [min] | Broj mjerenja | | | | | Srednja vrijednost napona[V] |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0:30 | 0.016 | 0.015 | 0.017 | 0.014 | 0.013 | 0.015 |
| 1:00 | 0.019 | 0.019 | 0.018 | 0.019 | 0.017 | 0.018 |
| 1:30 | 0.025 | 0.026 | 0.026 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |
| 2:00 | 0.034 | 0.033 | 0.035 | 0.034 | 0.034 | 0.034 |
| 2:30 | 0.037 | 0.038 | 0.039 | 0.037 | 0.037 | 0.0375 |
| 3:00 | 0.041 | 0.042 | 0.041 | 0.040 | 0.041 | 0.041 |

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 3:30 | 0.045 | 0.045 | 0.046 | 0.045 | 0.044 | 0.045 |
| 4:00 | 0.049 | 0.05 | 0.051 | 0.049 | 0.048 | 0.049 |
| 4:30 | 0.052 | 0.052 | 0.052 | 0.05 | 0.05 | 0.051 |
| 5:00 | 0.057 | 0.058 | 0.056 | 0.056 | 0.054 | 0.056 |
| 6:00 | 0.061 | 0.063 | 0.062 | 0.061 | 0.062 | 0.062 |
| 7:00 | 0.068 | 0.069 | 0.07 | 0.066 | 0.067 | 0.068 |
| 10:00 | 0.076 | 0.076 | 0.077 | 0.074 | 0.075 | 0.0756 |
| 30:00 | 0.067 | 0.066 | 0.066 | 0.065 | 0.065 | 0.066 |
| 60:00 | 0.06 | 0.058 | 0.059 | 0.057 | 0.058 | 0.058 |

Iz grafa [Slika 28.] je lako uočljivo da ćelija ima skoro pa linearni rast napona do maksimuma u 10-toj minuti.

Između pet mjerenja nisu uočena veća odstupanja u dobivenim rezultatima.



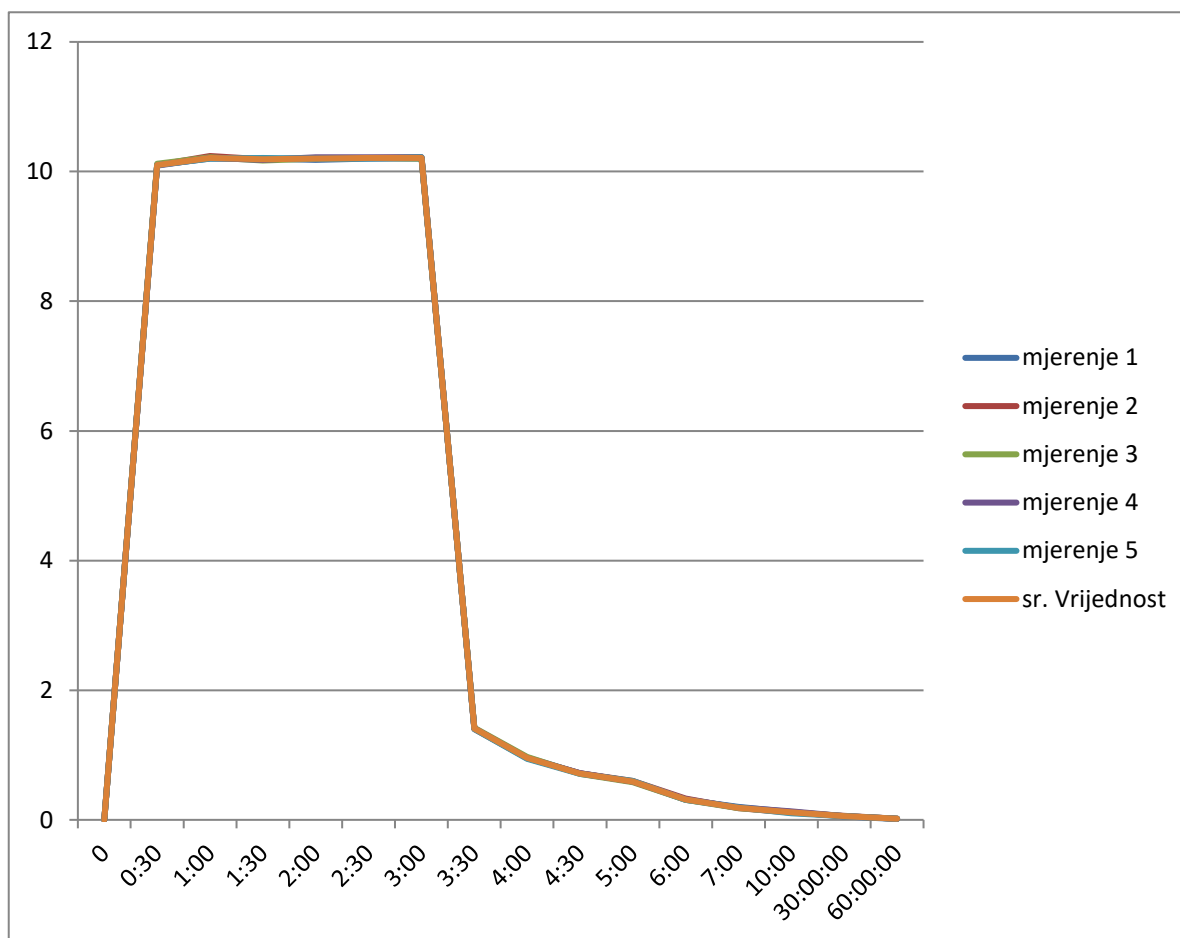
Slika 28. Grafički prikaz dobiven iz tablice 4.

Posljednji skup mjerenja je izvršen na sendvič ćeliji u serijskom spoju, izmjerene vrijednosti su prikazane u tablici 5. Nisu uočena značajnija odstupanja u mjerenjima što je u skladu s očekivanjima. Maksimalna vrijednost dok je ćelija spojena na izvor napajanja iznosi 10,24 V, a maksimalna prosječna 10,21 V. Trideset sekundi nakon odspajanja izvora napon pada na vrijednost od 1,4 V, nakon toga slijedi blaži pad napona sve do 0,016 V, koliko iznosi nakon sat vremena mjerenja.

Tablica 5. Mjerenje napona na sendvič ćeliji u serijskom spoju

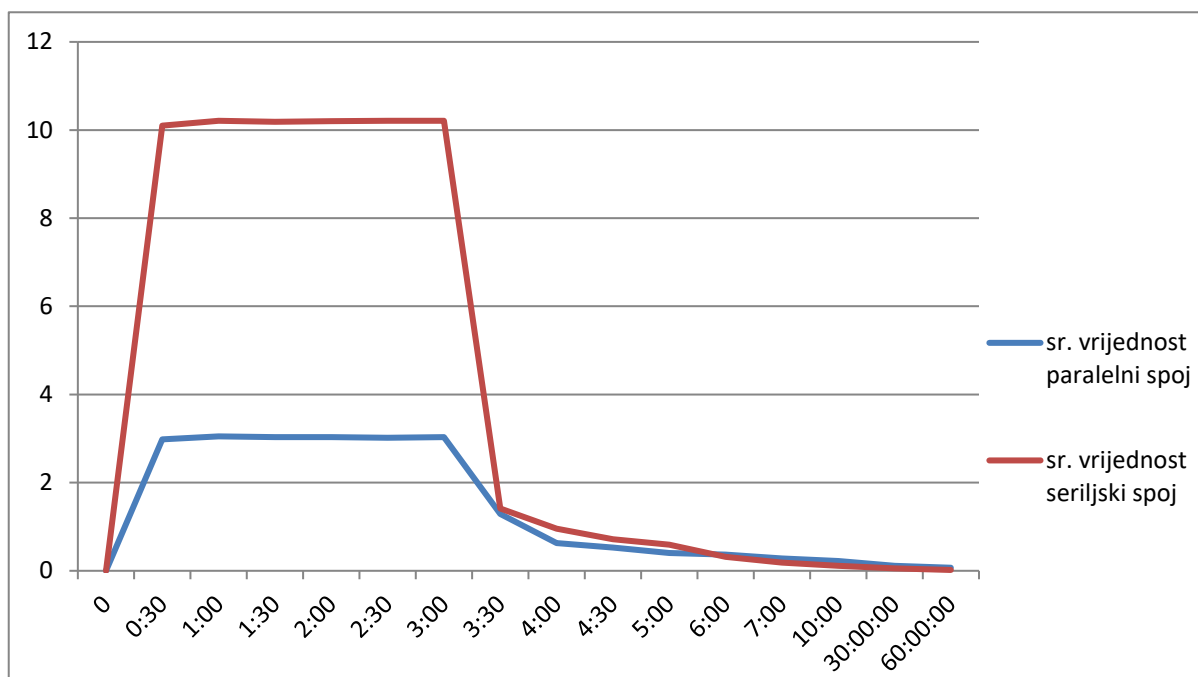
| Vrijeme [min] | Broj mjerenja | | | | | Srednja vrijednost napona[V] |
|------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|
| | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0:30 | 10.1 | 10.1 | 10.12 | 10.09 | 10.1 | 10.1 |
| 1:00 | 10.2 | 10.24 | 10.22 | 10.21 | 10.2 | 10.21 |
| 1:30 | 10.2 | 10.19 | 10.17 | 10.18 | 10.21 | 10.19 |
| 2:00 | 10.18 | 10.21 | 10.2 | 10.22 | 10.2 | 10.2 |
| 2:30 | 10.2 | 10.21 | 10.21 | 10.22 | 10.2 | 10.21 |
| 3:00 | 10.2 | 10.22 | 10.2 | 10.22 | 10.22 | 10.21 |
| 3:30 | 1.41 | 1.4 | 1.42 | 1.41 | 1.4 | 1.41 |
| 4:00 | 0.96 | 0.95 | 0.97 | 0.95 | 0.94 | 0.954 |
| 4:30 | 0.72 | 0.72 | 0.71 | 0.72 | 0.71 | 0.716 |
| 5:00 | 0.59 | 0.6 | 0.58 | 0.59 | 0.6 | 0.59 |
| 6:00 | 0.31 | 0.33 | 0.31 | 0.32 | 0.31 | 0.316 |
| 7:00 | 0.2 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 0.188 |
| 10:00 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.1 | 0.116 |
| 30:00 | 0.052 | 0.061 | 0.056 | 0.055 | 0.058 | 0.056 |
| 60:00 | 0.013 | 0.02 | 0.017 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |

Graf ispod [Slika 29.] prikazuje karakteristiku ćelije u serijskom spoju i ukazuje na minimalna odstupanja u mjerenjima i prosječnoj vrijednosti.



Slika 29. Grafički prikaz prema tablice 5.

Srednje vrijednosti napona na sendvič ćeliji u serijskom i paralelnom spoju su prikazane u grafu [Slika 30.] i ukazuju na značajniji porast u iznosu od 3,3 puta u odnosu na paralelni spoj. Očekivani porast kod prijelaza s paralelnog na serijski spoj iznosi 3 puta po Ohmovim zakonom, no dobiveni porast kod serijskog spoja iznosi 3,3 što je više i ukazuje da postoje dodatni gubitci u paralelnom spoju zbog izvedbe konstrukcije ćelije a koji ne dolaze do izražaja kod serijskog spoja. Zaključak je da zbog zajedničkog elektrolita ćelije se ne ponašaju u potpunosti s Ohmovim zakonom zato i dolazi do odstupanja no dovoljno su blizu rezultati da zadovolji očekivanja ovoga pokusa.

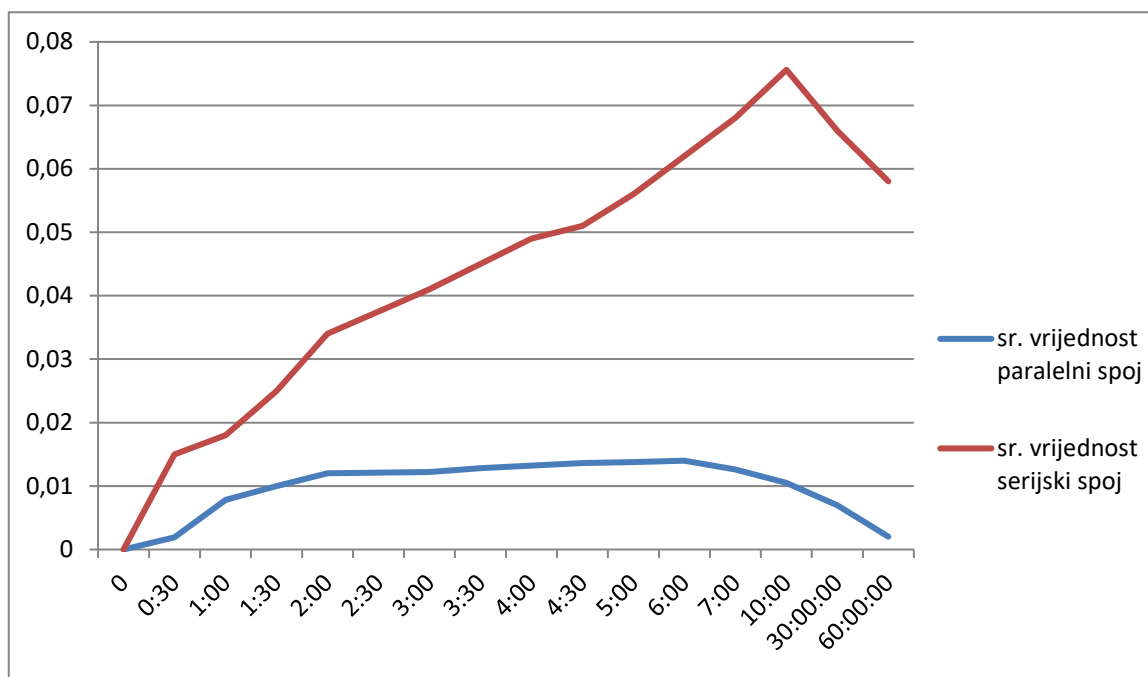


Slika 30. Srednje vrijednosti u serijskom i paralelnom spoju

Iz grafa je vidljivo da ćelija u serijskom spoju ima brži porast kod spajanja na izvor napajanja i ima brži pada nakon odspajanja. U vremenu nakon odspajanja pa do kraja mjerenja uočeno je nešto brže pražnjenje ćelije a time i konačni izmjereni napon je niži u odnosu na paralelni spoj.

Slijedeći graf [Slika 31.] prikazuje karakteristiku ćelija u zajedničkom načinu rada u serijskom i paralelnom spoju.

S obzirom da karakteristika ćelije koja radi elektrolizu ostaje ista u oba načina rada i uz pretpostavku da nema bitnijih razlika u transferu vodika i kisika u cijevima do sendvič ćelije tijekom ponavljanja mjerenja, možemo zaključiti da je serijski spoj u većoj mogućnosti iskoristiti dostupnu količinu vodika i kisika.



Slika 31. Srednje vrijednosti u zajedničkom načinu rada

u razdoblju od tri minute stvorena je jednaka količina vodika i kisika i ista se dovodi do sendvič ćelije. Vidljivo je da serijski spoj ima značajniji porast napona i svoj maksimum od 0,077 [V] dostiže u desetoj minuti. Paralelni spoj ima blaži porast i maksimum od 0,015 [V] postiže u šestoj minuti. Očekivana razlika u naponu između ćelija je 3 puta u korist serijskog spoja, no mjerene vrijednosti ukazuju na 5 puta veću razliku. Zaključak je da dostupna količina vodika i kisika jednostavno ne može biti iskorištena kod paralelnog spoja u toj mjeri kako je očekivano pa zbog povrata vodika i kisika natrag prema ćeliji za elektrolizu dobivamo to odstupanje.

U tablici 6. nalaze se srednje vrijednosti izmjerene na ćelijama, a iz dobivenih vrijednosti lako je zaključiti da je serijski spoj puno logičniji izbor ukoliko tražena karakteristika zahtjeva veći napon i brže vrijeme postizanja maksimuma napona ovisno o količini dostupnog vodika. Ćelija za elektrolizu zbog svoje jednostavnosti izvedbe, služi nam kao referenta točka u usporedbi s složenijim tipom ćelija.

Crveno bojom u tablici označene su vrijednosti u trenutku prestanka produkcije vodika, što ujedno označava dobiveni maksimum za pojedinu ćeliju.

Tablica 6. Usporedba srednjih vrijednosti izmjerenih na ćeliji

| Vrijeme [min] | Mjerenje na: | | | | |
|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| | zajednički rad ćelija, paralelni spoj | zajednički rad ćelija, serijski spoj | samo sendvič ćelija, paralelni | samo sendvič ćelija, serijski | ćelija za elektrolizu |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0:30 | 0.0019 | 0.015 | 2.98 | 10.1 | 0.718 |
| 1:00 | 0.0078 | 0.018 | 3.05 | 10.21 | 0.72 |
| 1:30 | 0.01 | 0.025 | 3.03 | 10.19 | 0.72 |
| 2:00 | 0.012 | 0.034 | 3.03 | 10.2 | 0.722 |
| 2:30 | 0.0121 | 0.0375 | 3.02 | 10.21 | 0.722 |
| 3:00 | 0.0122 | 0.041 | 3.03 | 10.21 | 0.722 |
| 3:30 | 0.0128 | 0.045 | 1.29 | 1.41 | 0.664 |
| 4:00 | 0.0132 | 0.049 | 0.63 | 0.954 | 0.623 |
| 4:30 | 0.0136 | 0.051 | 0.525 | 0.716 | 0.604 |
| 5:00 | 0.0138 | 0.056 | 0.4 | 0.59 | 0.587 |
| 6:00 | 0.014 | 0.062 | 0.37 | 0.316 | 0.57 |
| 7:00 | 0.0126 | 0.068 | 0.28 | 0.188 | 0.552 |
| 10:00 | 0.0105 | 0.0756 | 0.22 | 0.116 | 0.478 |
| 30:00 | 0.00698 | 0.066 | 0.115 | 0.056 | 0.39 |
| 60:00 | 0.002 | 0.058 | 0.066 | 0.016 | 0.335 |

5. ZAKLJUČAK

U završnom radu opisano je pretvaranje kemijske energije u električnu energiju unutar gorivih ćelija. Teorijski dio završnog rada opisuje gorive ćelije, njihovu primjenu i princip rada s obzirom na izbor elektrolita. Gorive ćelije su tehnologija sa velikim potencijalom i velikim ograničenjima, ali i sve većim interesom zbog svoje ekološke prihvatljivosti. Opisan je problem u izradi gorivih ćelija zbog cijene materijala koji su potrebni za efikasniji rad i problem sa proizvodnjom i skladištenjem goriva koje predstavlja potencijalnu opasnost, te nedostatak infrastrukture ograničavaju značajniju upotrebu gorivih ćelija. U praktičnom dijelu opisana je sama izrada gorive ćelije, način testiranja s obrazloženim dobivenim rezultatima i prikazanim nedostacima kućne izrade gorive ćelije. Cilj ovog rada je uspješno obavljen s dobivenim rezultatima u skladu s očekivanjima.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

LITERATURA

- [1] Harold D. Wallace, Jr.: Fuel Cells: A Challenging History, 2019. Pristupljeno 23.06.2022.
- [2] Matija Orešković: Pretvorba kemijske energije gorivnih ćelija u električnu energiju u laboratoriju za OIE, Osijek, 2018.
- [3] [...] Full cell technology, College of Desert, Revision 0, 2001 Pristupljeno 14.06.2022.
- [4] Josip Ivanjko: Goriva ćelija, Zagreb, 2013
- [5] Fiseha M. Guangul, Girma T. Chala: A Comparative Study between the Seven Types of Fuel Cells, 2020. Pristupljeno 08.07.2022.
- [6] U.S. Department of Energy: Fuel Cell Handbook (Seventh Edition), U.S. Department of Energy, Morgantown, 2004. Pristupljeno 19.07.2022.