

# Ispitivanje učinkovitosti gorivnih ćelija male snage

---

**Bačak, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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:200:879692>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ISPITIVANJE UČINKOVITOSTI GORIVNIH ĆELIJA**  
**MALE SNAGE**

**Završni rad**

**Marko Bačak**

**Osijek, 2020.**

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. Pregled teme završnog rada .....	2
3. DIDAKTIČKO-MULTIMEDIJALNA OPREMA LUCAS-NÜLLE .....	3
3.1. Sastav i izgled makete .....	3
3.1.1. Princip rada gorivnih ćelija .....	3
3.1.2. Princip rada elektrolizatora .....	6
3.2. Pokusi za upoznavanje s opremom.....	8
3.2.1. Pokus mjerenja osnovnih veličina.....	8
3.2.2. Pokus dokazivanja kemijskog sastava vode.....	10
3.2.3. Pokus ispitivanja karakteristika elektrolizatora.....	11
3.2.4. Pokus mjerenja proizvedenog vodika .....	11
3.2.5. Pokus mjerenja stope propuštanja plinova .....	13
3.2.6. Pokus mjerenja potrošnje vodika .....	14
3.2.7. Ispitivanje karakteristika gorivnih ćelija .....	16
3.2.8. Ispitivanje učinkovitosti gorivnih ćelija .....	20
4. ISPITIVANJE UČINKOVITOSTI I ODREĐIVANJE RADNE TOČKE.....	24
4.1. Ispitivanje učinkovitosti .....	24
4.1.1. Ispitivanje učinkovitosti elektrolizatora u ovisnosti o struji .....	24
4.1.2. Ovisnost učinkovitosti gorivnih ćelija u serijskom spoju .....	25
4.1.3. Ovisnost učinkovitosti gorivnih ćelija u paralelnom spoj.....	27
4.1.4. Usporedba učinkovitost gorivnih ćelija za različite spojeve.....	29
4.2. Maksimalna učinkovitost sustava gorivnih ćelija i elektrolizatora .....	30
4.3. Određivanje radne točke sustava gorivnih ćelija i trošila.....	31
4.3.1. Žarulja sa žarnom niti.....	32
4.3.2. Istosmjerni električni motor male snage .....	34
5. ZAKLJUČAK .....	37
LITERATURA.....	39
SAŽETAK.....	40
ABSTRACT .....	41
ŽIVOTOPIS .....	42

# 1. UVOD

Zbog nedostatka konvencionalnih izvora električne energije i sve većeg zagađenja okoliša, svijet se okreće traženju alternativnih izvora za proizvodnju električne energije. Jedan od takvih izvora je i gorivna ćelija. Važna prednost je što kod procesa pretvorbe energije u gorivnoj ćeliji ne dolazi do stvaranja ugljičnog dioksida, koji je najveći krivac globalnog zagađenja, već je voda jedini nusproizvod. [1]

Kao i kod većine izvora energije tako i kod gorivnih ćelija bitnu ulogu ima stupanj djelovanja, odnosno učinkovitost pretvorbe energije. Ovaj rad opisati će rezultate nekoliko pokusa, počevši sa osnovnim pokusima ispitivanja karakteristike gorivnih ćelija, do ispitivanja učinkovitosti serijskog i paralelnog spoja. Usporediti će se vrijednosti učinkovitosti za različite spojeve ćelija, pri jednakim strujno-naponskim karakteristikama. Također ispitati će se učinkovitost sustava gorivnih ćelija i elektrolizatora. Na kraju će se odrediti radne točke pri spajanju različitih trošila na gorivne ćelije kao izvor energije.

Za izradu pokusa koristit će se Lucas Nülle oprema. Lucas Nülle maketa sadrži tri osnovna podsustava: elektrolizator, dvije gorivne ćelije, te skup trošila, među kojima se nalaze promjenjivi otpornik, električni motor i žarulja sa žarnom niti [2].

## 1.1. Zadatak završnog rada

Mjerenjem odrediti učinkovitost gorivnih ćelija male snage s pomoću didaktiko-multimedijalne laboratorijske opreme Lucas-Nülle. Koristiti različite spojeve dvije gorivne ćelije. Mjerenja provoditi u nekoliko radnih točaka i s različitim opterećenjima.

## 2. Pregled teme završnog rada

Razvoj gorivnih ćelija još je u tijeku, odnosno njihova tehnologija još nije dosegla sam vrhunac. Iako je njihova učinkovitost veća nego kod ostalih obnovljivih izvora električne energije, smatra se da postoji još mjesta za napredak.

Izračun učinkovitost pretvorbe energije gorivnih ćelija zahtjeva poznavanje toplinske vrijednosti vodika. Ovisno o toj vrijednosti razlikuju se ispitivanja učinkovitosti pretvorbe energije gorivnih ćelija.

J. Larminie u knjizi [3] objašnjava učinkovitost gorivnih ćelija sa kemijskog i fizičkog stajališta. Njegov rad govori da učinkovitost ovisi i o temperaturi, te maksimalni iznos učinkovitosti na sobnoj temperaturi iznosi 83%. Porastom temperature, granica učinkovitosti se smanjuje.

T. Bjažić je u doktorskoj disertaciji [4] dokazao teoretsku efikasnost od 83% na sobnoj temperaturi.

Bitno je napomenuti da su prethodna dva dokaza učinkovitosti temeljena na matematičkom modelu, gdje je učinkovitost puno veća nego pri praktičnoj primjeni.

H. A. Kazem je u radu [5] ispitao karakteristike gorivnih ćelija. U pokusima ispitivanja karakteristika radio je sa jednom gorivnom ćelijom, i najveća učinkovitost koju je postigao iznosila je 34%.

J. H. Hirschenhofer je u radu [6] odredio realnu učinkovitost pri normalnim uvjetima. Rezultati su 40,8% za gornju ogrijevnu vrijednost vodika, te 45,3% za donju ogrijevnu vrijednost vodika.

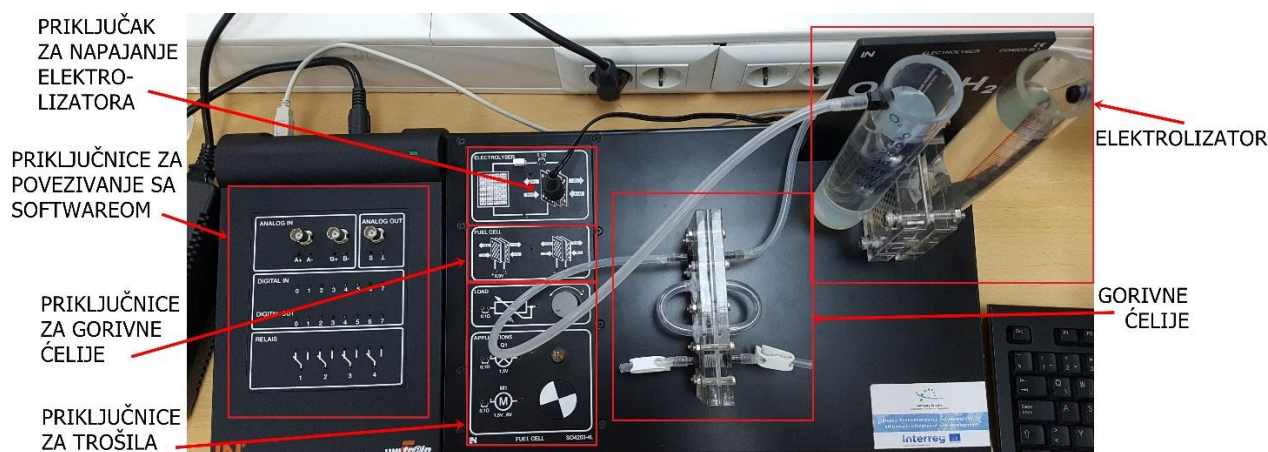
P. H. Lee je u radu [7] istražio utjecaj vlage na rad gorivnih ćelija. Zaključeno je da ćelije najbolje rade kada je vlažnost na katodi oko 60%.

J. J. Hawang je u radu [8] proučio učinak povratnog pritiska na rad i karakteristike ćelije. Zaključeno je da će se porastom pritiska poboljšavati i karakteristike, te učinkovitost pretvorbe energije gorivnih ćelija.

### 3. DIDAKTIČKO-MULTIMEDIJALNA OPREMA LUCAS-NÜLLE

#### 3.1. Sastav i izgled makete

Na slici 3.1. prikazana je maketa didaktičko-multimedijalne opreme koja je korištena za određivanje pokusa. Maketa se sastoji od elektrolizatora, dvije gorivne ćelije, te tri različita trošila. Kao trošila korišteni su: promjenjivi otpornik, žarulja sa žarnom niti i električni motor [2].

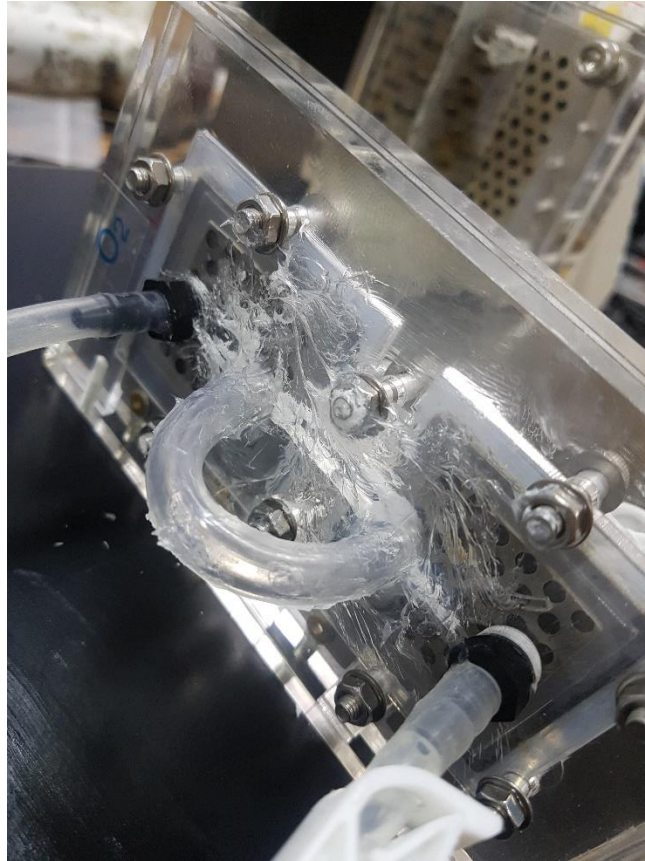


Slika 3.1. Izgled makete didaktičko-multimedijalne opreme

#### 3.1.1. Princip rada gorivnih ćelija

Gorivna ćelija je elektrokemijski uređaj koji radi na principu pretvaranja kemijske energije u istosmjernu električnu [9]. Princip rada je sličan kao kod baterije, ali gorivna ćelija nema mogućnost skladištenja električne energije. Inače se proces pretvaranja kemijske energije goriva u električnu odvija u nekoliko koraka, dok se kod gorivne ćelije to odvija u jednom koraku. Samim tim što je pretvorba u električnu energiju direktna, smanjeni su i gubici energije, odnosno povećava se učinkovitost pretvorbe.

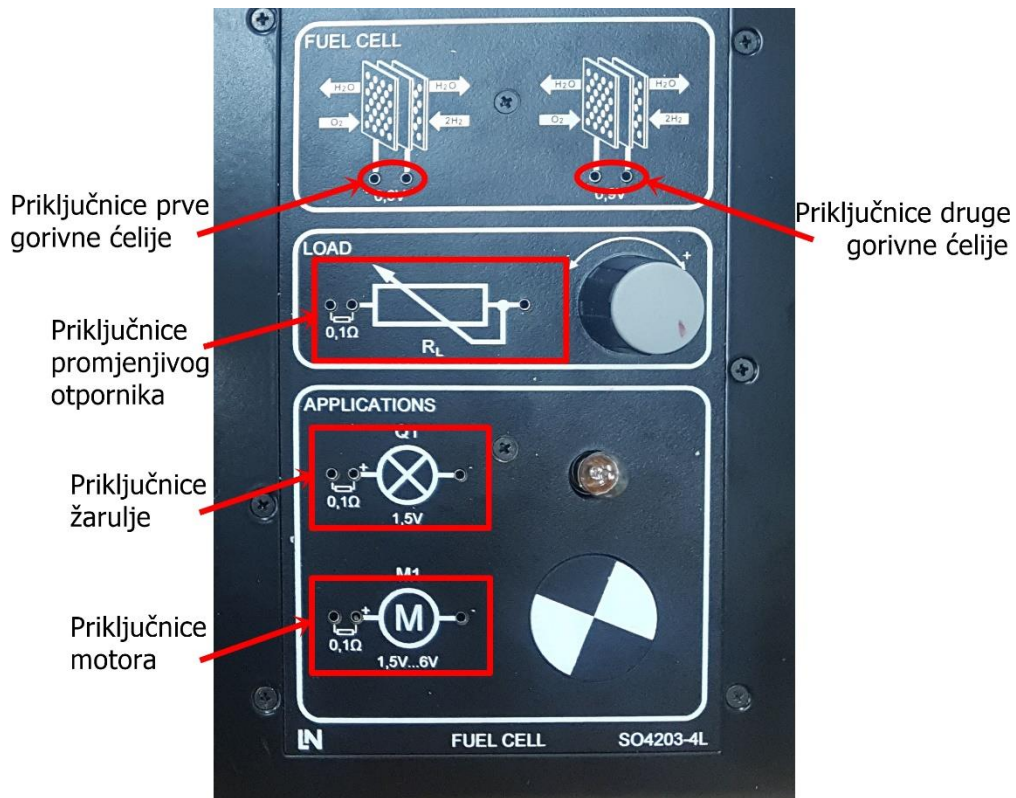
Gorivna ćelija sastoji se od dvije elektrode (anoda i katoda) i katalizatora. Za rad su potrebni gorivo i oksidans [10]. Na anodnu stranu dovodi se gorivo, dok se na katodnu stranu dovodi oksidans. Kao gorivo se koristi vodik, dok je kisik oksidans. Katalizatori razdvajaju vodik na elektrone i protone (vodikove ione). Ti ioni dolaze do membrane (središta ćelije) i uz pomoć katalizatora spajaju se s kisikom i stvaraju vodu. Elektroni koji ne mogu proći kroz membranu prolaze kroz vanjski krug na koji je priključen motor ili neko drugo električno trošilo [3]. Velika prednost gorivnih ćelija je što je voda jedini nusproizvod, tako da nema negativnog utjecaja na okoliš [1].



**Slika 3.2.** *Gorivne ćelije s makete*

Gorivne ćelije s makete prikazane su na slici 3.2. Na maketi su gorivne ćelije smještene unutar plastičnog kućišta. Na jednu od njih dovode se plastične cijevi, kojima dolaze vodik i kisik iz spremnika elektrolizatora, pri čemu je rad elektrolizatora objašnjen kasnije. Između dviju ćelija nalaze se takozvana mosna crijeva, koja prenose vodik i kisik s jedne ćelije na drugu. Na izlazu druge ćelije postavljene su plastične stezaljke, koje se koriste za zatvaranje toka plinova, te se koriste i za provjetravanje sustava a što je objašnjeno kasnije. Moguće je i proširiti sustav tako da se uklone stezaljke i spoje dodatne ćelije, koje bi se također povezale mosnim crijevima. Veoma je važno da na posljednjoj ćeliji budu postavljene plastične stezaljke za zatvaranje sustava. Električno povezivanje ćelija obavlja se preko priključnica koje su prikazane na slici 3.3. Svaka ćelija ima pozitivnu (+) i negativnu (-) priključnicu. Pomoću vodiča moguće je povezati ćelije u željeni spoj. Na slici 3.3. mogu se vidjeti i priključnice pojedinih trošila.

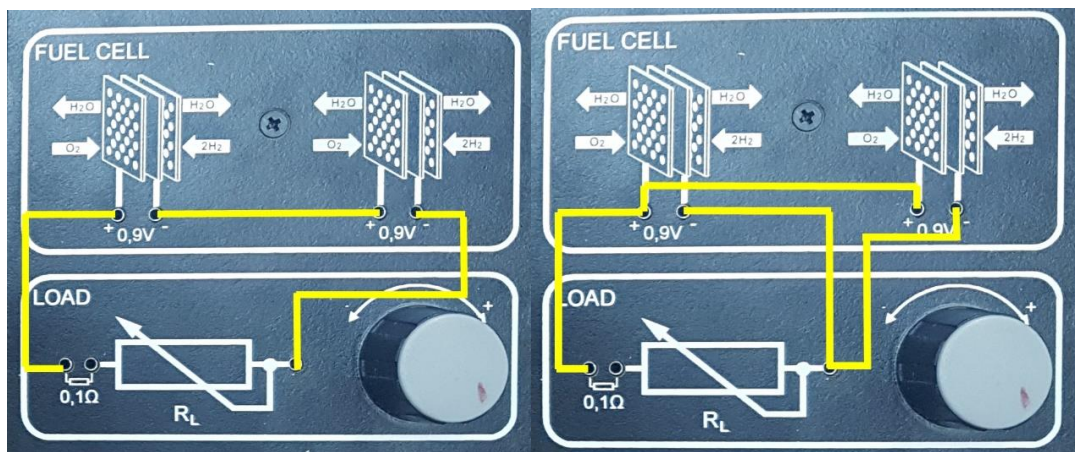




Slika 3.3. Priključnice gorivnih ćelija i trošila

Provjetravanje sustava je proces koji se mora obaviti uvijek dok ćelije neko vrijeme nisu bile u upotrebi. Dovoljno je napuniti spremnike elektrolizatora do neke razine, te otvorite plastične stezaljke, da proizvedeni plinovi prođu kroz kompletni sustav. Nakon toga stezaljke se mogu zatvoriti [2].

Na slici 3.4. prikazani su mogući načini spajanja gorivnih ćelija. Na lijevoj strani prikazan je serijski spoj ćelija, dok je na desnoj paralelni spoj. U oba primjera spoj ćelija je opterećen promjenjivim otpornikom.



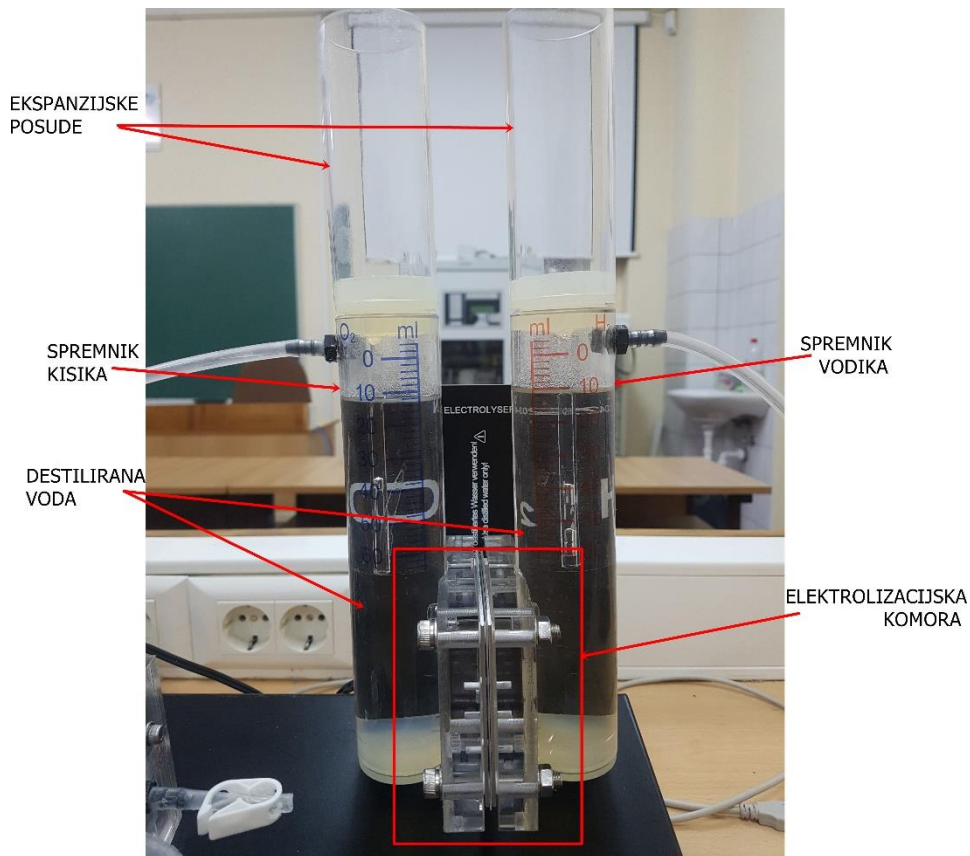
Slika 3.4. Načini spajanja gorivnih ćelija



### 3.1.2. Princip rada elektrolizatora

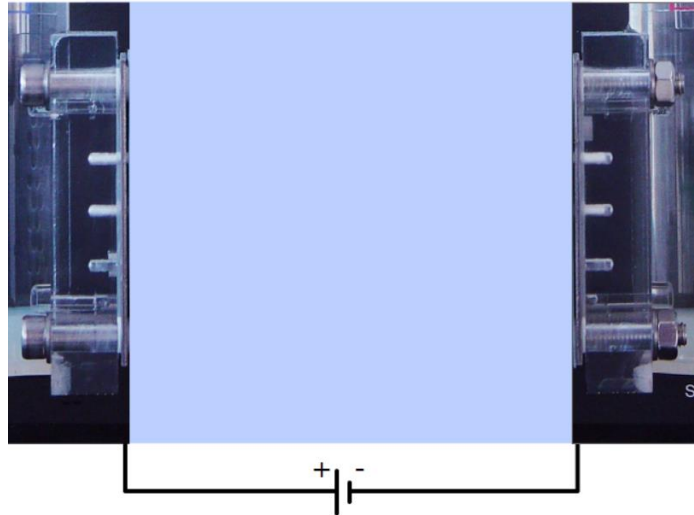
Kako je već spomenuto gorivne ćelije za rad trebaju vodik i kisik. Jedan od načina dobivanja tih plinova je elektroliza vode. Elektroliza vode je proces rastavljanja molekule vode na atome vodika i kisika [3]. Upravo se proces elektrolize koristi i na Lucas-Nülle maketi, a za elektrolizu se koristi elektrolizator.

Na slici 3.5. prikazan je elektrolizator s makete. Elektrolizator je uređaj koji se sastoji od dva spremnika koji su punjeni destiliranom vodom, elektrolizacijske komore, te anode i katode. Destilirana voda je obvezna za korištenje na ovoj maketi, jer sve ostale vode imaju primjese, te se u njihovom sastavu nalaze i neki drugi elementi, a ne samo vodik i kisik. Spremnici za vodik i kisik imaju poklopce na koje su dodane i ekspanzijske posude u koje ide voda potisnuta od proizvedenih plinova. Najvažniji dio elektrolizatora je elektrolizacijska ili reakcijska komora. Ona je omeđena dvjema elektrodama, odnosno anodom i katodom. Anoda, odnosno pozitivna elektroda, smještena je na kisikovoj strani makete, dok je katoda (negativna elektroda) na vodikovoj strani [2].



**Slika 3.5.** *Elektrolizator s makete*

Elektrolizator za svoj rad koristi energiju iz vanjske mreže. Priključnica napajanja nalazi se na maketi. Nakon što su spremnici napunjeni destiliranom vodom, može se uključiti napajanje elektrolizatora i time se kroz vodu zatvara strujni krug. Na slici 3.6. prikazana je proširena elektrolizacijska komora gdje svijetlo plava površina predstavlja destiliranu vodu, a lijevo i desno nalaze se elektrode.



**Slika 3.6.** Vizualno proširena elektrolizacijska komora

## 3.2. Pokusi za upoznavanje s opremom

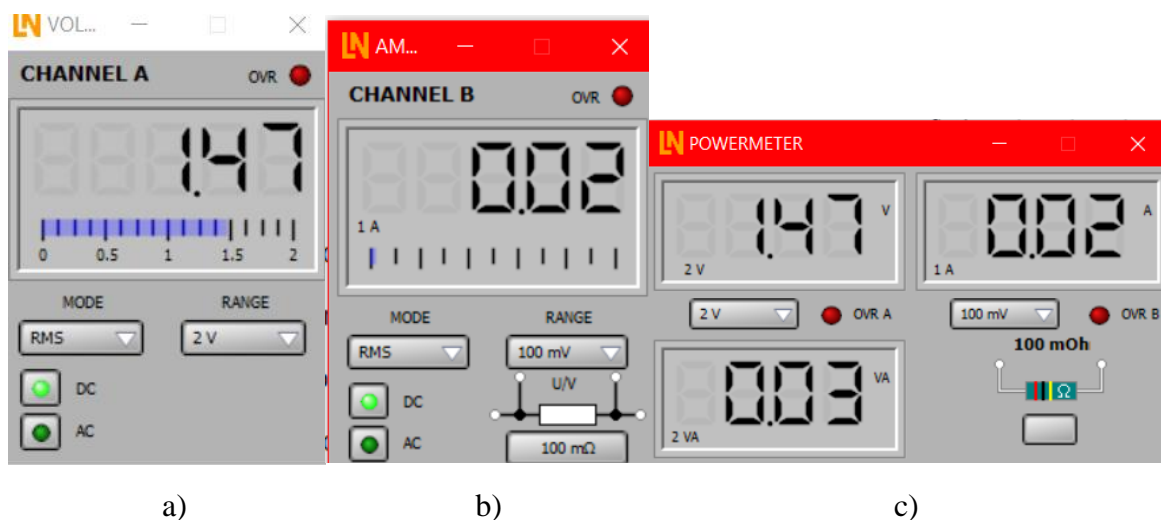
Nakon teorijskog uvoda u principe rada gorivnih ćelija i elektrolizatora, odrađeni su pokusi koji su preuzeti iz softverskog dijela programa: Lucas-Nülle Labsoft. Svi pokusi odrađeni su sa prethodno objašnjenom didaktičko-multimedijskom opremom te im je svrha da se korisnik bolje upozna sa svakim dijelom opreme.

### 3.2.1. Pokus mjerenja osnovnih veličina

Prije početka rada program Labsoft kroz dva jednostavna pokusa pokazuje osnove rada s didaktičko-multimedijskom opremom. U prvom pokusu odrađuje se povezivanje elektrolizatora na napajanje. Kada se elektrolizator poveže na napajanje, on elektrolizom destilirane vode proizvodi vodik i kisik. Promjenom struje napajanja elektrolizatora mijenja se i brzina elektrolize vode. Detaljni princip rada elektrolizatora opisan je u poglavlju 3.1.2. Zatim se dobiveni plinovi plastičnim cijevima dovode do gorivnih ćelija, gdje se kemijska energija tih plinova pretvara u električnu kojom se pokreće priključeno trošilo.

Zadatak prvog pokusa je uočiti razliku u promjeni proizvedenih plinova u ovisnosti o struji napajanja elektrolizatora. Jasno se može zaključiti da što je veća struja, program je ograničava na 2 A, to se brže proizvode i plinovi, odnosno elektroliza vode je brža.

U drugom pokusu dvije gorivne ćelije na maketi spajaju se serijski te im se kao trošilo priključuje električni motor. Zadatak je izmjeriti napon, struju i snagu na motoru, te snimiti  $u-i$  karakteristiku tako spojenih ćelija. Bitno, kod ovog i svih ostalih pokusa, je točno namjestiti vrijednost šant otpora. U ovom slučaju to je  $0,1 \Omega$ . Rezultati mjerenja prikazani su na slici 3.7.

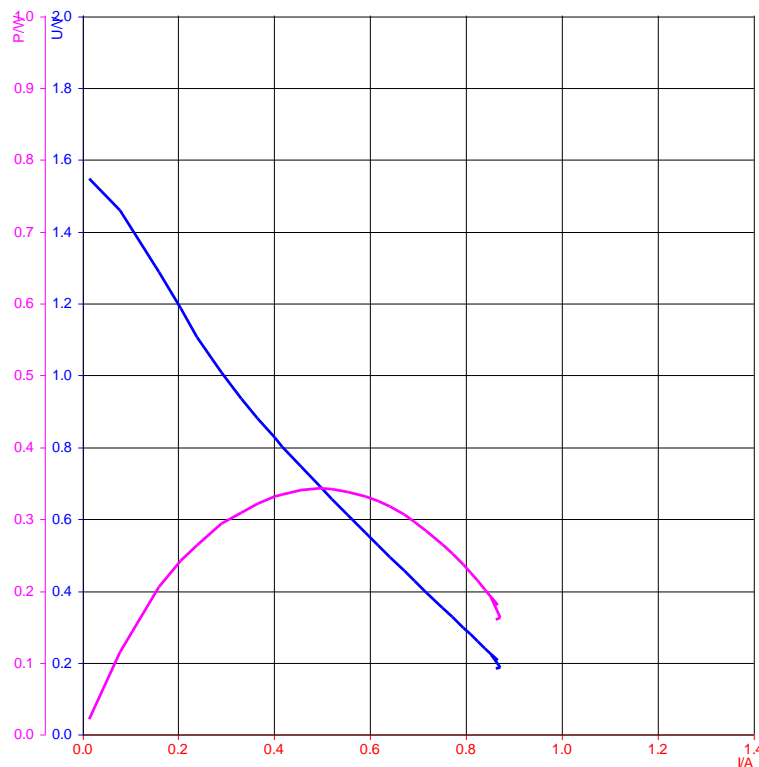


Slika 3.7. Pokus mjerenja osnovnih veličina na motoru:

a) vrijednost napona, b) vrijednost struje, c) određivanje istosmjerne snage

Na maketi, a i u uputstvima programa piše da svaka ćelija daje napon od 0,9 V [2], što bi značilo da dvije ćelije u serijskom spoju daju 1,8 V. Iz rezultata na slici 3.7. a) instrumenti pokazuju napon na motoru  $U(0)=1,47$  V. Uzrok razlike u naponima jesu nepravilnosti u radu gorivnih ćelija. Razlozi, zbog kojih dolazi do odstupanja opisani su kasnije. Također u obzir se moraju uzeti i padovi napona na mjernim instrumentima, te na šant otporniku koji služi za mjerenje struje na motoru. Ta struja može se očitati na slici 3.7. b) i ona iznosi  $I(0)=0,02$  A. Izmjerena snaga na motoru iznosi  $P(0)=0,03$  W, slika 3.7 c), poznato je da je istosmjerna snaga jednaka umnošku srednjih vrijednosti struje i napona, tako da se vrijednost istosmjerne snage može i provjeriti.  $P(0)=U(0) \cdot I(0)=1,47 \cdot 0,02=0,0294$  W. Zaokruživanjem na dvije decimale koje mjerni instrument može prikazati, dobije se  $P(0)=0,03$  W.

Na slici 3.8. prikazana je  $u-i$ , te  $p-i$  karakteristika serijski spojenih gorivnih ćelija kada se kao trošilo spaja promjenjivi otpornik. Prije snimanja potrebno je provjetriti sustav, te napuniti spremnike plinovima. Također otpornik se mora potenciometrom namjestiti tako da daje maksimalan otpor. Zatim se pomoću virtualnog snimača karakteristika snimaju karakteristike. Postepenim smanjivanjem otpora mijenjaju se vrijednosti napona i struje, samim tim i vrijednost snage. Karakteristike su detaljnije objašnjene u poglavlju 3.2.7. čiji zadatak i je snimanje karakteristika gorivnih ćelija.



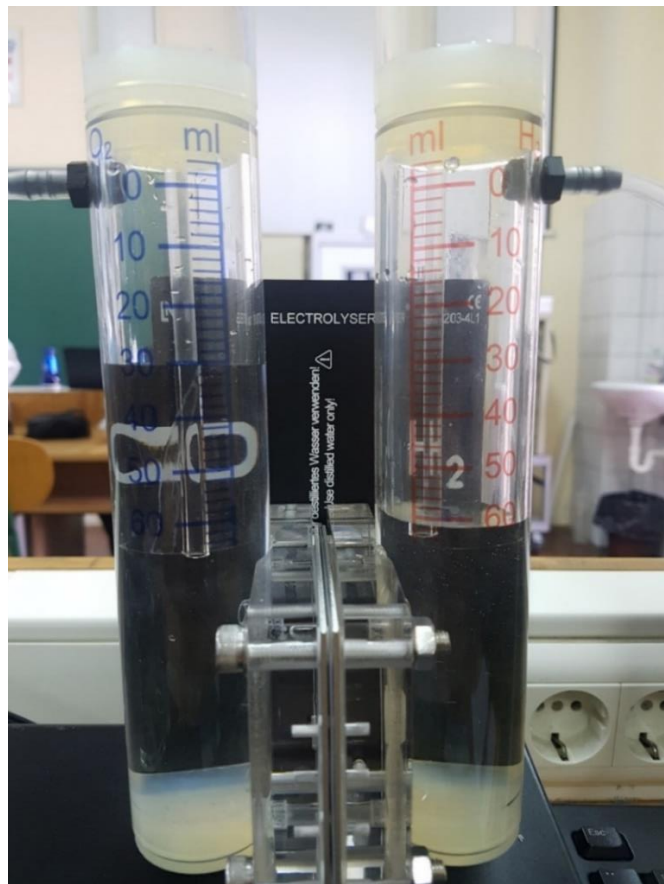
**Slika 3.8.** Rezultati snimanja karakteristika

### 3.2.2. Pokus dokazivanja kemijskog sastava vode

Zadatak ovog pokusa je provesti elektrolizu vode i obratiti pažnju na količinu proizvedenog kisika i vodika. Iz kemijskog zapisa vode, može se zaključiti da molekula vode sadrži dva atoma vodika, te jedan kisika [3], što ukazuje da bi se elektrolizom trebalo proizvesti dvostruko više vodika od kisika.

U ovom pokusu uočene su nepravilnosti u radu. U prvom pokušaju vodika je proizvedeno gotovo peterostruko više od kisika, što je dovelo do zaključka da postoji problem u skladištenju kisika ili u radu elektrolizatora. Pošto se promatranjem rada makete jasno vidi da se kisik proizvodi, otklonjena je mogućnost greške elektrolizatora. Nepravilnost je uočena na spoju spremnika za vodu sa kisikove strane te plastične cijevi. Plastična priključnica za cijev je skinuta, te je na njen navoj stavljen novi silikon, koji je onemogućio prolazak kisika iz spremnika.

Nakon stavljanja novog silikona pokus je ponovljen, te je potvrđen kemijski sastav vode, tako što je proizvedeno 30 ml kisika, dok je vodika proizvedeno 60 ml. Na slici 3.9. prikazani su spremnici nakon završene elektrolize.

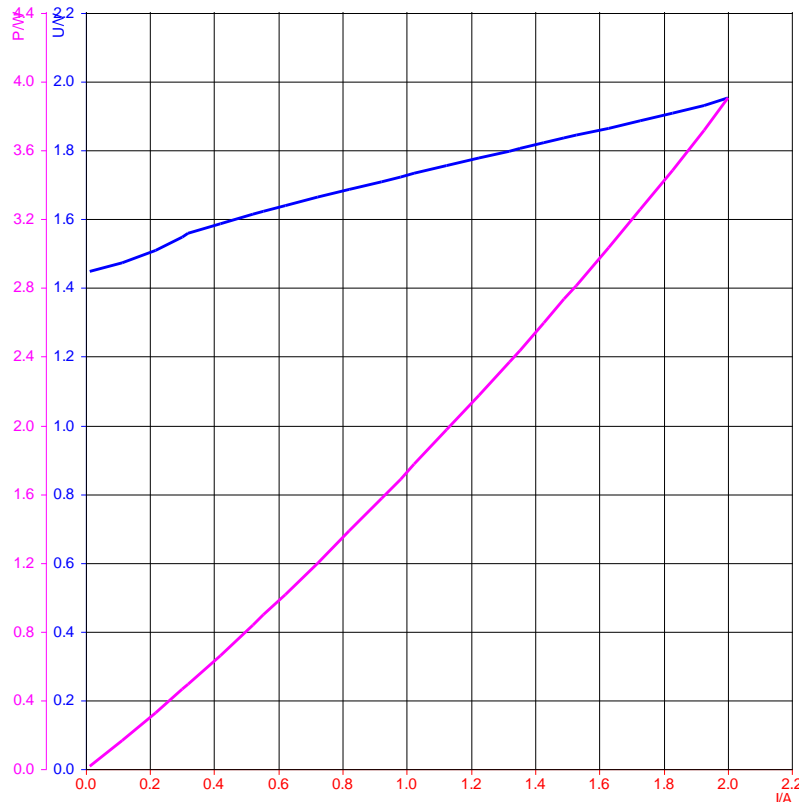


Slika 3.9. Spremnici plinova nakon završene elektrolize

### 3.2.3. Pokus ispitivanja karakteristika elektrolizatora

Princip rada elektrolizatora opisan je u uvodnom dijelu. U ovom pokusu ispitana je njegova karakteristika.

Kako je već rečeno brzina elektrolize, odnosno brzina proizvodnje plinova ovisi o struji napajanja. U ovom pokusu praćena je promjena napona i snage elektrolizatora postupnim povećanjem struje napajanja. Karakteristika je prikazana na slici 3.10..



**Slika 3.10.** Karakteristika elektrolizatora

Na slici 3.10. se uočava napon praga, nakon kojega struja kreće teći, odnosno tek nakon što se prijeđe napon praga, elektrolizator započinje s elektrolizom vode. U ovom slučaju napon praga iznosi nešto više od 1,4 V. Maksimalna snaga elektrolizatora iznosi približno 3,9 W.

### 3.2.4. Pokus mjerenja proizvedenog vodika

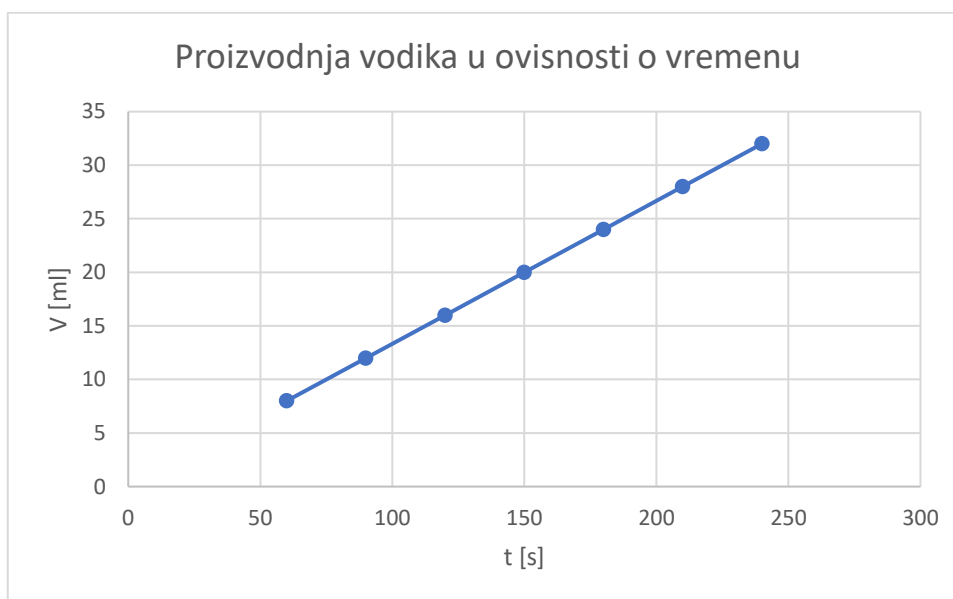
U ovom pokusu je kroz dva dijela ispitana proizvodnja vodika ( $H_2$ ).

U prvom dijelu pokusa praćena je proizvodnja vodika u ovisnosti o vremenu, uz konstantnu struju elektrolize. Struja elektrolize namještena je na 1 A, te se tako održava do kraja prvog dijela pokusa. Volumen proizvedenog vodika prvi put je očitana nakon 60 sekundi, te zatim svakih 30 sekundi. Rezultati očitavanja prikazani su u tablici 3.1.

**Tablica 3.1.** *Proizvodnja vodika u ovisnosti o vremenu, pri konstantnoj struji.*

Vrijeme [s]	60	90	120	150	180	210	240
Proizveden vodik [ml]	8	12	16	20	24	28	32

Ovisnost proizvodnje vodika o vremenu je proporcionalna, tablica 3.1. Za iste vremenske razmake, bit će proizveden jednak volumen vodika. Grafički prikaz promjene proizvedenog vodika u ovisnosti o vremenu prikazan je na slici 3.11.



**Slika 3.11.** *Grafički prikaz proizvedenog vodika u ovisnosti o vremenu*

U drugom dijelu pokusa praćena je proizvodnja vodika u ovisnosti o različitim vrijednostima struje elektrolize. Za svaku vrijednost struje, očitavanje je izvršeno nakon tri minute, nakon čega se spremnik vodika isprazni i postupak se ponovi za sljedeću vrijednost. Rezultati očitavanja prikazani su u tablici 3.2.

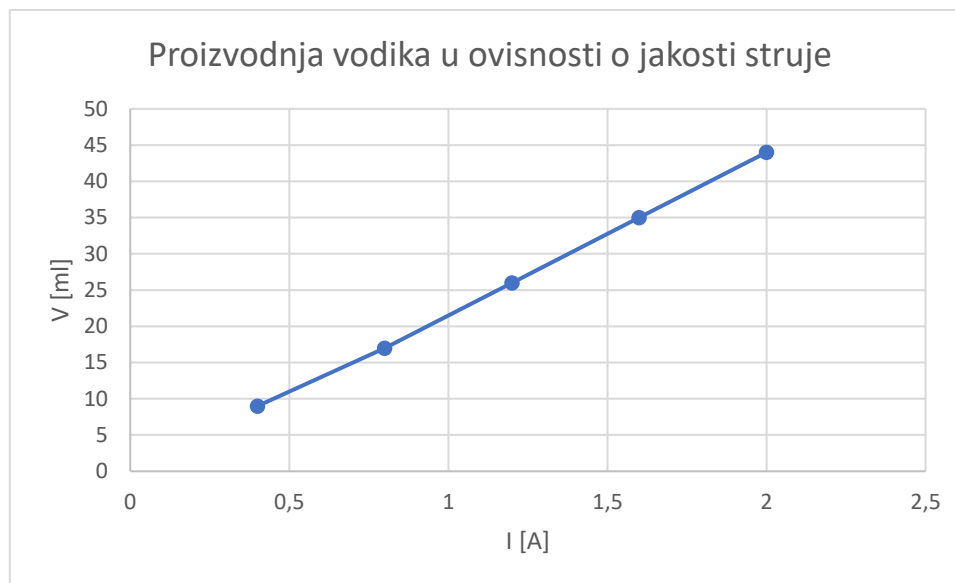
**Tablica 3.2.** *Proizvodnja vodika u ovisnosti o vrijednosti struje elektrolize.*

Jakost struje [A]	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
Proizveden vodik [ml]	9	17	26	35	44

Ovisnost proizvedenog vodika je proporcionalna jakosti struje, tablica 3.2. Bitno je primijetiti da je za najveću vrijednost struje elektrolize u istom vremenskom razdoblju proizvedeno najviše



vodika. Grafički prikaz promjene proizvedenog vodika u ovisnosti o jakosti struje elektrolize prikazan je na slici 3.12.



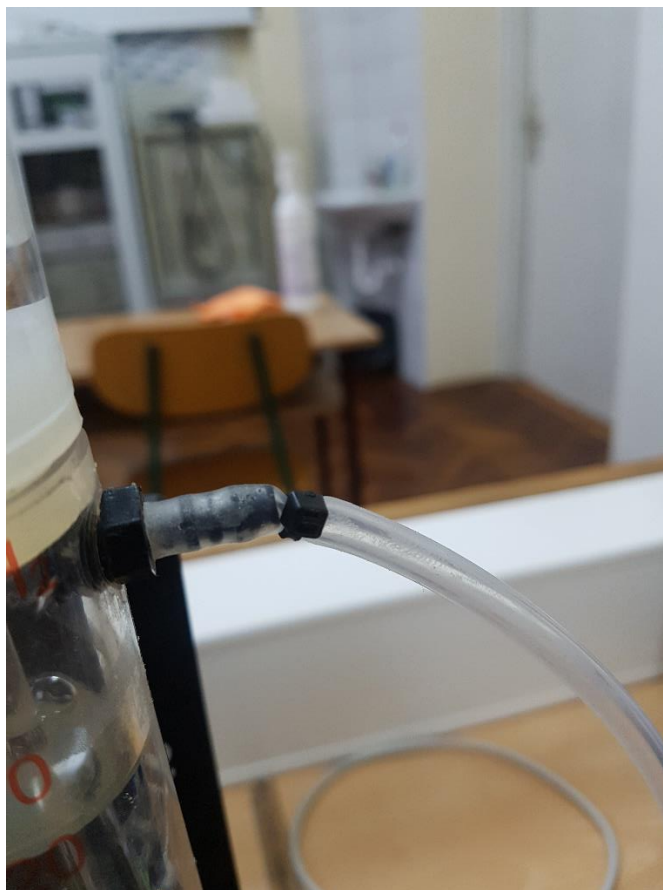
**Slika 3.12.** Grafički prikaz proizvedenog vodika u ovisnosti o jakosti struje elektrolize

### 3.2.5. Pokus mjerenja stope propuštanja plinova

Vodik je prvi element u tablici periodnog sustava elemenata, te najjednostavniji kemijski element. Bitno za rad gorivnih ćelija je skladištenje vodika, koje mora biti takvo, da se što više smanji stopa propuštanja plina, jer se na taj način podiže i učinkovitost pretvorbe energije gorivnih ćelija.

Ovim pokusom ispitana je kvaliteta sustava skladištenja vodika. Kod kasnijeg izračuna učinkovitosti količina ispuštenog plina uzeta je u obzir, jer ta količina niti ne dođe do gorivne ćelije, već se izgubi na spojevima spremnika koji nisu dovoljno kvalitetno napravljeni.

Ispitano je propuštanje spremnika vodika tako da se uključi elektrolizator koji proizvede 50 ml vodika, te se nakon toga sustav ostavi neopterećen 5 minuta. Prvi put kada je ovaj pokus izveden, razina je nakon 5 minuta pala za više od 25 ml, što je značilo da se vodik previše gubio. Prvo što je učinjeno je da su stavljene plastične vezice na mjesta na kojima je spoj između plastičnih spojnica i cijevi. Pretpostavka je da će se plastičnom vezicom smanjiti presjek cijevi, i samim tim će plinovi pod većim pritiskom ići prema ćelijama, što znači da će manje puštati na spojevima spojnica i cijevi. Na slici 3.13. prikazana je cijev nakon stavljanja plastične vezice.



**Slika 3.13.** *Plastične vezice za smanjenje propuštanja*

Dodatno su skinute sve plastične cijevi, i mosna crijeva, uklonjen je sav stari silikon, te je stavljen novi. Nakon sušenja silikona obavljena su ponovna mjerenja. Nakon 5 minuta razina vodika pala je na 47 ml, što znači da je sustav propustio 3 ml vodika, odnosno stopa propuštanja je 0,6 ml/min. Stopa propuštanja će se u kasnijim pokusima oduzimati od ukupne potrošnje sustava.

### **3.2.6. Pokus mjerenja potrošnje vodika**

Za bolje razumijevanje načina na koji gorivna ćelija troši proizveden vodik bitno je poznavati princip rada ćelije, te njene sastavne dijelove. Princip rada gorivne ćelije detaljno je opisan u poglavlju 3.1.1.

Gorivne ćelije su u ovom pokusu spojene paralelno, a kao trošilo je spojen promjenjivi otpornik kojim se namješta vrijednost struje koja će teći strujnim krugom. Jakost struje mjeri se virtualnim ampermetrom u programu LabSoft.

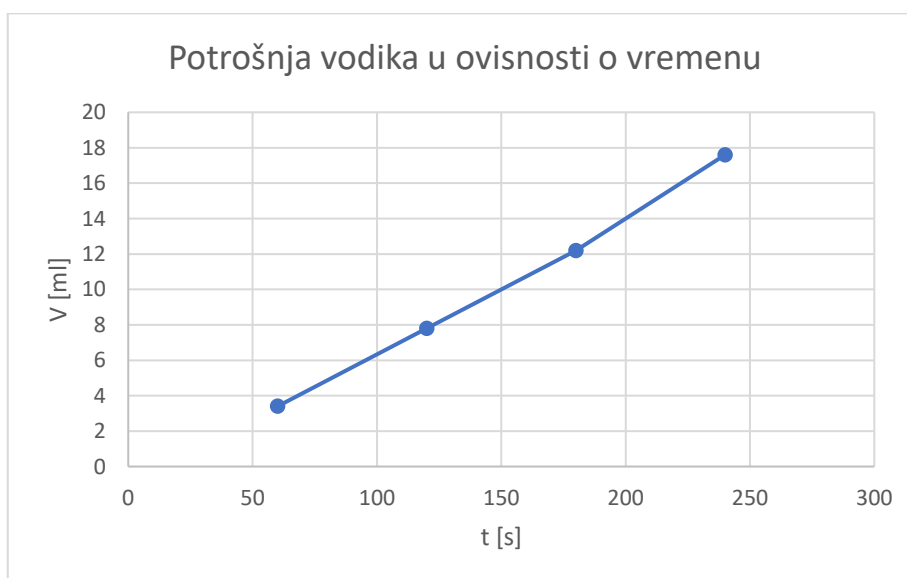
Pokus je podijeljen na dva dijela. U prvom dijelu promatrana je potrošnja vodika u ovisnosti o vremenu opterećenja. Postupak provođenja pokusa je takav da je prvo proizvedeno 50 ml vodika. Zatim se elektrolizator isključi. Mjerenja su vršena u vremenu od 240 sekundi, tako da je svakih

60 sekundi očitana razina vodika. U ovom dijelu pokusa promjenjivim otpornikom je namještena jakost struje od 600 mA. Rezultati očitavanja prikazani su u tablici 3.3.

**Tablica 3.3.** *Potrošnja vodika u ovisnosti o vremenu.*

Vrijeme [s]	60	120	180	240
Volumen prije rada [ml]	50	50	50	50
Volumen nakon rada [ml]	46	41	36	30
Stopa propuštanja	0,6	1,2	1,8	2,4
Ukupna potrošnja	3,4	7,8	12,2	17,6

Proporcionalnost potrošnje vodika i vremena prisutna je kao i kod proizvodnje vodika. Kod računanja ukupne potrošnje u obzir se uzima stopa propuštanja, te se njezina vrijednost oduzima od razine volumena nakon rada, jer taj volumen nije potrošen od strane trošila, već je izgubljen iz spremnika. Na slici 3.14. prikazan je omjer potrošenog vodika u ovisnosti o vremenu.



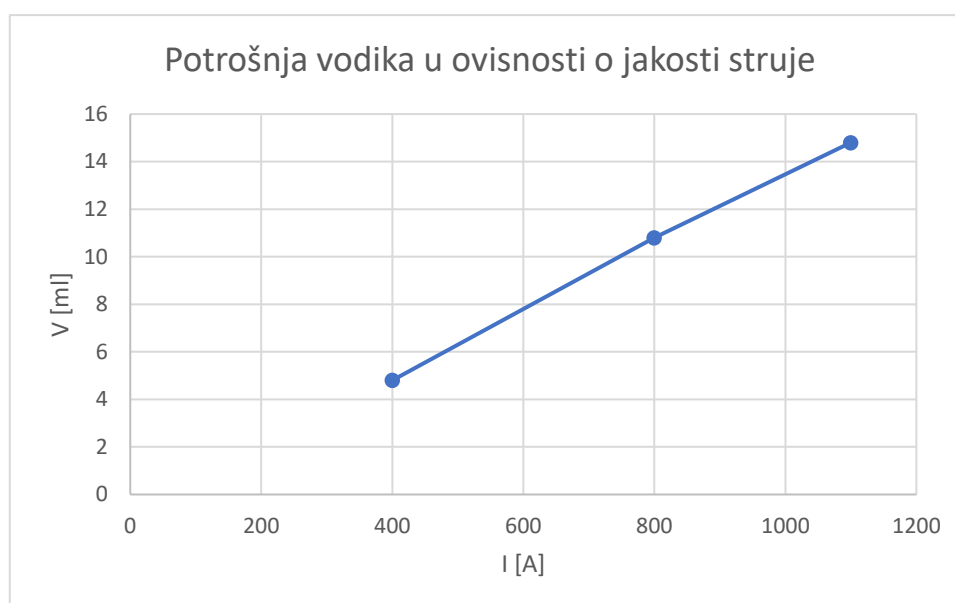
**Slika 3.14.** *Potrošnja vodika u ovisnosti o vremenu*

U drugom dijelu pokusa promatrana je potrošnja vodika u ovisnosti o struji koja teče strujnim krugom. Postupak provođenja pokusa je takav da je prvo proizvedeno 50 ml vodika. Zatim se elektrolizator isključi. Prvo je namještena vrijednost struje od 400 mA, te je nakon 2 minute zabilježena potrošnja vodika. Taj proces je ponovljen i za preostale dvije vrijednosti struje. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 3.4.

**Tablica 3.4.** *Potrošnja vodika u ovisnosti o jakosti struje.*

Jakost struje [mA]	400	800	1100
Volumen prije rada [ml]	50	50	50
Volumen nakon rada [ml]	44	38	34
Stopa propuštanja	1,2	1,2	1,2
Ukupna potrošnja	4,8	10,8	14,8

I ovim pokusom je potvrđena proporcionalnost između potrošnje vodika i jakosti struje, slika 3.15.



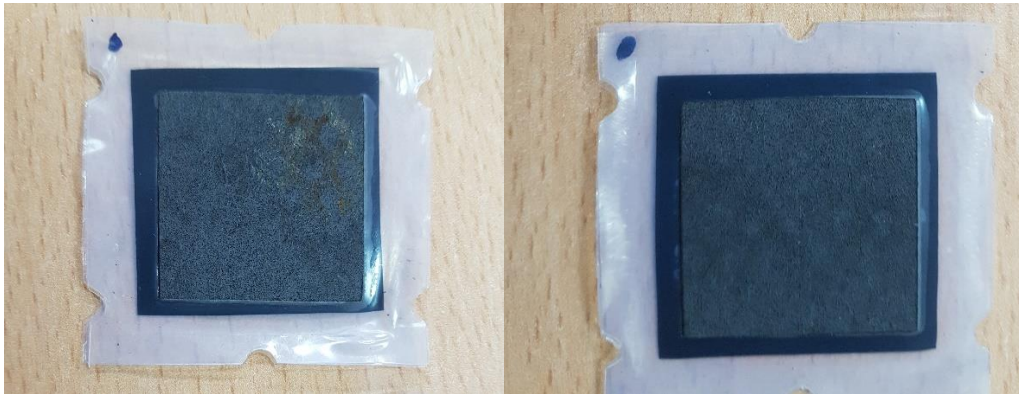
**Slika 3.15.** *Potrošnja vodika u ovisnosti o jakosti struje*

### 3.2.7. Ispitivanje karakteristika gorivnih ćelija

Ovaj pokus podijeljen je na tri dijela, svaki dio odnosi se na poseban spoj gorivnih ćelija. U prvom dijelu prikazana je karakteristika jedne gorivne ćelije, u drugom dijelu karakteristika paralelno spojenih ćelija, te u trećem serijski spojenih.

Pri provođenju ovog pokusa uočene su dodatne nepravilnosti u radu gorivnih ćelija. Obje ćelije nisu imale niti približne  $u-i$  karakteristike, a i maksimalna snaga koju su davale bila je ispod 20% uobičajene snage. Pošto se iz karakteristika vidjelo da je veći problem struja ćelija, nego napon, pretpostavka je bila da je problem niske snage zaprljanost ili oštećenost membrane između elektroda ćelije. Prvo su provjereni svi mogući uzroci izvan ćelija, koji bi mogli uzrokovati takav problem. Pošto je sve bilo ispravno, jedino preostalo bilo je rastaviti ćelije, te pokušati očistiti

membrane. Nakon otvaranja ćelija, moglo se zaključiti da je voda došla do ćelija, iako se to ne bi smjelo dogoditi. Zbog te vode, na membrani se nakupio korozivni sloj, koji je narušavao rad ćelija. Za čišćenje membrana korišten je medicinski alkohol jer on ispari, te se tako neće ponovno unesti vlaga u ćelije. Na slici 3.16. prikazana je jedna od membrana prije i poslije čišćenja.

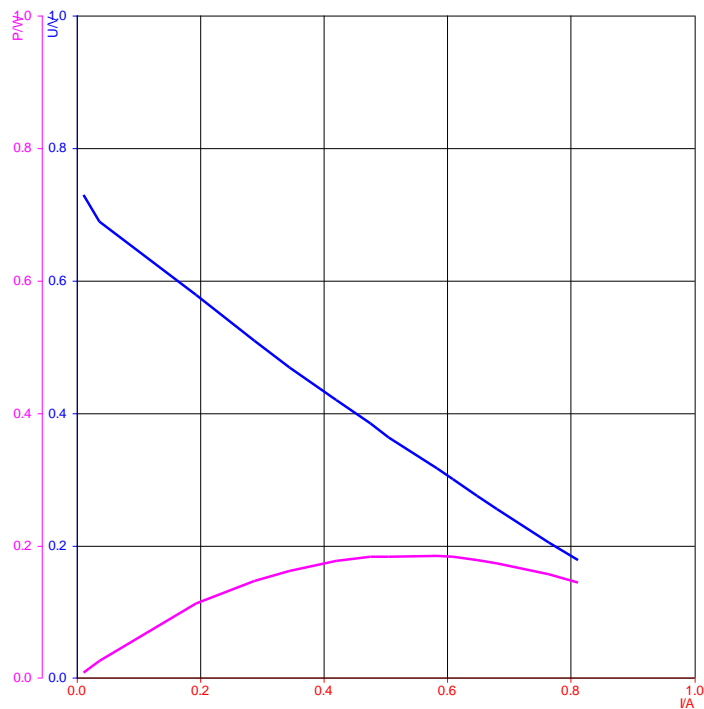


**Slika 3.16.** Membrana ćelije prije (lijevo) i poslije (desno) čišćenja

Nakon čišćenja membrana i ponovnog sklapanja ćelija ponovljena su ispitivanja ćelija. Maksimalna snaga je porasla, ali još nije na razini na kojoj bi trebala biti. Pretpostavka je da bi se potpunom zamjenom membrana snaga još podigla.

Postupak izvođenja pokusa je da se spremnik napuni vodikom do 50 ml, a promjenjivi otpornik, koji se koristi kao teret ćelijama, postavi na najveći otpor. Pomoću virtualnog snimača karakteristika, snima se karakteristika gorivne ćelije, tako da se otpor postepeno smanjuje. Snimanje se završava kada se otpor smanji na najmanju moguću vrijednost.

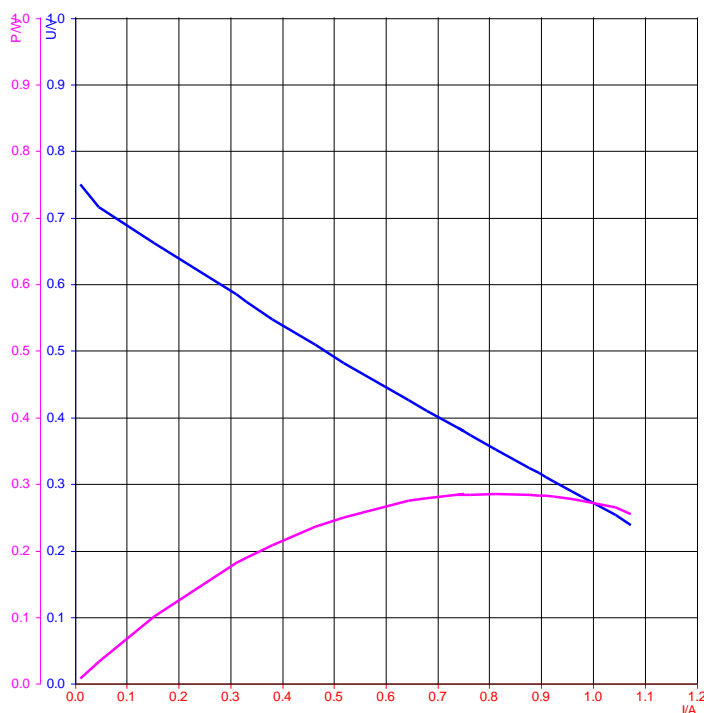
U prvom dijelu pokusa snimljene su  $u-i$ , te  $p-i$  karakteristike jedne gorivne ćelije, koje su prikazane na slici 3.17.



**Slika 3.17.** Karakteristike jedne gorivne ćelije

Maksimalan napon jedne gorivne ćelije iznosi  $U_{\max}=0,75$  V. Porastom otpora napon opada gotovo pa linearno. Nakon popravka ćelija, najveća snaga jedne ćelije iznosi  $P_{\max}=0,19$  W, slika 3.17.

U drugom dijelu pokusa snimljene su  $u-i$ , te  $p-i$  karakteristike paralelno spojenih gorivnih ćelija, koje su prikazane na slici 3.18.

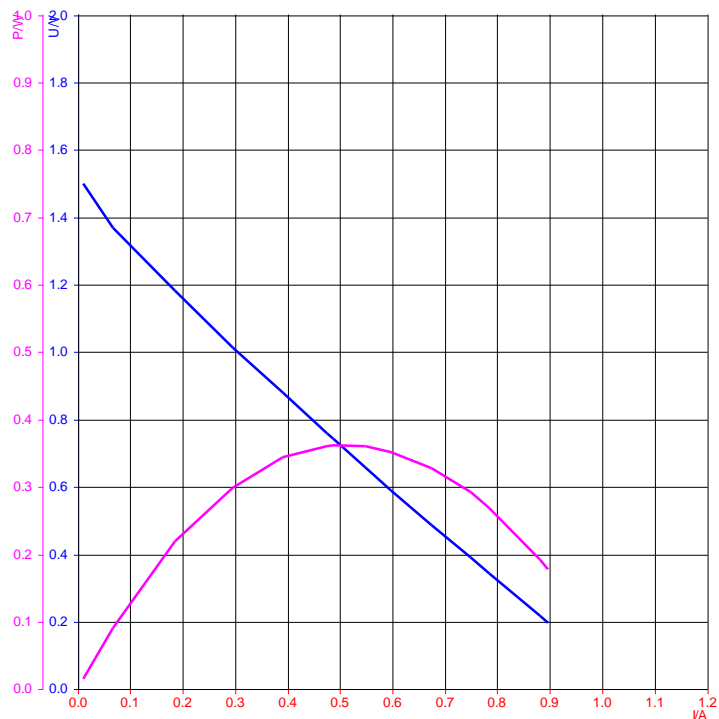


**Slika 3.18.** Karakteristike dviju paralelno spojenih gorivnih ćelija

Maksimalan napon dviju paralelno spojenih gorivnih ćelija iznosi  $U_{\max}=0,75$  V. Porastom otpora napon opada gotovo pa linearno. Najveća snaga dviju paralelno spojenih ćelija iznosi  $P_{\max}=0,29$  W, slika 3.18. Bitno je primijetiti i porast maksimalne vrijednosti struje u odnosu na jednu gorivnu ćeliju, slika 3.17.

U trećem dijelu pokusa snimljene su  $u-i$ , te  $p-i$  karakteristike serijski spojenih gorivnih ćelija, koje su prikazane na slici 3.19..

Maksimalan napon dviju serijski spojenih gorivnih ćelija iznosi  $U_{\max}=1,5$  V. Porastom otpora napon opada gotovo pa linearno. Najveća snaga dviju paralelno spojenih ćelija iznosi  $P_{\max}=0,36$  W, slika 3.19.



**Slika 3.19.** Karakteristike dviju serijski spojenih gorivnih ćelija

U slučajevima praktične primjene kada je potreban veći napon koristiti će se serijski spoj ćelija, dok će se u slučajevima u kojima treba veća struja koristiti paralelan spoj gorivnih ćelija. Rezultati gore izvedenih pokusa ukazuju na to da je snaga gorivnih ćelija nešto veća u serijskom spoju.



### 3.2.8. Ispitivanje učinkovitosti gorivnih ćelija

Kao i kod većine obnovljivih izvora energije tako i kod gorivnih ćelija bitnu ulogu ima stupanj djelovanja, odnosno učinkovitost pretvorbe energije [9]. Učinkovitost se određuje kao omjer između korisne izlazne energije i ukupne ulazne energije. Kod gorivnih ćelija korisna izlazna energija je proizvedena električna energija, a ulazna energija je entalpija ili gornja toplinska vrijednost goriva (vodika) [3].

Ovaj pokus je samo uvod u ispitivanje učinkovitosti, dok je u poglavlju 4. detaljnije mjerena učinkovitost za pojedine spojeve ćelija, te promatran utjecaj struje na učinkovitost.

Pošto se maketa sastoji od gorivnih ćelija i elektrolizatora, za računanje učinkovitosti moraju se uzeti u obzir učinkovitosti elektrolizatora i gorivnih ćelija. Ukupna učinkovitost sustava računa se kao umnožak pojedinih učinkovitosti [6]. Izraz za izračun ukupne učinkovitosti je:

$$\eta_s = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (3-1)$$

gdje je: -  $\eta_s$  – učinkovitost sustava

-  $\eta_i$  – pojedina učinkovitost određenog elementa u sustavu

-  $n$  – broj elemenata u sustavu

Kako je već rečeno, učinkovitost gorivnih ćelija je omjer električne energije, odnosno električnog rada koji se obavi na trošilu i kemijskog rada, odnosno umnoška kalorijske (ogrjevnog) vrijednosti vodika i potrošenog volumena vodika [2]:

$$\eta_{gc} = \frac{W_{el}}{W_{ch}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{H_{H_2} \cdot V} \quad (3-2)$$

gdje je: -  $W_{el}$  – električni rad [W]

-  $W_{ch}$  – kemijski rad [W]

-  $U$  – napon [V]

-  $I$  – struja [A]

-  $t$  – vrijeme [s]

-  $V$  – potrošen volumen vodika [ml]

-  $H_{H_2}$  – kalorijska vrijednost vodika [ $\frac{kJ}{m^3}$ ]

Kalorijska vrijednost vodika iznosi:  $H_{H_2} = 11920 \frac{kJ}{m^3} = 11,92 \frac{J}{ml}$  [1].

Na maketi se struja mjeri na šant otporniku (vrijednost otpora šanta je  $0,1 \Omega$ ) što znači da na njemu postoji pad napona, odnosno i on troši dio energije koju daju gorivne ćelije. Energija koja se gubi na šantu je toplinske prirode [2] i ona se računa prema izrazu:

$$P_{sh} = I^2 \cdot R \quad (3-3)$$

gdje je: -  $P_{sh}$  – dio snage koji se gubi na šantu [W]

-  $I$  – struja šanta [A]

-  $R$  – otpor šanta [ $\Omega$ ]

Kada se utjecaj šanta uzme u obzir i izraz (3-3) doda u izraz (3-2), ukupan izraz za učinkovitost je:

$$\eta_{gc} = \frac{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R}{H_{H_2} \cdot V} \quad (3-4)$$

Pokus se sastoji od tri dijela. U prvom dijelu ispitana je učinkovitost paralelnog spoja gorivnih ćelija, a u drugom učinkovitost elektrolizatora. U trećem dijelu određena je učinkovitost sustava elektrolizatora i gorivnih ćelija.

Za prvi dio pokusa promjenjivi otpornik spojen je kao trošilo, tako da kroz njega teče struja od 1 A. Nakon što se spremnik napuni vodikom potrebno je isključiti elektrolizator i zatvoriti strujni krug, te nakon 180 sekundi očitati volumen vodika koji je preostao u spremniku. Razlika između početne razine i razine koja ja preostala je volumen potrošen od strane gorivnih ćelija. Potrebno je zabilježiti napon koji ćelije daju. Mjerenje je ponovljeno tri puta, te je pomoću srednjih vrijednosti određena učinkovitost ćelija. Rezultati su prikazani u tablici 3.5.

**Tablica 3.5.** Učinkovitost paralelnog spoja gorivnih ćelija.

Broj mjerenja	$I$ [A]	$U$ [V]	Potrošen vodik [ml]
1.	1	0,33	19
2.	1	0,34	19
3.	1	0,35	19
Srednja vrijednost	1	0,34	19

U obzir treba uzeti i stopu propuštanja koja je određena u poglavlju 3.2.5. Tijekom rada, spremnik vodika također i propušta vodik, pošto su mjerenja trajala tri minute, znači da je sustav propustio 1,8 ml vodika. Taj volumen treba oduzeti od volumena potrošenog vodika.

Prema izrazu (3-4) učinkovitost gorivnih ćelija iznosi:

$$\eta_{GC,p} = \frac{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R}{H_{H_2} \cdot V} = \frac{0,34 \cdot 1 \cdot 180 + 1^2 \cdot 0,1}{11920 \cdot (19 - 1,8) \cdot 10^{-3}} = 0,3$$

$$\eta_{GC,p} = 0,3 \cdot 100\% = 30\%$$

Učinkovitost paralelnog spoja ćelija iznosi 0,3 ili 30%, što znači da se manje od trećine ulazne energije pretvori u korisnu električnu energiju.

U drugom dijelu pokusa određena je učinkovitost elektrolizatora [2], koja se računa prema izrazu:

$$\eta_{el} = \frac{H_{H_2} \cdot V}{U \cdot I \cdot t} \quad (3-5)$$

gdje je: -  $U$  – napon [V]

-  $I$  – struja [A]

-  $t$  – vrijeme [s]

-  $V$  – proizveden volumen vodika [ml]

-  $H_{H_2}$  – kalorijska vrijednost vodika [ $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ ]

U ovom izrazu pad napona na šantu je zanemaren, jer je razlika u rezultatima učinkovitosti sa i bez tog pada napona zanemariva.

Za drugi dio pokusa spremnik vodika je ispražnjen, te je zatim namještena struja elektrolize 1,2 A. Nakon 180 sekundi očitana je razina vodika u spremniku. Mjerenja su ponovljena tri puta, te je učinkovitost izračunata sa srednjim vrijednostima. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 3.6.

**Tablica 3.6.** Učinkovitost elektrolizatora.

Broj mjerenja	$I$ [A]	$U$ [V]	Proizveden vodik [ml]
1.	1,2	1,74	26
2.	1,2	1,74	26
3.	1,2	1,74	25
Srednja vrijednost	1,2	1,74	25,67

Pri izračunu učinkovitosti u obzir opet treba uzeti stopu propuštanja, tako da se vrijednost koja iscuri u tri minute mjerenja zbroji proizvedenom volumenu vodika.

Prema izrazu (3-5) učinkovitost elektrolizatora iznosi:

$$\eta_{el} = \frac{H_{H_2} \cdot V}{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R} = \frac{11920 \cdot (25,67 + 1,8) \cdot 10^{-3}}{1,74 \cdot 1,2 \cdot 180} = 0,8712$$

$$\eta_{el} = 0,8712 \cdot 100\% = 87,12 \%$$

Učinkovitost elektrolizatora je 0,8712 ili 87,12% što ukazuje da je proces elektrolize energetski mnogo učinkovitiji u odnosu na pretvorbu kemijske energije u električnu u gorivnoj ćeliji

U trećem dijelu pokusa određena je ukupna učinkovitost sustava. Prema izrazu (3-1) učinkovitost sustavu računa se:

$$\eta_s = \eta_{el} \cdot \eta_{gc,p} = 0,8712 \cdot 0,3 = 0,26136$$

$$\eta_s = 0,26136 \cdot 100\% = 26,136\%$$

Učinkovitost sustava u ovom slučaju iznosi 0,26136 ili 26,136%. Malo više od četvrtine ulazne energije pretvori se u korisnu električnu energiju.

## 4. ISPITIVANJE UČINKOVITOSTI I ODREĐIVANJE RADNE TOČKE

U 4. poglavlju provedeno je nekoliko pokusa vezanih za ispitivanje učinkovitost elektrolizatora, gorivnih ćelija, te sustava gorivnih ćelija i elektrolizatora. Također, određena je radna točka sustava gorivnih ćelija i trošila u ovisnosti o spoju gorivnih ćelija za različite vrste trošila.

### 4.1. Ispitivanje učinkovitosti

U poglavlju 3.2.8. obavljena su uvodna mjerenja i napravljena je teorijska podloga za ispitivanje učinkovitosti. U poglavlju 4.1. dio mjerenja je ponovljen, kako bi se mogla napraviti usporedba s ostalim mjerenjima. Postupci mjerenja detaljno su objašnjeni u poglavlju 3.2.8.

#### 4.1.1. Ispitivanje učinkovitosti elektrolizatora u ovisnosti o struji

Pokus se sastoji od pet mjerenja istog postupka pri mijenjanju struje elektrolize. Postupak mjerenja je opisan u poglavlju 3.2.8. Obaviti će se pet mjerenja, za pet različitih struja elektrolize, od kojih će se svako ponoviti tri puta, te su tablici 4.1. prikazane srednje vrijednosti mjerenja.

**Tablica 4.1.** Učinkovitost elektrolizatora u ovisnosti o struji elektrolize.

Broj mjerenja	Struja elektrolize [A]	$U$ [V]	Srednja vrijednost proizvedenog vodika [ml]
1.	0,8	1,66	17
2.	1	1,71	21,33
3.	1,2	1,74	25,67
4.	1,6	1,84	33
5.	2	1,94	41,67

Porastom struje elektrolize raste napon, ali i volumen proizvedenog vodika, tablica 4.1.

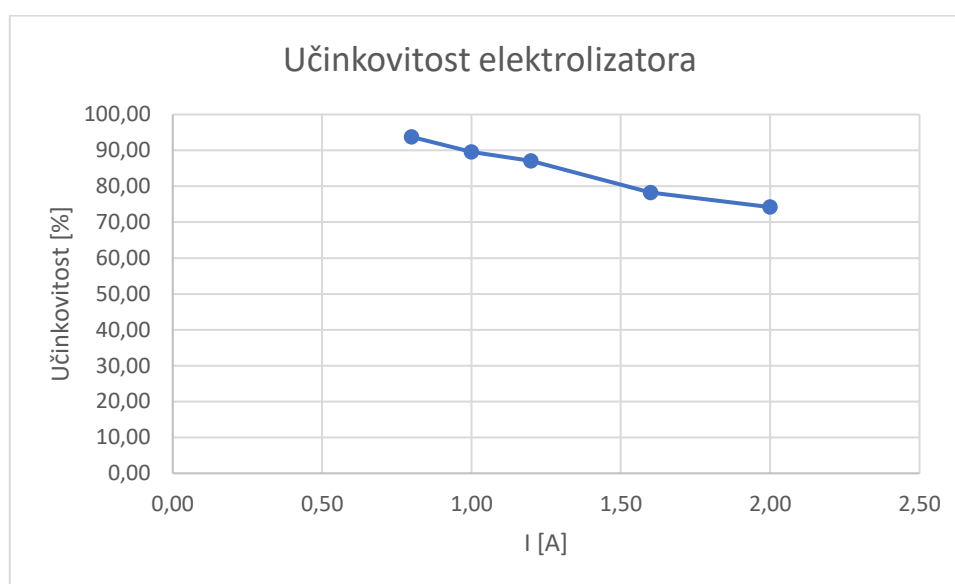
Prema izrazu (3-5) određuje se učinkovitost elektrolizatora. Ovdje je prikazan izračun učinkovitosti za jednu vrijednost struje elektrolize (0,8 A), a u tablici 4.2. prikazane su izračunate učinkovitosti za svih pet mjerenja.

$$\eta_{el} = \frac{H_{H_2} \cdot V}{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R} = \frac{11920 \cdot (17 + 1,8) \cdot 10^{-3}}{1,66 \cdot 0,8 \cdot 180} = 0,9375$$

**Tablica 4.2.** Učinkovitost elektrolizatora u ovisnosti o struji elektrolize.

Struja elektrolize [A]	0,8	1	1,2	1,6	2
Učinkovitost [%]	93,75	89,57	87,12	78,28	74,19

Porastom struje elektrolize učinkovitost elektrolizatora pada. U tablici 4.2. osjenčan je slučaj sa najvećom učinkovitošću. Na slici 4.1. prikazan je grafički prikaz ovisnosti učinkovitosti o struji elektrolize prema podacima iz tablice 4.2.



**Slika 4.1.** Učinkovitost elektrolizatora u ovisnosti o struji elektrolize

#### 4.1.2. Ovisnost učinkovitosti gorivnih ćelija u serijskom spoju

Pokus se sastoji od pet mjerenja pri mijenjanju struje koja teče strujnim krugom. Postupak mjerenja opisan je u poglavlju 3.2.8. Svako mjerenje ponovljeno je tri puta, za pet različitih vrijednosti struja  $I$ , koje teku strujnim krugom, te su u tablici 4.3. prikazane srednje vrijednosti tih mjerenja.

**Tablica 4.3.** Učinkovitost gorivnih ćelija u ovisnosti o struji (serijski spoj).

Broj mjerenja	$I$ [A]	Srednja vrijednost napona [V]	Srednja vrijednost potrošenog vodika [ml]
1.	0,2	1,32	9
2.	0,4	1,0067	16,67
3.	0,7	0,6367	30,33
4.	0,8	0,589	34
5.	1	0,3067	39,67

Porastom struje napon pada, ali i volumen potrošenog vodika raste.

Prema izrazu (3-4) može se odrediti učinkovitost gorivnih ćelija u serijskom spoju. Ovdje je prikazan izračun učinkovitosti za jednu vrijednost struje (0,2 A), a u tablici 4.4. prikazane su izračunate učinkovitosti za svih pet mjerenja.

$$\eta_{gc,s} = \frac{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R}{H_{H_2} \cdot V} = \frac{1,32 \cdot 0,2 \cdot 180 + 0,2^2 \cdot 0,1}{11920 \cdot (9 - 1,8) \cdot 10^{-3}} = 0,5538$$

U tablici 4.4. prikazana je i vrijednosti radne snage ovako spojenih ćelija. Radna snaga ćelija računa se prema izrazu:

$$P_{gc} = U \cdot I \text{ [W]} \quad (4-1)$$

gdje je: -  $P_{gc}$  – radna snaga gorivnih ćelija [W]

-  $U$  – srednja vrijednost napona [V]

-  $I$  – struja [A]

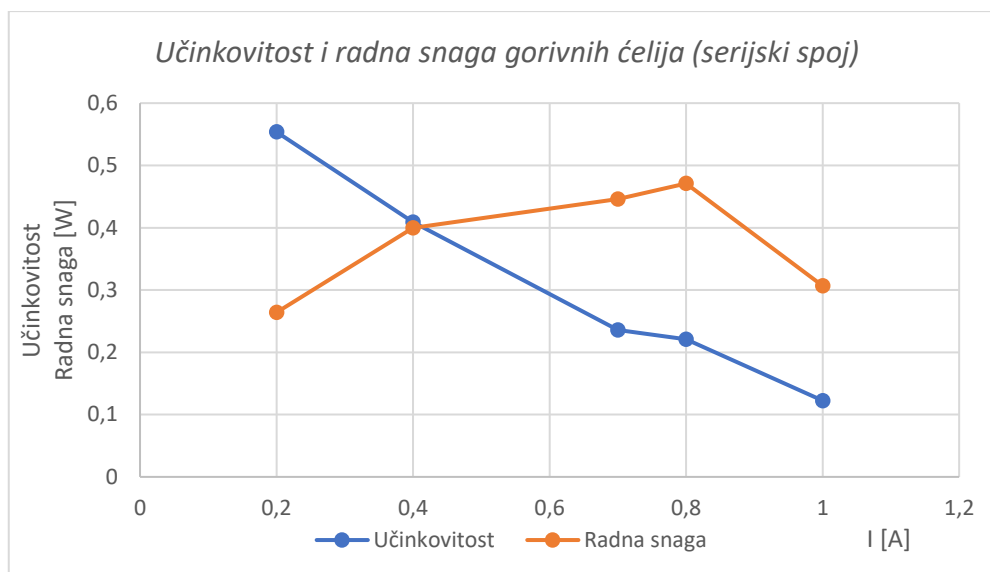
**Tablica 4.4.** Učinkovitost i radna snaga gorivnih ćelija u ovisnosti o struji (serijski spoj).

Vrijednost struje [A]	0,2	0,4	0,7	0,8	1
Učinkovitost [%]	55,38	40,9	23,6	22,11	12,25
Radna snaga [W]	0,264	0,403	0,446	0,471	0,307

Može se zaključiti da ćelije neće imati najveću učinkovitost i radnu snagu na istoj vrijednosti struje. U praktičnim primjenama se teži nazivnoj radnoj snazi, pri čemu se ne gleda uvijek na



najveću moguću iskoristivost. U tablici 4.4. osjenčan je slučaj u kojem je postignuta najveća radna snaga gorivnih ćelija. Na slici 4.2. grafički su prikazane ovisnosti učinkovitosti i radne snage gorivnih ćelija u ovisnosti o struji.



**Slika 4.2.** Učinkovitost i radna snaga gorivnih ćelija u ovisnosti o struji (serijski spoj)

#### 4.1.3. Ovisnost učinkovitosti gorivnih ćelija u paralelnom spoj

Svako mjerenje ponovljeno je tri puta, za pet različitih vrijednosti struja koje teku strujnim krugom  $I$ , te su u tablici 4.5. prikazane srednje vrijednosti tih mjerenja.

**Tablica 4.5.** Učinkovitost gorivnih ćelija u ovisnosti o struji (paralelni spoj).

Broj mjerenja	$I$ [A]	Srednja vrijednost napona [V]	Srednja vrijednost potrošenog vodika [ml]
1.	0,2	0,7176	6
2.	0,4	0,6233	9,67
3.	0,6	0,55	13,33
4.	1	0,34	19
5.	1,4	0,31	28,33

Porastom struje  $I$  napon pada, ali i volumen potrošenog vodika raste. Ponovno vrijedi da se proizvedenom vodikom mora oduzeti i vodik ispušten iz spremnika.

Prema izrazu (3-4) određuje se učinkovitost gorivnih ćelija u paralelnom spoju. Ovdje je prikazan izračun učinkovitosti za jednu vrijednost struje (0,2 A), a u tablici 4.6. su prikazane izračunate učinkovitosti za svih pet mjerenja.

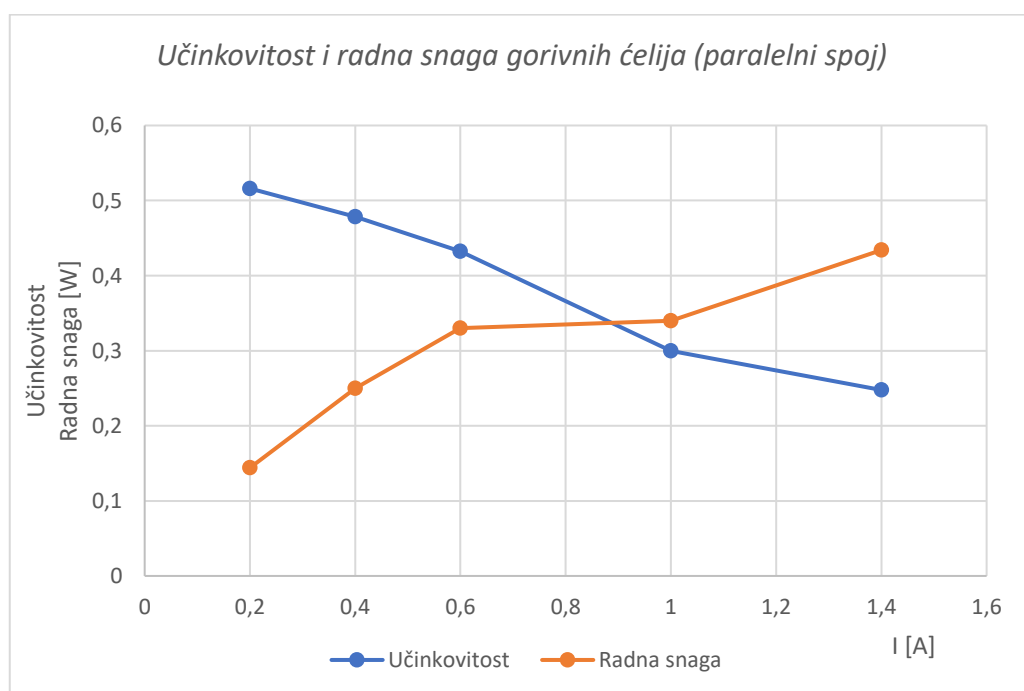
$$\eta_{gc,p} = \frac{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R}{H_{H_2} \cdot V} = \frac{0,7176 \cdot 0,2 \cdot 180 + 0,2^2 \cdot 0,1}{11920 \cdot (6 - 1,8) \cdot 10^{-3}} = 0.5161$$

U tablici 4.6. prikazane su i vrijednosti radne snage ovako spojenih ćelija. Radna snaga ćelija računa se prema izrazu (4-1).

**Tablica 4.6.** Učinkovitost i radna snaga gorivnih ćelija u ovisnosti o struji (paralelni spoj).

Vrijednost struje [A]	0,2	0,4	0,6	1	1,4
Učinkovitost [%]	51,61	47,86	43,25	30	24,77
Radna snaga [W]	0,144	0,25	0,33	0,34	0,434

Može se zaključiti da ćelije u paralelnom spoju neće imati najveću učinkovitost i najveću snagu pri istoj vrijednosti struje. Ipak, u paralelnom spoju je najveća radna snaga pri struji pri kojoj je i učinkovitost zadovoljavajuća. U tablici 4.6. osjenčan je slučaj u kojem je postignuta najveća radna snaga gorivnih ćelija. Na slici 4.3. grafički su prikazane ovisnosti učinkovitosti i radne snage gorivnih ćelija u ovisnosti o struji.



**Slika 4.3.** Učinkovitost i radna snaga gorivnih ćelija u ovisnosti o struji (paralelni spoj)

#### 4.1.4. Usporedba učinkovitost gorivnih ćelija za različite spojeve

U ovom pokusu uspoređene su učinkovitost ćelija za različite spojeve gorivnih ćelija. Kako bi u usporednoj analizi sve gorivne ćelije imale iste strujno-naponske karakteristike, kroz svaku ćeliju mora teći jednaka vrijednost struje, što dovodi do toga da će ukupna struja strujnog kruga kada su gorivne ćelije spojene paralelno iznositi dvostruko više nego kada su spojene serijski.

U ovom pokusu ispitana je učinkovitost jedne gorivne ćelije za tri različite vrijednosti struje, dok su vrijednosti za serijski i paralelni spoj preuzete iz prošlih pokusa, tablica 4.4., tablica 4.6. Postupak mjerenja isti je kao i u prijašnjim pokusima. Rezultati mjerenja za jednu gorivnu ćeliju prikazani su u tablici 4.7..

**Tablica 4.7.** Učinkovitost jedne gorivne ćelije.

Broj mjerenja	$I$ [A]	Srednja vrijednost napona [V]	Srednja vrijednost potrošenog vodika [ml]
1.	0,2	0,5967	5,67
2.	0,4	0,4067	10,67
3.	0,7	0,2	15,67

Prema izrazu (3-4) određuje se učinkovitost jedne gorivne ćelije. Radna snaga ćelije dobivena je iz izraza (4-1).

$$\eta_{gc,p} = \frac{U \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R}{H_{H_2} \cdot V} = \frac{0,5967 \cdot 0,2 \cdot 180 + 0,2^2 \cdot 0,1}{11920 \cdot (5,67 - 1,8) \cdot 10^{-3}} = 0,4657$$

Prikazana je usporedba učinkovitosti i radne snage za različite spojeve gorivnih ćelija za dvije vrijednosti struje koje teku svakom ćelijom.

U tablici 4.8. prikazana je usporedba za vrijednost struje od 0,2 A svake gorivne ćelije.

**Tablica 4.8.** Učinkovitost i radna snaga za različite spojeve ćelija.

Vrsta spoja	Jedna ćelija	Serijski spoj	Paralelan spoj
Vrijednost struje strujnog kruga [A]	0,2	0,2	0,4
Napon [V]	0,5967	1,0067	0,6233
Učinkovitost [%]	46,57	55,38	47,86
Radna snaga [W]	0,1193	0,264	0,25

U tablici 4.9. prikazana je usporedba za vrijednost struje od 0,7 A svake gorivne ćelije.

**Tablica 4.9.** Učinkovitost i radna snaga za različite spojeve ćelija.

Vrsta spoja	Jedna ćelija	Serijski spoj	Paralelan spoj
Vrijednost struje strujnog kruga [A]	0,7	0,7	1,4
Napon [V]	0,2	0,6367	0,31
Učinkovitost [%]	15,27	23,6	24,77
Radna snaga [W]	0,14	0,446	0,434

Pri obje vrijednosti struje serijski i paralelni spoj ćelija imaju povećanu radnu snagu u odnosu na jednu ćeliju. Pri manjim opterećenjima (struja od 0,2 A) taj omjer je 2,2 puta, budući da je broj ćelija udvostručen. No, ako se poveća opterećenje (struja od 0,7 A) za isti broj ćelija, omjer snaga se utrostruči. Pri manjim vrijednostima struje učinkovitost je veća, ali da bi se postigao rad u nazivnoj radnoj točki obično se gorivna ćelija opterećuje većom strujom. Učinkovitost spojeva gorivnih ćelija pri većem opterećenju (struja od 0,7 A) u odnosu na manja opterećenja (struja od 0,2 A) dvostruko se smanji.

#### 4.2. Maksimalna učinkovitost sustava gorivnih ćelija i elektrolizatora

Učinkovitost sustava računa se prema izrazu (3-1) tako da se učinkovitosti gorivnih ćelija i elektrolizatora pomnože. Maksimalna učinkovitost računa se tako da se za svaki podsustav u obzir uzme njegova najveća učinkovitost. Izračunate su maksimalne učinkovitosti za serijski i paralelni spoj gorivnih ćelija.

Učinkovitost elektrolizatora je najveća za vrijednost struje elektrolize od 0,8 A, te iznosi 93,75%, tablica 4.2.

Kod serijskog spoja gorivnih ćelija najveća učinkovitost bila je za struju od 0,2 A, pri kojoj učinkovitost iznosi 55,38%, tablica 4.4.

Učinkovitost gorivnih ćelija potrebno je pomnožiti s učinkovitošću elektrolizatora:

$$\eta_{s,max} = \eta_{gc,s} \cdot \eta_{el} = 0,5538 \cdot 0,9375 = 0,5192$$

$$\eta_{s,max} = 0,5192 \cdot 100\% = 51,92\%$$

Maksimalna učinkovitost sustava sa serijski spojenim gorivnim ćelijama iznosi 51,92%.

Kod paralelnog spoja gorivnih ćelija najveća učinkovitost bila je za struju od 0,2 A, pri kojoj učinkovitost iznosi 51,61%, tablica 4.6.

Učinkovitost gorivnih ćelija potrebno je pomnožiti s učinkovitošću elektrolizatora:

$$\eta_{p,max} = \eta_{gc,p} \cdot \eta_{el} = 0,5161 \cdot 0,9375 = 0,4838$$

$$\eta_{p,max} = 0,4838 \cdot 100\% = 48,38\%$$

Maksimalna učinkovitost sustava sa paralelno spojenim gorivnim ćelijama iznosi 48,38%.

### **4.3. Određivanje radne točke sustava gorivnih ćelija i trošila**

U ovom pokusu cilj je odrediti radnu točku u kojoj radi sustav gorivnih ćelija i određenog trošila. Radna točka definira se kao točka u kojoj se sijeku strujno-naponske karakteristike trošila i izvora. Radna točka zapisuje se kao uređen par, u kojem prvi broj označava vrijednost struje, a drugi vrijednost napona. Odabrano trošilo spojeno je na serijski ili paralelni spoj gorivnih ćelija.

Pokus se vrši tako da se na trošilo dovede napon sa vanjskog izvora napajanja. Za izvor je korišten „3-Fold DC Supply“ koji se nalazi u programu Lucas-Nülle Labsoft. Napon izvora se postepeno povećava, te se bilježi vrijednosti struje. Iz dobivenih rezultata određuje se strujno-naponska karakteristika trošila. Karakteristike serijskog i paralelnog spoja gorivnih ćelija dobivene su u poglavlju 3.2.7. Sljedeći korak je crtanje karakteristiku trošila i karakteristike gorivnih ćelija na istom grafu, te pronalaženje vrijednosti napona i struje u kojima se karakteristike sijeku. Ta točka je radna točka.

Za dodatnu provjeru gorivne ćelije se izravno spajaju na trošilo, te se virtualnim instrumentima programa Lucas-Nülle Labsoft mjeri napon i struja.

Nakon mjerenja vrijednosti napona i struje i grafičkog određivanja radne točke, određuje se radna snaga trošila. Radna snaga trošila može se odrediti prema izrazu:

$$P_t = U \cdot I \text{ [W]} \quad (4-2)$$

gdje je: -  $P_t$  – radna snaga trošila [W]  
 -  $U$  – napon u radanoj točki [V]  
 -  $I$  – struja u radnoj točki [A]

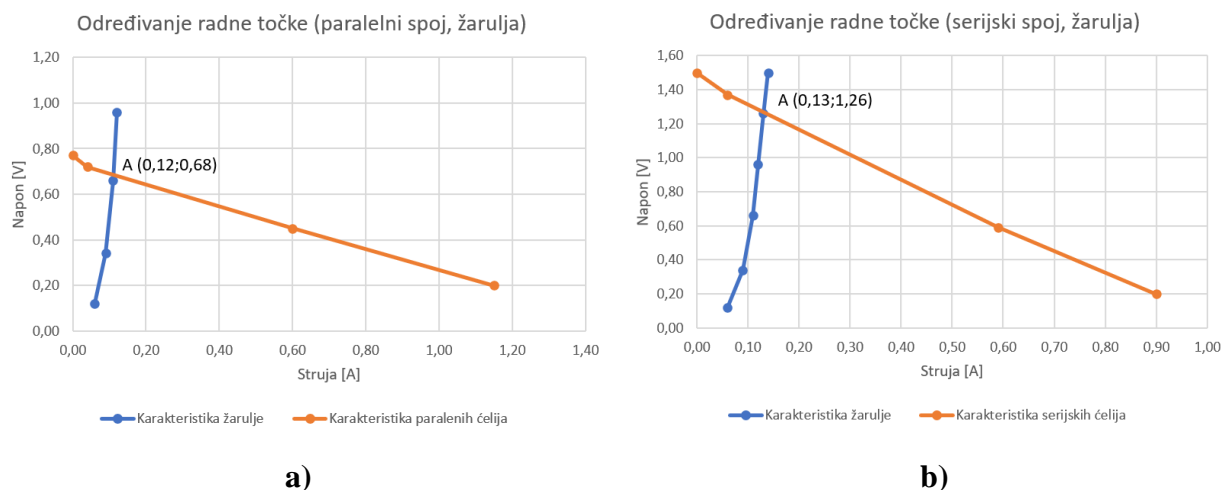
#### 4.3.1. Žarulja sa žarnom niti

Prvi pokus odrađen je sa žaruljom sa žarnom niti kao trošilom. Nazivni napon žarulje je 1,5 V što se može postići serijskim spojem dviju gorivnih ćelija. Prvi dio pokusa odrađen je s paralelnim spojem ćelija, a drugi sa serijskim. Mjerenja na žarulji prikazana su u tablici 4.10.

**Tablica 4.10.** *Određivanje strujno-naponske karakteristike žarulje sa žarnom niti.*

Napon [V]	0,12	0,34	0,6	0,96	1,26	1,5
Struja [A]	0,06	0,09	0,11	0,12	0,13	0,14

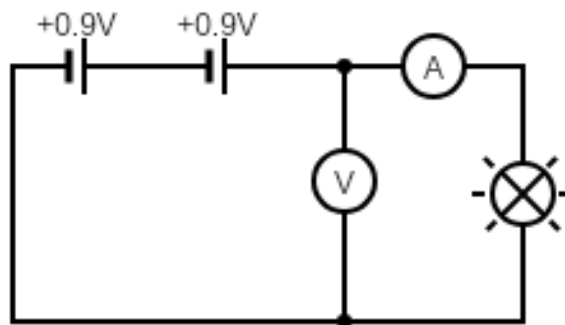
Na slici 4.4. prikazane su strujno-naponske karakteristike gorivnih ćelija i žarulje. Na lijevoj slici prikazano je određivanje radne točke kada su gorivne ćelije u paralelnom spoju, dok je na desnoj slici prikazano određivanje radne točke kada su ćelije u serijskom spoju.



**Slika 4.4.** *Određivanje radne točke:*  
 a) paralelni spoj, b) serijski spoj

Sa slike 4.4. a) može se vidjeti da se radna točka nalazi na 0,12 A i 0,68 V. Žarulja u ovom slučaju ne radi ni sa pola svog nazivnog napona, te se njezin sjaj jedva i primijeti. Sa slike 4.4. b) može se vidjeti da se radna točka nalazi na 0,13 A i 1,26 V. Žarulja u ovom slučaju radi na većem naponu nego u prethodnom pokusu, pa je i njezin sjaj dosta izraženiji.

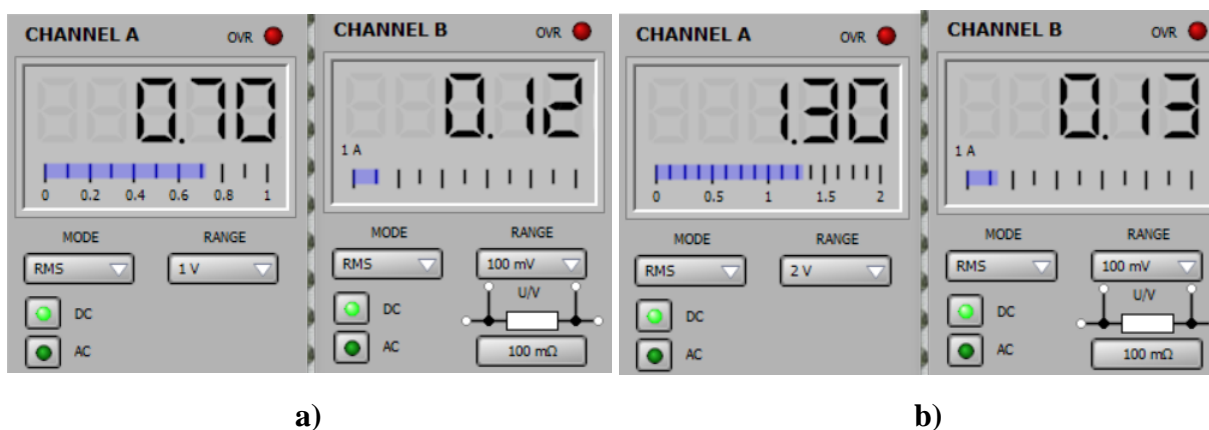
Na slici 4.5. prikazana je shema spajanja instrumenata dodanih u strujni krug gorivnih ćelija i žarulje sa žarnom niti. Prikazan je slučaj kada su ćelije spojene serijski.



**Slika 4.5.** Postavljeni mjerni instrumenti

Ampermetar se spaja serijski s žaruljom kako bi mjerio struju kroz nju, a voltmetar paralelno da mjeri napon na žarulji.

Na slici 4.6. prikazana su pokazivanja instrumenata za mjerenje vrijednosti napona i struje radne točke. Na lijevoj slici prikazana su pokazivanja kada su ćelije spojene paralelno, dok su na desnoj slici prikazana pokazivanja kada su ćelije u serijskom spoju.



**Slika 4.6.** Mjerenja vrijednosti napona i struje za određivanje radne točke  
 a) paralelni spoj, b) serijski spoj

Instrumenti pokazuju vrijednosti od 0,7 V i 0,12 A, slika 4.6. a) što potvrđuje koordinate radne točke dobivene grafičkim postupkom, slika 4.4. a) za paralelan spoj. Za serijski spoj instrumenti

pokazuju vrijednosti od 1,3 V i 0,13 A, slika 4.6. b) što potvrđuje koordinate radne točke dobivene grafičkim postupkom, slika 4.4. b). Razlika između vrijednosti dobivenih grafički i mjerenjem, pripisuje se nepreciznosti pri crtanju grafova. Bez obzira na minimalne razlike, može se zaključiti da je grafički postupak dovoljno točan za određivanje radne točke ovog spoja.

Nakon mjerenja i grafičkog određivanja radne točke sustava, određuje se radna snaga žarulje. Radna snaga računa se prema izrazu (4-2). U tablici 4.11. prikazane su vrijednosti radne snage.

**Tablica 4.11.** Radna snaga žarulje sa žarnom niti.

	Paralelni spoj ćelija		Serijski spoj ćelija	
	Grafičke vrijednosti	Izmjerene vrijednosti	Grafičke vrijednosti	Izmjerene vrijednosti
I [A]	0,12	0,12	0,13	0,13
U [V]	0,68	0,7	1,26	1,3
P [W]	0,0816	0,084	0,1638	0,169

Razlika između vrijednosti snage kod izmjerenih vrijednosti i vrijednosti određenih grafički minimalna. Također žarulja radi na dvostruko većoj snazi kada je spojena na serijski spoj ćelija. Uzrok tomu je što kod paralelnog spoja ćelijama teče dvostruko manja struja, te svaka od njih daje manju snagu.

#### 4.3.2. Istosmjerni električni motor male snage

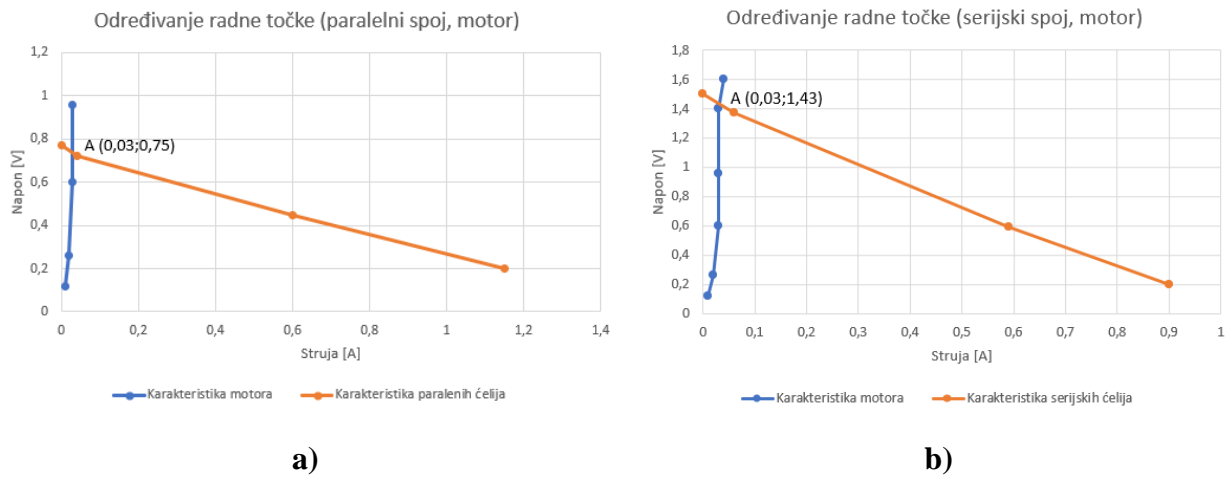
Postupak kod drugog pokusa jednak je kao i u prvom pokusu, jedina razlika je što se u ovom slučaju kao trošilo koristi istosmjerni električni motor. Nazivni napon motora je od 1,5 do 6 V, što znači da ga dvije gorivne ćelije mogu pogoniti vrlo malom snagom. Prvi dio pokusa odrađen je s paralelnim spojem ćelija, a drugi sa serijskim. Mjerenja na motoru prikazana su u tablici 4.12. Kod mjerenja vrijednosti napona i struje na motoru, nije se išlo preko 1,6 V, jer gorivne ćelije ne mogu dati napon veći od toga.

**Tablica 4.12.** Određivanje strujno-naponske karakteristike istosmjernog električnog motora.

Napon [V]	0,12	0,26	0,6	0,96	1,4	1,6
Struja [A]	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04



Na slici 4.7. prikazane su strujno-naponske karakteristike gorivnih ćelija i motora. Na lijevoj slici prikazano je određivanje radne točke kada su gorivne ćelije u paralelnom spoju, dok je na desnoj slici prikazano određivanje radne točke kada su ćelije u serijskom spoju.

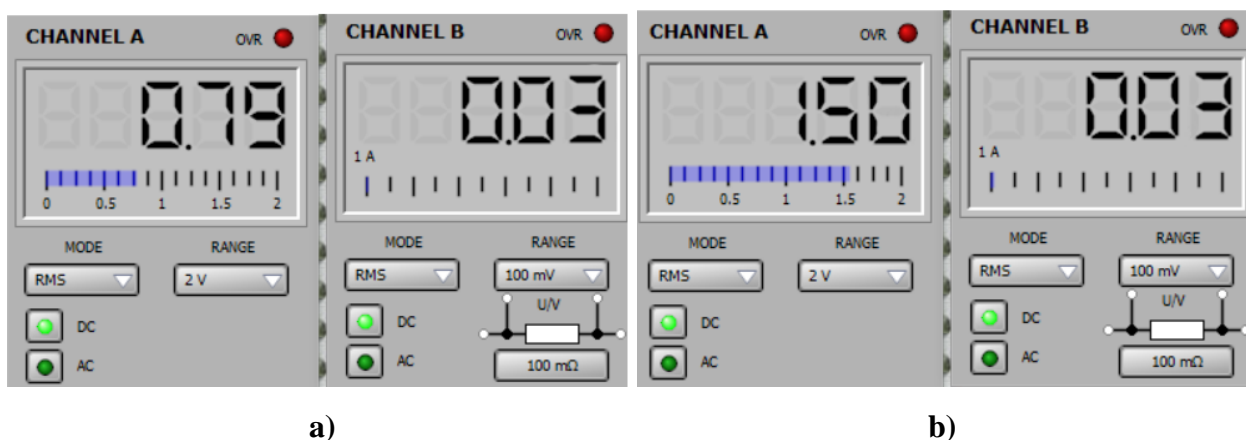


**Slika 4.7. Određivanje radne točke:**

*a) paralelni spoj, b) serijski spoj*

Sa slike 4.7. a) može se vidjeti da se radna točka nalazi na 0,03 A i 0,75 V. Motor u ovom slučaju radi na pola svog radnog napona, te je brzina vrtnje niska. Sa slike 4.7. b) može se vidjeti da se radna točka nalazi na 0,03 A i 1,43 V. Motor u ovom slučaju radi na višem naponu koji je približan donjoj granici nazivnog napona. Razlika se također vidi jer motor razvija veću brzinu nego kada je spojen na paralelan spoj ćelija.

Na slici 4.8. prikazana su pokazivanja instrumenata za mjerenje vrijednosti napona i struje radne točke. Na lijevoj slici prikazana su pokazivanja kada su ćelije spojene paralelno, dok su na desnoj slici prikazana pokazivanja kada su ćelije u serijskom spoju.



**Slika 4.8. Mjerenja vrijednosti napona i struje za određivanje radne točke**

*a) paralelni spoj, b) serijski spoj*

Instrumenti pokazuju vrijednosti od 0,79 V i 0,03 A, slika 4.8. a) što potvrđuje koordinate radne točke dobivene grafičkim postupkom, slika 4.7. a) za paralelan spoj. Za serijski spoj instrumenti pokazuju vrijednosti od 1,3 V i 0,13 A, slika 4.8. b) što potvrđuje koordinate radne točke dobivene grafičkim postupkom, slika 4.7. b).

Nakon mjerenja i grafičkog određivanja radne točke sustava, mogu se odrediti vrijednosti radne snage električnog motora. Radna snaga računa se prema izrazu (4-2). U tablici 4.13. prikazane su vrijednosti radne snage.

**Tablica 4.13.** Radna snaga istosmjernog električnog motora.

	Paralelni spoj ćelija		Serijski spoj ćelija	
	Grafičke vrijednosti	Izmjerene vrijednosti	Grafičke vrijednosti	Izmjerene vrijednosti
I [A]	0,03	0,03	0,03	0,03
U [V]	0,75	0,79	1,43	1,5
P [W]	0,0225	0,0237	0,0429	0,045

Razlika između vrijednosti snage kod izmjerenih vrijednosti i vrijednosti određenih grafički je zanemariva, tablica 4.13. Također motor radi na dvostruko većoj snazi kada je spojen na serijski spoj ćelija. Pri svim mjerenjima kroz motor je tekla mala struja, zato je i snaga mala. Kada bi se napon podigao u interval radnog napona motora, porasla bi i njegova radna snaga.

## 5. ZAKLJUČAK

Svi pokusi odrađeni su na Lucas-Nülle didaktičko-multimedijalna opremi s kojom dolazi program u kojem se dodatno opisuju početni pokusi pomoću kojih se upoznaje rad gorivnih ćelija, te ostalih podsustava makete. Prednost ovakve opreme je lako snimanje strujno-naponskih karakteristika, brzo mjerenje električnih veličina i mogućnost ponavljanja pokusa.

Analiza rada elektrolizatora provedena je kroz nekoliko pokusa. U jednom od njih potvrđeno je da se elektrolizom vode za isti vremenski period proizvede 60 ml vodika i 30 ml kisika. Tim podacima provjeren je kemijski sastav vode ( $H_2O$ ), odnosno da molekula vode sadrži dvostruko više atoma vodika od kisika.

Elektrolizator sadrži dva spremnika za skladištenje vodika i kisika. Kroz jedan od pokusa određena je stopa propuštanja vodika, koja iznosi 0,6 ml/min. Iz toga se može zaključiti da je za skladištenje plinova potrebna visoko kvalitetna oprema, jer propuštanje vodika smanjuje učinkovitost sustava elektrolizatora i gorivnih ćelija

Glavni dio ovog rada posvećen je određivanju učinkovitosti gorivnih ćelija, te cjelokupnog sustava. Kako bi se odredila učinkovitost sustava, potrebo je odrediti i učinkovitost elektrolizatora i gorivnih ćelija. Dobivena je maksimalna učinkovitost elektrolizatora od 93,75%, a porastom struje elektrolize učinkovitost pada, ali se elektroliza vode odvija značajno brže.

Pri početnom testiranju gorivnih ćelija uočena je loša učinkovitost, te preniska radna snaga. Stoga se je prije daljnjeg mjerenja učinkovitosti pristupilo rastavljanju ćelija i čišćenju membrane. Nakon što je membrana očišćena učinkovitost i radna snaga ćelije je porasla trostruko.

Učinkovitost gorivnih ćelija u ovisnosti o struji koja teče strujnim krugom određena je za paralelni i serijski spoj ćelija. Kod serijskog spoja ćelija najveća radna snaga postiže se pri strujama 0,7A i 0,8 A, pri čemu je učinkovitost nešto veća od 20%. Kod paralelnog spoja najveća radna snaga je pri najvećoj struji, kada je učinkovitost ćelija oko 25%.

Ispitana je učinkovitost gorivnih ćelija za različite spojeve, tako da se podesila ista struja kroz sve ćelije u paralelnom i serijskom spoju. Uz paralelni i serijski spoj, mjerena je i učinkovitost jedne gorivne ćelije. Paralelan spoj ćelija ima najveću iskoristivost od približno 25% pri najvećoj struji od 0,7 A kroz svaku ćeliju, dok jedna ćelija ima najmanju iskoristivost od približno 15%, te najmanju radnu snagu 0,14 W pri struji 0,7 A.

Maksimalna učinkovitost sustava računata je za serijski i paralelan spoj gorivnih ćelija. Maksimalna učinkovitost sustava jednaka je umnošku učinkovitosti elektrolizatora i gorivnih ćelija. Maksimalna učinkovitost sustava za serijski spoj iznosi 51,92%, dok za paralelni spoj iznosi 48,38%. Bitno je napomenuti da su to učinkovitosti ćelija pri jakosti struje od 0,2 A što odgovara podopterećenom radu gorivne ćelije.

Određena je radna točka spoja gorivnih ćelija i trošila, kada je kao trošilo spojena žarulja sa žarnom niti, te istosmjerni motor male snage. Za oba trošila pokus je proveden sa serijskim i paralelnim spojem ćelija. Zaključak je da oba trošila imaju veću radnu snagu u serijskom spoju, jer je postignut veći napon trošila.

## LITERATURA

- [1] Neven Duić, Iskorištavanje obnovljivih izvora energije, energetska učinkovitost i smanjenje emisija stakleničkih plinova kao pokretač razvoja “zelene ekonomije” u Hrvatskoj do 2050. Sveučilište u Zagrebu- Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb; dostupno na: [www.obnovljivi.com/pdf/PDF\\_OBNOVLJIVI\\_COM/Duic\\_21\\_HED\\_Forum\\_ZELENA\\_EKONOMIJA.pdf](http://www.obnovljivi.com/pdf/PDF_OBNOVLJIVI_COM/Duic_21_HED_Forum_ZELENA_EKONOMIJA.pdf)
- [2] Lucas-Nülle; didaktička oprema za podučavanje; dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.us/>
- [3] James Larminie, Fuel Cell Systems Explained, Oxford Brookes University, UK, 2003; dostupno na: [https://www.u-cursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi\\_blog/r/Fuel\\_Cell\\_Systems\\_Explained.pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Fuel_Cell_Systems_Explained.pdf)
- [4] Toni Bjažić; Adaptivno upravljanje istosmjernim uzlaznim pretvornikom napajanim gorivnim člankom, FER Zagreb, 2010; dostupno na: <https://www.bib.irb.hr/493392>
- [5] Hussein A Kazem, Experimental analysis of the performance characteristics of PEM Fuel Cells, 2016; dostupno na: [www.researchgate.net/publication/305307619\\_Experimental\\_analysis\\_of\\_the\\_performance\\_characteristics\\_of\\_PEM\\_Fuel\\_Cells](http://www.researchgate.net/publication/305307619_Experimental_analysis_of_the_performance_characteristics_of_PEM_Fuel_Cells)
- [6] J.H. Hirschenhofer, Fuel Cell Handbook, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy Federal Energy Technology Center P.O. Box 880, 1998.
- [7] Pil Hyong Lee, Performance Characteristics of a PEM Fuel Cell with Parallel Flow Channels at Different Cathode Relative Humidity Levels, Department of Mechanical Engineering, University of Incheon, Songdo Dong , Yeonsu-Ku, Incheon, Korea, 2009; dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/221792855\\_Performance\\_Characteristics\\_of\\_a\\_PEM\\_Fuel\\_Cell\\_with\\_Parallel\\_Flow\\_Channels\\_at\\_Different\\_Cathode\\_Relative\\_Humidity\\_Levels](https://www.researchgate.net/publication/221792855_Performance_Characteristics_of_a_PEM_Fuel_Cell_with_Parallel_Flow_Channels_at_Different_Cathode_Relative_Humidity_Levels)
- [8] J.J. Hwang, Parametric studies of a double-cell stack of PEMFC using Grafoil (TM) flow-field plates, National University of Tainan, 2002; dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/229165203\\_Parametric\\_studies\\_of\\_a\\_double-cell\\_stack\\_of\\_PEMFC\\_using\\_Grafoil\\_TM\\_flow-field\\_plates](https://www.researchgate.net/publication/229165203_Parametric_studies_of_a_double-cell_stack_of_PEMFC_using_Grafoil_TM_flow-field_plates)
- [9] Frano Barbir, PEM Fuel Cells, theory and practice, 2013; dostupno na: [books.google.hr/books?id=090dmOwMcdoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false](http://books.google.hr/books?id=090dmOwMcdoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false)
- [10] Sharon Thomas, Fuel Cells – Green Power, Los Alamos National Laboratory in Los Alamos, New Mexico; dostupno na: <http://www.dartmouth.edu/~cushman/courses/engs171/FuelCells-article.pdf>

## SAŽETAK

Napravljen je teorijski uvod u gorivne ćelije. Opisan je princip rada gorivnih ćelija, te elektrolizatora. Nakon uvodnog dijela pristupilo se pokusima upoznavanja s opremom. Proveden je pokus ispitivanja rada elektrolizatora, te dokazivanja kemijskog sastava vode. Odrađeni su pokusi ispitivanja proizvodnje i potrošnje vodika, te određivanja stope propuštanja spremnika vodika. Snimljene su karakteristike gorivnih ćelija u serijskom i paralelnom spoju. Pri testiranju su uočeni nedostaci u radu gorivnih ćelija, te je u objašnjen način na koji su oni otklonjeni. Ispitana je učinkovitosti pojedinih spojeva gorivnih ćelija, te učinkovitosti sustava gorivnih ćelija i elektrolizatora. Uspoređena je učinkovitost i radna snaga za različite vrste spoja ćelija. Odrađeni su pokusi ispitivanja radne točke sustava gorivnih ćelija i trošila.

**Ključne riječi:** gorivna ćelija, učinkovitost, radna točka, elektrolizator, Lucas-Nülle maketa

Title: Testing the efficiency of low power fuel cells

## **ABSTRACT**

A theoretical introduction to fuel cells was made. The work principles of fuel cells and electrolyzer were explained. After the theoretical part, introductory experiments were performed to get acquainted with the equipment. An experiment was performed to test the operation of the electrolyzer and to prove the chemical composition of water. Experiments were made to test hydrogen production and consumption and to determine the leakage rate from hydrogen tanks. A fuel cell characteristics test was performed. During the experiments, defects were encountered. Elimination of defects was explained. Efficiency of fuel cell compounds and efficiency of fuel cell and electrolyzer system were tested. A comparison of efficiency was made depending on the type of fuel cell compound. Experiments were performed to test the operating point of the fuel cell and consumer system.

**Keywords:** fuel cell, efficiency, operating point, electrolyzer, Lucas-Nülle mock up

## **ŽIVOTOPIS**

Marko Bačak rođen je 17. rujna 1998. godine u Bjelovaru. Odrastao je u Velikom Trojstvu gdje je pohađao osnovnu školu od 2004. do 2013. godine. Nakon završene osnovne škole upisuje prvi razred Tehničke srednje škole u Bjelovaru, smjer elektrotehničar. Stručnu praksu odrađivao je u Rotor d.o.o. u Bjelovaru. Srednjoškolsko obrazovanje završava 2017. godine i te iste godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku gdje je danas student treće godine istog studija, smjer elektroenergetika.