



VISOKA ŠKOLA
ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
U BEOGRADU

ALEKSANDRA GRUJIĆ
MILAN JOVIĆ

PRIRUČNIK

NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

This project has been funded with support from the European Commission. This publication reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.



WAMPPP
561821-EPP-I-2015
EPPKA2-CBHE-JP

ISBN 978-86-7982-267-3



9 788679 822673

Aleksandra Grujić

Milan Jović

NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE
PRIRUČNIK

Beograd, 2017.

NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE
PRIRUČNIK

Autori: dr Aleksandra Grujić, dipl.inž. el., (1975)
mast. inž. elektr. i računar. Milan Jović (1986)

Recezeni: dr Saša Stojković
dr Ivana Vlajić Naumovska

Izdavač: Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Vojvode Stepe 283, Beograd

Za izdavača: prof. dr Vera Petrović, direktor

This project has been funded with support from the European Commission. This publication reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

1. izdanje

Tiraž: 150

Štamparija: Razvojno – istraživački centar grafičkog inženjerstva TMF, Beograd

Format: A4

ISBN: 978 - 86 - 7982 - 267 - 3

CIP- Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије

620.9(075.8)(076)

ГРУЈИЋ, Александра, 1975-

Nove energetske tehnologije : priručnik / Aleksandra Grujić, Milan Jović. - 1. izd. - Beograd : Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, 2017 (Beograd : Razvojno-istraživački centar grafičkog inženjerstva TMF). - 143 str. : ilustr. ; 30 cm

Tiraž 150. - Bibliografija: str. 143.

ISBN 978-86-7982-267-3

1. Јовић, Милан, 1986- [аутор]

а) Енергетски извори - Вежбе

COBISS.SR-ID 253494540

SADRŽAJ

PREDGOVOR

EVIDENCIJA VEŽBI

Vežba 1

ELEKTROLIZA - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE 1

Vežba 2

GORIVNA ČELIJA - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE 19

Vežba 3

SPEKTAR ZRAČENJA I SOLARNI UGLOVI 47

Vežba 4

SOLARNA ENERGIJA - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE 61

Vežba 5

**MOGUĆNOSTI PRIMENE SOLARNE ENERGIJE NA PRIMERU JEDNE SOLARNE
ČELIJE KAO IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE 93**

Vežba 6

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE 125

Vežba 7

BIODIZEL 133

LITERATURA 143

PREDGOVOR

Priručnik za nove energetske tehnologije predstavlja prvo izdanje priručnika namenjenog prvenstveno studentima druge godine studija Visoke škole elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu. Korišćenjem ovog priručnika studenti stiču praktična znanja u oblasti novih energetske tehnologije.

Vežbe prate dinamiku predavanja iz predmeta Nove energetske tehnologije. Svaka vežba sadrži teorijsku osnovu neophodnu za realizaciju vežbe.

Priručnik za predmet Nove energetske tehnologije osim osnovnog, obezbeđuje i viši nivo znanja iz oblasti koja se bavi uvodom u obnovljive izvore energije.

Unapred se zahvaljujemo na korisnim primedbama i sugestijama čitalaca.

Autori

EVIDENCIJA VEŽBI

Student	
Ime i prezime:	Broj indeksa:

Vežba	Datum	Potpis
1. vežba		
2. vežba		
3. vežba		
4. vežba		
5. vežba		
6. vežba		
7. vežba		

Vežba 1

ELEKTROLIZA - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE

- ☐ **Hidroliza – Osnovni principi**
- ☐ **Krive karakteristika generatora vodonika**
- ☐ **Proračun efikasnosti generatora vodonika**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Prva vežba obrađuje elektrolizu kroz tri eksperimenta koja se izvode uz pomoć trenažera čiste energije.

Eksperiment 1 – Hidroliza – Osnovni principi: U ovom eksperimentu studenti će izvršiti elektrolizu sa generatorom vodonika. Studenti, takođe, određuju napon dekompozicije vode. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Istorijski razvoj elektrolize, Opasnosti od vodonika, Pitanja u vezi eksperimenta i Pitanja za razumevanje parametara hidrolize.

Eksperiment 2 – Krive karakteristika generatora vodonika: U ovom eksperimentu studenti će odrediti kako izgleda strujno-naponska karakteristika i karakteristika snaga-napon za generator vodonika. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Pitanja u vezi vode, vodonika i elektrolize, Pitanja u vezi eksperimenta.

Eksperiment 3 – Proračun efikasnosti generatora vodonika: U ovom eksperimentu studenti će proračunati energetska efikasnost generatora vodonika. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Pitanja u vezi jednačina hemijske reakcije za hidrolizu, Pitanja u vezi eksperimenta, Pitanja u vezi fizičkih parametara kao što su gorivna vrednost, toplotna vrednost i gasna konstanta, Pitanja u vezi drugog Faradejevog zakona.

1. Hidroliza – Osnovni principi

Molekul je veza između dva ili više atoma. Voda je molekul formiran iz dva gasa, od jednog atoma kiseonika i dva atoma vodonika. Oni formiraju vezu zajedno, stoga, hemijska formula za vodu je H_2O .

Destilovana voda je voda koja je isparila i potom ponovo kondenzovala. Ovaj postupak filtrira mnoge strane supstance. Dejonizovana voda se dobija kroz višestruke korake prečišćavanja. Nakon preliminarnog prečišćavanja, voda je filtrirana koristeći osmotsku membranu. Čistoća dejonizovane vode može biti veća od destilovane vode.

U elektrolizi, električna struja prolazi između dve elektrode, kroz elektrolit, u kome dolazi do razbijanja elektrolita na manje komade. U hidrolizi, elektrolit je voda. Voda se razlaže na gasovite elemente, kiseonik i vodonik. Vodonik se može koristiti u gorivnoj ćeliji za proizvodnju električne energije. Zahvaljujući svojoj jednostavnoj primeni, hidroliza je jedna od najznačajnijih metoda za proizvodnju vodonika.

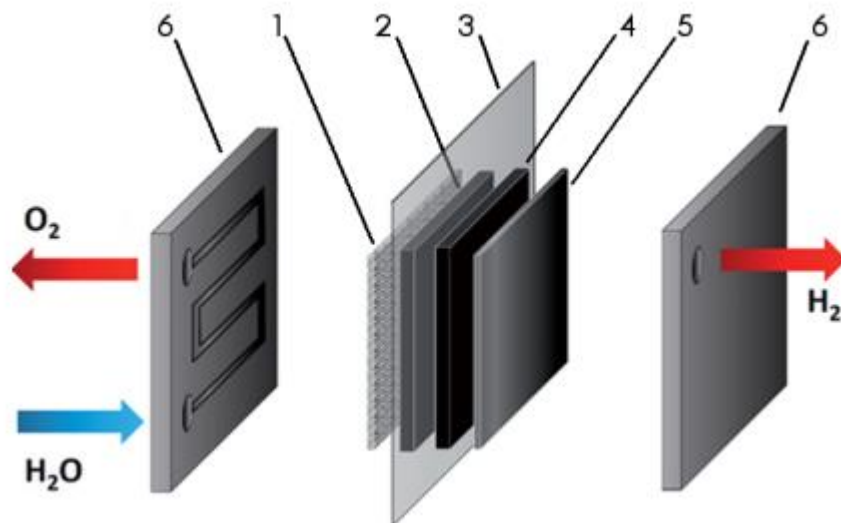
Eng. Proton Exchange Membrane (PEM) ili propusna membrana za protone. PEM generator vodonika se primarno koristi u industrijske svrhe, jer se može postići visok nivo efikasnosti.

PEM membrana je polupropustljiva membrana koja dozvoljava određenim molekulima da prođu kroz nju, dok drugim ne. Koristi se za razdvajanje proizvoda reakcije, u ovom slučaju vodonika i kiseonika. Ona, takođe, pojednostavljuje transport jona vodonika. Ova membrana je svega 0.25 mm debljine i može biti napravljena od sintetičkih polimera kao što su Nafion ili Teflon.

Svaka strana PEM membrane je povezana sa elektrodom, jedna elektroda se naziva anoda, a druga katoda. Osnovne komponente PEM ćelije za elektrolizu su:

- Sklop membrane i elektroda:
 - PEM membrana,
 - Provodni iridijum (anoda, katalizator),
 - Obložen platinom porozni ugljenik (katoda, katalizator).
- Porozni sloj za difuziju gasa:
 - Titanijumske i ugljenične ploče. One prenose struju od bipolarnih ploča i doprinose oslobađanju gasova tokom elektrolize.
- Bipolarne ploče formiraju granice ćelije i proizvedene su sa ulazom za vodu i izlazom za gas.

Na slici 1 prikazan je izgled ćelije za elektrolizu:



Slika 1: Izgled ćelije za elektrolizu u PEM elektrolizeru

1 Titanijumski sloj za difuziju gasa

2 Iridijumski katalizator

3 Nafion membrana

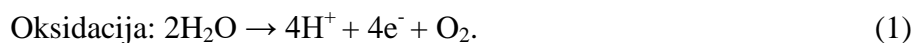
4 Platinumski katalizator

5 Ugljenični sloj za difuziju gasa

6 Bipolarne ploče

U trenažeru čiste energije, slojevi za difuziju gasa povezuju elektrolizer i napajanje (energetska kontrolna tabla). Crvena elektroda ima veći električni potencijal od crne elektrode. Ovo rezultira u električni napon.

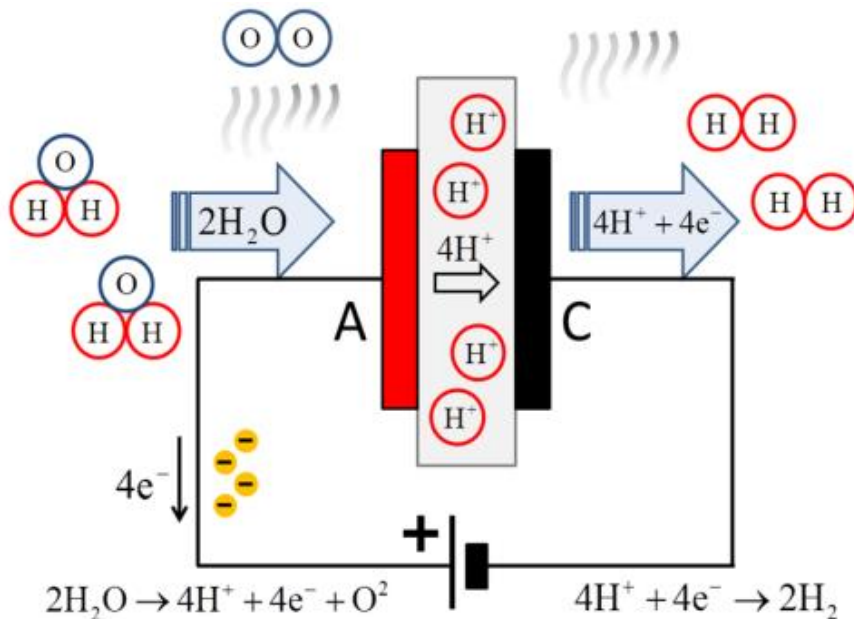
Elektrolizer deli čistu vodu na vodonik i kiseonik: dve elektrode pod naponom su uronjene u vodu i električni potencijal deli molekule vode. Parcijalne reakcije su kako sledi. Na anodi, molekuli vode su oksidovani na kiseonik i protone, oslobađajući elektrone:



Ovi joni vodonika H^+ migriraju sa pozitivne elektrode (anode) kroz membranu do negativne elektrode (katode), tako zatvarajući električno kolo u PEM generatoru vodonika i balansiraju njegove unutrašnje promene. Na katodi, joni vodonika H^+ preuzimaju elektrone e^- i formiraju gas vodonik:



Na slici 2 imamo prikaz elektrohemijskih reakcija tokom elektrolize.



Slika 2: Elektrohemijske reakcije tokom elektrolize: A = anoda; C = katoda; membrana se nalazi između A i C.

Eksperiment 1 - Hidroliza – Osnovni principi

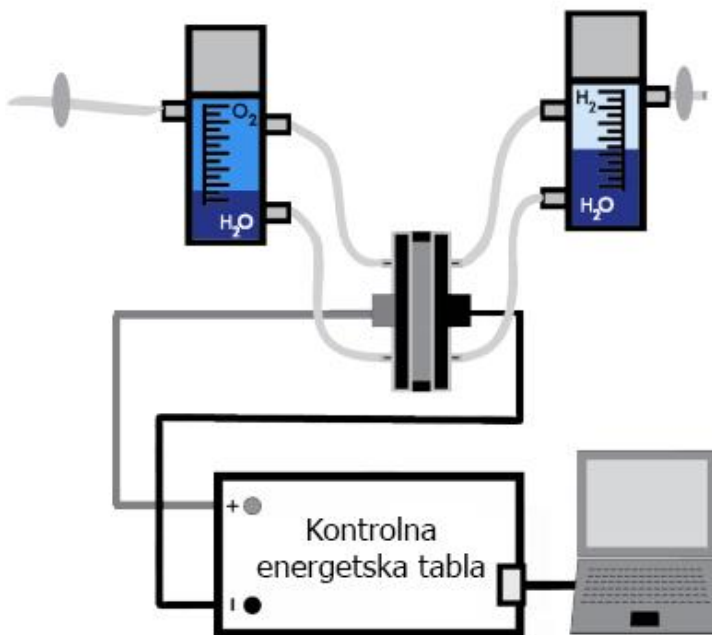
Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti izvrše elektrolizu vode, odrede hemijski sastav vode, uoče bitne pojave i da na osnovu njih izvedu ispravne zaključke.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: Clean Energy Trainer (CET) softver (CET program), generator vodonika, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, potrošač u vidu dve sijalice smeštene u kćište u obliku kućice (potrošač), 4 skladišna kanistera napunjena sa destilovanom vodom do nivoa označenog sa 5 cm^3 , 9 poveznih creva, 2 pričvršćivača creva, 1 crni kabl i 1 crveni kabl.

Uputstva za eksperiment:

Šta se dešava sa vodom tokom elektrolize?

Na slici 3 prikazana je postavka za proizvodnju vodonika sa energetsom kontrolnom tablom koja služi za napajanje generatora vodonika.



Slika 3: Postavka eksperimenta za proizvodnju vodonika

Kako se potrošnja vodonika ponaša?

Proizvodnja vodonika:

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 3; napuniti sve skladišne kanistere sa vodom do oznake od 5 cm^3 , ukoliko to već nije urađeno.
2. Zatvoriti izlaz gasa iz skladišnog kanistera kiseonika.
3. Zatvoriti izlaz gasa iz skladišnog kanistera vodonika.
4. Izabrati H_2 "Hydrogen generator" u programu.
5. Postaviti ciljanu struju na 600 mA. (*Kada se postavlja ciljana struja, treba osigurati da napon ostane ispod 2.3 V! Veoma visoki naponi će oštetiti generator vodonika.*)
6. Očitati količine vodonika i kiseonika koje su proizvedene, i uneti vrednosti u tabelu na radnom listu.

7. Postaviti ciljanu struju na 650 mA.
8. Očitati količine vodonika i kiseonika koje su proizvedene, i uneti vrednosti u tabelu na radnom listu.
9. Zaustaviti elektrolizu u programu: postaviti ciljanu struju na 0 mA.

Pri kom naponu voda u postupku elektrolize prelazi u vodonik i kiseonik?

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 3.
2. Napuniti sve skladišne kanistere sa vodom do oznake od 5 cm³.
3. Proveriti da li su gasni izlazi, za kiseonik i vodonik zatvoreni.
4. Postepeno povećavati ciljanu struju (prema tabeli iz 7. pitanja) i očitavati napon. Posmatrati skladišne kanistere vodonika i kiseonika. (Kada se postavlja ciljana struja, treba osigurati da napon ostane ispod 2.3 V! Veoma visoki naponi će oštetiti generator vodonika.)

ZADACI za eksperiment 1 (radni list 1)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Kako se naziva razlaganje provodne tečnosti uz pomoć električnog napona?
2. Kada je elektroliza otkrivena?
3. Kako se proizvodi vodonik?
4. Da li je vodonik opasan? Koje efekte mogu proizvesti vrednosti iz tabele?

Tabela 1: Svojstva vodonika i metana koja su relevantna za bezbednost. Izvor: Johannes Feyrer, Julian Jepsen, Thilo Schulz: Wasserstoff und dessen Gefahren - Ein Leitfaden für Feuerwehren, Köln, Deutschland, Oktober 2008.

	Vodonik H ₂	Metan CH ₄
Gustina [kg/m ³]	0.0899	0.7175
Temperatura zapaljenja u vazduhu [°C]	585	540
Maksimalna brzina plamena [cm/s]	346	43
Opseg zapaljivosti u vazduhu [Vol.%]	4-73	5-14

5. Teorijski, pri kom naponu počinje elektroliza vode?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

6. Šta se dešava sa vodom tokom elektrolize?

Ciljana struja = 600 mA		
Vreme [min]	Vodonik [cm ³]	Kiseonik [cm ³]
1		
2		
3		
4		

Ciljana struja = 650 mA		
Vreme [min]	Vodonik [cm ³]	Kiseonik [cm ³]
1		
2		

7. Pri kom naponu tokom elektrolize voda prelazi u vodonik i kiseonik?

--

Ciljana struja [mA]	Napon [mV]	Brzina H ₂ proizvodnje
0		
100		
200		
300		
400		
500		
550		
600		
650		

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

- Šta se zapravo dešava tokom elektrolize?
- Da li je količina vodonika proizvedena tokom eksperimenta dovoljna da izazove eksploziju?
- Da li je teorijski napon razlaganja, dekompozicije, zavistan od generatora vodonika ili vode?
- Zašto je duplo više vodonika proizvedeno nego kiseonika?
- Zašto je konstatovani napon razlaganja veći od teorijskog napona razlaganja?
- Da li je proizvodnja vodonika i kiseonika konstantna tokom elektrolize?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

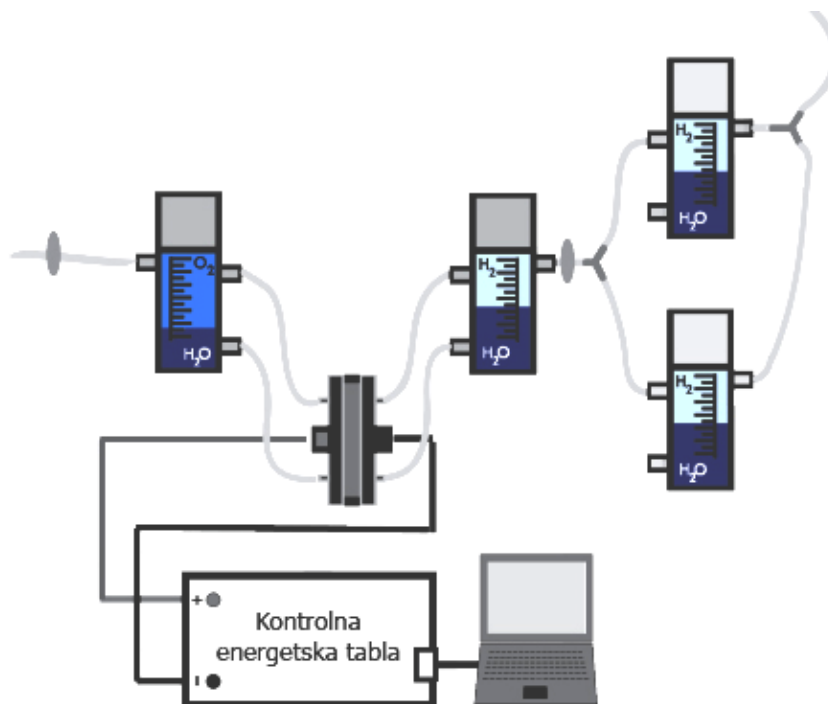
Eksperiment 2 – Krive karakteristika generatora vodonika

Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti snime strujno-naponske karakteristike, prikažu krive snaga/napon i opišu glavne odlike krivih karakteristika, kao što je prepoznavanje opsega vrednosti za maksimalnu snagu.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, generator vodonika, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, potrošač, 4 skladišna kanistera napunjena destilovanom vodom do nivoa označenog sa 5 cm³, 9 poveznih creva, 2 pričvršćivača creva, 1 crni kabl i 1 crveni kabl.

Na slici 4 prikazana je postavka za eksperiment 2.

Koju tendenciju imaju krive karakteristika generatora vodonika?



Slika 4: Postavka eksperimenta za generator vodonika sa četiri skladišna kanistera

Kako se ponaša potrošnja vodonika?

1. Postaviti eksperiment kako je prikazano na slici 4. Popuniti sve skladišne kanistere vodom do oznake od 5 cm³, ukoliko to već nije urađeno.
2. Zatvoriti izlaz gasa iz skladišnog kanistera kiseonika.
3. Zatvoriti tipični izlaz gasa iz skladišnog kanistera vodonika.
4. Izabrati H₂ "Hydrogen generator" u programu.
5. Postepeno povećavati ciljanu struju (prema tabeli u okviru pitanja 4) i očitavati napon. Posmatrati skladišne kanistere vodonika i kiseonika. (Kada se postavlja ciljana struja, treba osigurati da napon ostane ispod 2.3 V! Veoma visoki naponi će oštetiti generator vodonika.)

ZADACI za eksperiment 2 (radni list 2)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Šta je destilovana voda?
2. Da li postoje neke druge primene elektrolize?
3. Koje prednosti vodonik ima u odnosu na prirodni gas?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

4. Kako izgledaju krive karakteristika generatora vodonika?

Ciljana struja [mA]	Napon U [mV]	Snaga P [mW]
0		
100		
200		
300		
400		
500		
550		
600		
650		

5. Pri kom naponu će struja početi da teče u generatoru vodonika?

--

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

6. Šta je objašnjenje za ovaj kasni protok struje?
7. Da li je destilovana voda provodna?
8. Da li elektroliza zahteva jednosmernu ili naizmeničnu struju?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Eksperiment 3 – Proračun efikasnosti generatora vodonika

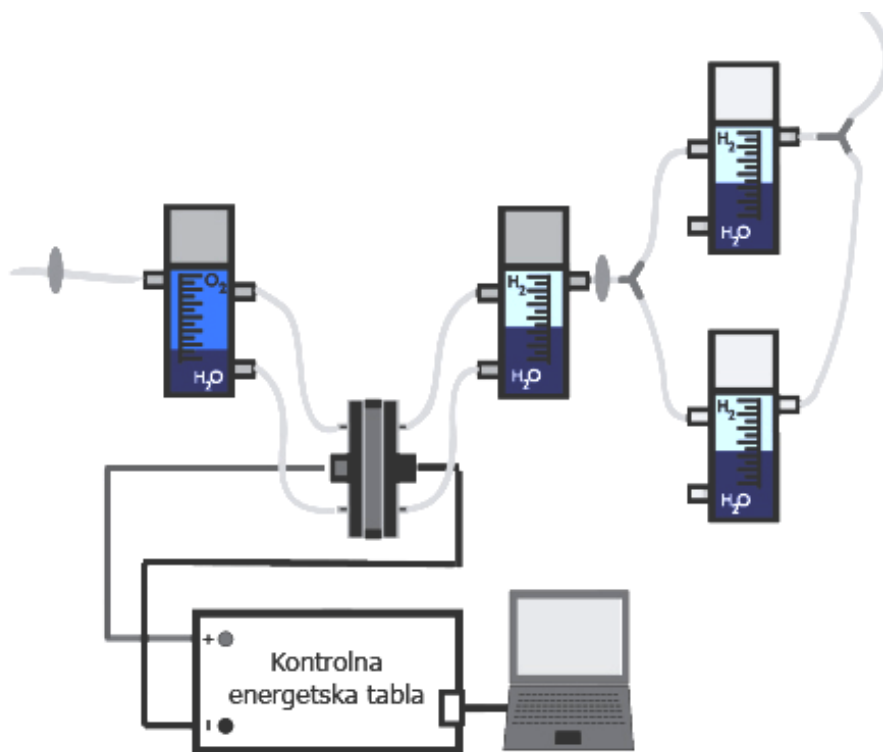
Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti proračunaju efikasnost generatora vodonika, odrede jednačine hemijske reakcije i parametre hidrolize, razumeju fizičke parametare kao što su gorivna vrednost, toplotna vrednost i gasna konstanta, kao i da se upoznaju sa Drugim Faradejevim zakonom.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, generator vodonika, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, potrošač, 4

skladišna kanistera napunjena sa destilovanom vodom do nivoa označenog sa 5 cm^3 , 9 poveznih creva, 2 pričvršćivača creva, 1 crni kabl i 1 crveni kabl.

Koju tendenciju imaju krive karakteristika generatora vodonika?

Na slici 5 prikazana je postavka eksperimenta 3.



Slika 5: Postavka eksperimenta za generator vodonika sa četiri skladišna kanistera

Kako se ponaša potrošnja vodonika?

1. Postaviti eksperiment kako je prikazano na slici 5; popuniti sve skladišne kanistere vodom do oznake od 5 cm^3 , ukoliko to već nije urađeno.
2. Zatvoriti izlaz gasa iz skladišnog kanistera kiseonika.
3. Zatvoriti tipični izlaz gasa iz skladišnog kanistera vodonika.
4. Izabrati H₂ "Hydrogen generator" u programu.

5. Postaviti ciljanu struju na 600 mA. (Kada se postavlja ciljana struja, treba osigurati da napon ostane ispod 2.3 V! Veoma visoki naponi će oštetiti generator vodonika.)
6. Nakon dva minuta, otvoriti izlaze vode i kiseonika u trajanju od 5 sekundi i potom ih ponovo zatvoriti.
7. Proveriti nivo vode. Nivo vode mora biti na tačno 5 cm^3 u oba kanistera. Dopuniti ukoliko je neophodno.

Kako bi se ovaj eksperiment uradio na adekvatan način potrebno je da po troje studenata rade u timu:

Student A: Posmatra količinu vodonika i proglašava kada je sledeća oznaka dostignuta (pogledati tabelu na radnom listu).

Student B: Označava vreme u sekundama pri svakom proglašavanju.

Student C: Snima vrednosti struje koristeći dugme “*Read measurement*” pri svakom proglašavanju. Na kraju se merenja sačuvaju, klikom na “*save measurement*”.

ZADACI za eksperiment 3 (radni list 3)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Šta je energetska efikasnost?
2. Šta je toplotna vrednost?
3. Koliko je visoka toplotna vrednost za vodonik?
4. Koliko je visoka toplotna vrednost za benzin?
5. Kako je ponašanje idealnog gasa opisano?
6. Šta je gasna konstanta?

--

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

7. Za svaku količinu vodonika, uneti vreme za koje je ta količina dostignuta, napon i struju.

Količina vodonika V [cm ³]	Vreme t [s]	Napon U [mV]	Struja I [mA]
0			
5			
10			
15			
20			
25			
30			

8. Uzeti poslednju grupu vrednosti iz tabele u okviru pitanja 7 za proračun efikasnosti η .

$$\eta = \frac{V_{\text{vodonika}} \cdot H_U}{U \cdot I \cdot t} \quad (3)$$

Gde je:

V_{vodonika} = proizvedeni nivo vodonika u m³,

H_U = niža toplotna vrednost vodonika: $9.9 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^3$,

U = napon generatora vodonika ($\text{mV}=10^{-3}\text{V}$),

I = struja generatora vodonika ($\text{mA}=10^{-3}\text{A}$).

9. Uneti količinu vodonika u nivo/vreme dijagramu.

10. Šta može biti određeno na osnovu nivo/vreme dijagrama?

11. Za šta se koristi efikasnost generatora vodonika?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

12. Koja je razlika između Faradejeve efikasnosti i energetske efikasnosti?
13. Šta je Faradejev zakon (elektrolize)?
14. Koja je uloga atmosferskog pritiska u generatoru vodonika?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 2

GORIVNA ĆELIJA - TRENAŽER ĆISTE ENERGIJE

- ☐ **Gorivna ćelija, snabdevanje kiseonikom, potrošnja vodonika**
- ☐ **Određivanje krivih karakteristika gorivne ćelije**
- ☐ **Proračun efikasnosti gorivne ćelije**
- ☐ **Efekat dimnjaka u gorivnoj ćeliji**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Druga vežba obrađuje gorivnu ćeliju kroz četiri eksperimenta koja se izvode uz pomoć trenažera čiste energije.

Eksperiment 1 – Gorivna ćelija, snabdevanje kiseonikom, potrošnja vodonika: U ovom eksperimentu studenti će otkriti kako da upotrebe gorivnu ćeliju. Eksperimentisanjem će saznati da direktno snabdevanje kiseonikom pozitivno utiče na snagu gorivne ćelije. Potrošnja vodonika se posmatra tokom vremena. Posmatra se uticaj povećanja snabdevanja vazduhom. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Opšta pitanja o gorivnoj ćeliji, Pitanja o eksperimentu, Pitanja o razumevanju funkcionisanja gorivnih ćelija.

Eksperiment 2 – Određivanje krivih karakteristika gorivne ćelije: U ovom eksperimentu studenti će odrediti kako izgleda strujno-naponska karakteristika i karakteristika snaga-struja za gorivnu ćeliju. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Opšta pitanja o gorivnoj ćeliji, Pitanja o eksperimentu, Pitanja o razumevanju funkcionisanja gorivnih ćelija.

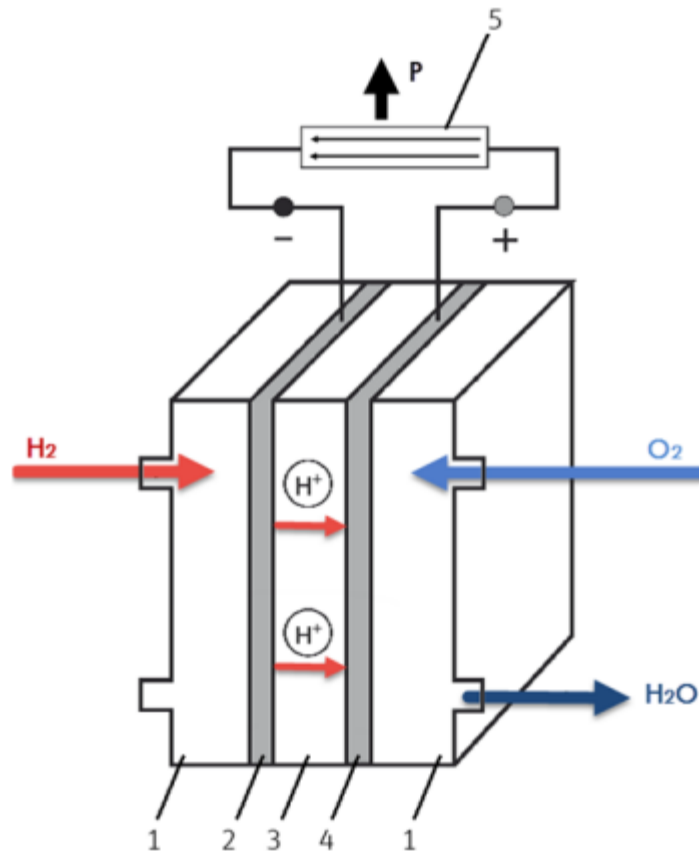
Eksperiment 3 – Proračun efikasnosti gorivne ćelije: U ovom eksperimentu studenti će proračunati efikasnost gorivne ćelije. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Konstrukcija gorivnih ćelija, Pitanja o eksperimentu, Pitanja o razumevanju funkcionisanja gorivnih ćelija.

Eksperiment 4 – Efekat dimnjaka u gorivnoj ćeliji: U ovom eksperimentu, studenti će odrediti karakteristične vrednosti gorivne ćelije u različitim položajima. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Opšta pitanja o gorivnoj ćeliji, Pitanja o eksperimentu, Pitanja o razumevanju funkcionisanja gorivnih ćelija.

1. Energija gorivne ćelije - Osnovni principi

Gorivna ćelija pretvara hemijsku energiju u električnu energiju i može da provede električnu struju ukoliko je povezana u električno kolo. Električno opterećenje je komponenta ili parcijalno kolo koje troši električnu energiju.

Na slici 1 prikazana je konstrukcija i način funkcionisanja jednostavne gorivne ćelije.



Slika 1: Izgled i funkcija jednostavne gorivne ćelije

1 Ploča za protok gasa

2 Anoda

3 Elektrolit (polimerna membrana)

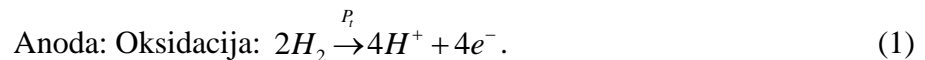
4 Katoda

5 Električno opterećenje

PEM (Eng. Proton Exchange Membrane) gorivna ćelija se obično sastoji od dve elektrode napravljene od poroznog materijala od ugljenika i polimerne membrane.

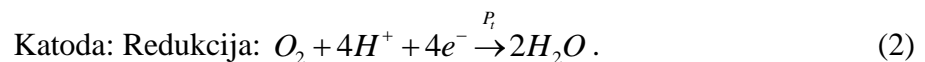
Membrana je zbijena između anode (2) i katode (4). Ona služi kao elektrolit (3) i razdvaja gasove vodonika i kiseonika. Membrana se sastoji od politetrafluoroetilenskog kopolimera i premazana je fino razmazanom platinom. Platina je katalizator za obe hemijske reakcije u gorivnoj ćeliji. Ploče za protok gasa su postavljene na spoljašnjim stranama elektroda (1). Ove ploče imaju male kanale koji provode gasove vodonika i kiseonika na odgovarajuće strane elektroda. Tokom čišćenja gorivne ćelije, voda, sporedni proizvod reakcije, se transportuje kroz ove kanale.

Gorivna ćelija pretvara hemijsku energiju, koja je prisutna u vodoniku i kiseoniku, u električnu energiju. Kiseonik oksidira uz pomoć katalizatora na anodi uz pražnjenje elektrona i proces je prikazan sledećom hemijskom reakcijom:



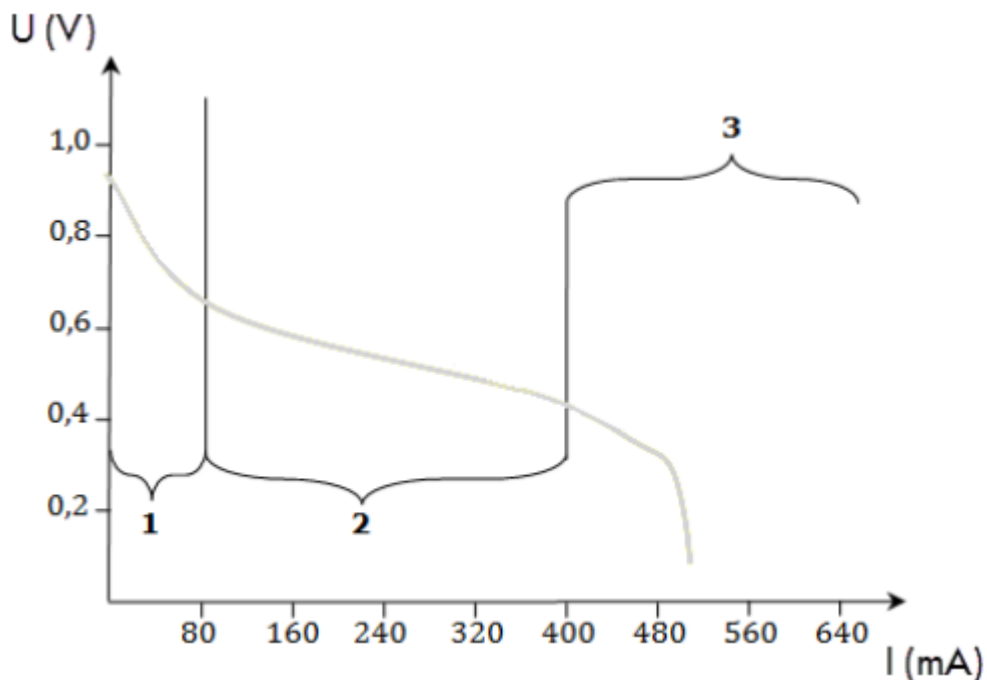
Ovi elektroni (e^-) se kreću od anode, koja postaje negativan pol ćelije tokom tog procesa, kroz spoljašnje kolo do katode, koja postaje pozitivan pol ćelije tokom tog procesa.

U isto vreme, joni vodonika se sele kroz membranu do katode i njihov broj se smanjuje, što znači da preuzimaju elektrone i proces je prikazan sledećom hemijskom reakcijom:



Redukcija takođe zahteva isti katalizator, obično platinu.

Gorivna ćelija stoga radi na istom funkcionalnom principu kao i baterija. Prednost u odnosu na bateriju je ta da ne mora da se ponovo puni i da se elektrode ne menjaju tokom hemijskih reakcija koje su u toku. U bateriji, uskladištena energija je u samim elektrodama, dok je kod gorivne ćelije energija uskladištena u gorivu. Na slici 2 prikazana je kriva strujno-naponske karakteristike gorivne ćelije.



Slika 2: Kriva karakteristike gorivne ćelije

Teoretski moguć napon vodonične gorivne ćelije u standardnim uslovima je 1.23 V. Ova vrednost je uzeta iz termodinamičkih podataka reakcije vodonika i kiseonika u vodu. U praksi, gubici tokom protoka struje događaju se kroz kinetičku inhibiciju reakcije, unutrašnji otpor, ili nedovoljnu difuziju. Stvarni napon koji oslobađa individualna ćelija je stoga od 0.4 do 0.9 V. Razlika između izmerenog napona i termodinamički mogućeg napona se naziva prepotencijal. Različiti faktori doprinose ovom prepotencijalu: pri niskim strujama, kriva karakteristike je određena katalitičkim procesima koji se dešavaju na elektrodama. Brzina pretvaranja vodonika i kiseonika je odgovorna za povećanje struje, a to je brzina kojom elektroni prelaze preko kontaktnih površina između molekula gasa i katalizatora od platine. Ova vrsta prepotencijala se naziva **aktivacioni prepotencijal** (1).

Svaka ćelija ima **unutrašnji otpor** (2), koji je, na primer, uzrokovan otporom na protok struje u elektrolitu, stujnim kolektorom i spoljašnjim električnim vodovima. Pad napona usled otpornosti se može uočiti pri visokim strujama, napon linearno opada, sa povećanjem struje.

Difuzioni prepotencijal (3) se javlja ako se gasovi elektrohemijском reakcijom troše brže kod katalizatora nego što mogu da dođu do katalizatora difuzijom. Tipični znak ovog

difuzionog prepotencijala je iznenadna silazna kriva strujno-naponske karakteristike. Napon naglo opada dok se struja povećava.

Eksperiment 1 - Gorivna ćelija, snabdevanje kiseonikom, potrošnja vodonika

Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti nauče puštanje u rad gorivne ćelije i generatora vodonika, znaju da izmere karakteristične vrednosti gorivne ćelije, da prikažu kvalitativnu zavisnost gorivne ćelije od kiseonika i uoče kakva je potrošnja vodonika gorivne ćelije tokom rada.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, gorivnu ćeliju, generator vodonika, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, potrošač, 4 skladišna kanistera napunjena sa destilovanom vodom do nivoa označenog sa 5 cm³, 9 poveznih creva, 2 pričvršćivača creva, 2 crna kabla, 2 crvena kabla i štopericu.

Postoji opasnost od opekotina. Ukoliko vodonik iscuri, on se može zapaliti i spaliti kožu, stoga treba izbeći stvaranje varnica. Provera curenja se mora sprovesti svaki put kada se sastavlja paket gorivnih ćelija.

Uputstva za eksperiment:

Kako gorivna ćelija radi?

Na slici 3 prikazan je izgled postavke za eksperiment 1 sa energetska kontrolnom tablom koja služi kao napajanje.

4. Izabrati H₂ “Hydrogen generator” u programu. (*Kada se postavlja ciljana struja, treba osigurati da napon ostane ispod 2.3 V! Veoma visoki naponi će oštetiti generator vodonika.*)
5. Postaviti generator vodonika na 650 mA i proizvesti 30 cm³ vodonika i 15 cm³ kiseonika.
6. Zaustaviti elektrolizu u programu: postaviti ciljanu struju na 0 mA.
7. Očistiti gorivnu ćeliju: otvoriti izlaz vodonika iz gorivne ćelije u trajanju od 1 s i zatim zatvoriti.
8. Pokrenuti ponovo generator vodonika dok se odgovarajuće količine ne dosegnu ponovo.
9. Povezati potrošač sa gorivnom ćelijom.
10. Zabeležiti zapažanja.
11. Zaustaviti elektrolizu u programu: postaviti ciljanu struju na 0 mA.
12. Isključiti generator vodonika sa kontrolne energetske table.
13. Odvojiti (isključiti) potrošača od gorivne ćelije.

Potrošnja vodonika:

14. Povezati gorivnu ćeliju na kontrolnu energetska tablu i prebaciti na “Fuel cell” režim u programu.

Moguće oštećenje zbog kratkog spoja

Naponski izvori na gorivnoj ćeliji oštećuju membranu. Kada je režim “Hydrogen generator”, kontrolna energetska tabla je naponski izvor koji može da uništi membranu. Generator vodonika, takođe postaje naponski izvor, kada je u stanju mirovanja, jer preostali vodonik u generatoru vodonika može reagovati sa kiseonikom. Stoga je potrebno da se gorivna ćelija povezuje samo kada je u “Fuel cell” režimu i nikada se ne sme povezivati istovremeno gorivna ćelija i generator vodonika na kontrolnu energetska tablu.

Korisni savet:

Očistiti gorivnu ćeliju sa vodonikom, kako bi uklonili vlagu, ako gorivna ćelija dostiže samo oko 1 V izlaznog napona:

Otvoriti izlaz vodonika iz gorivne ćelije i odmah ga zatvoriti (Napon gorivne ćelije će porasti na 3000 mV(staro)/4000 mV(normalno)/5000 mV(novo stanje).). Proizvesti vodonik ponovo do određene količine.

15. Postaviti ciljanu struju na 150 mA u programu.
16. Meriti vreme, očitati potrošnju vodonika i uneti vrednosti u tabelu na radnom listu.
17. Povećati ciljanu struju na 300 mA i ponoviti merenje.

Kako gorivna ćelija reaguje na direktno napajanje kiseonikom?

Proizvodnja vodonika:

1. Postaviti eksperiment kao na slici 3.
2. Izabrati H₂ "Hydrogen generator" režim.
3. Postaviti generator vodonika na 650 mA i proizvesti 30 cm³ vodonika.
4. Zaustaviti elektrolizu u programu.
5. Odvojiti (isključiti) generator vodonika sa kontrolne energetske table.

Potrošnja vodonika:

6. Povezati gorivnu ćeliju na kontrolnu energetska tablu i prebaciti na "Fuel cell" režim u programu.
7. Postaviti ciljanu struju na 150 mA u programu.
8. Posmatrati napon gorivne ćelije (plava kriva).
9. Snabdeti gorivnu ćeliju sa dodatnim kiseonikom iz kanistera kiseonika, umesto samo iz vazduha: otvoriti pričvršćivače creva i držati ga ispred okna za ventilaciju gorivne ćelije. Posmatrati vrednosti napona gorivne ćelije.

ZADACI za eksperiment 1 (radni list 1)

Opšta pitanja/inicijalni test

14. Ko je pronalazač gorivne ćelije?
15. Zašto je gorivna ćelija bila zaboravljena?
16. Objasniti formulu $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ rečima.
17. Gde su gorivne ćelije našle primenu ili gde su uspešno testirane?
18. Da li je moguće gorivne ćelije koristiti za putovanje u svemir?
19. Koje vrste gorivnih ćelija postoje?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

20. Zašto potrošač mora biti isključen sa gorivne ćelije pre eksperimenta?
21. Kako i sa kojim materijalom se gorivna ćelija čisti?
22. Kako potrošnja vodonika zavisi od potrošača?

	150 mA	300 mA
Potrošnja vodonika [cm ³]	Trajanje [s]	Trajanje [s]
5		
10		
15		
20		
25		
30		

23. Šta se desilo kada je gorivna ćelija bila snabdevena čistim kiseonikom?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

24. Kako je PEM gorivna ćelija (eng. PEM = Proton Exchange Membrane ili Polymer Electrolyte Membrane) konstruisana?

25. Kako gorivna ćelija radi?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Eksperiment 2 – Određivanje krivih karakteristika gorivne ćelije

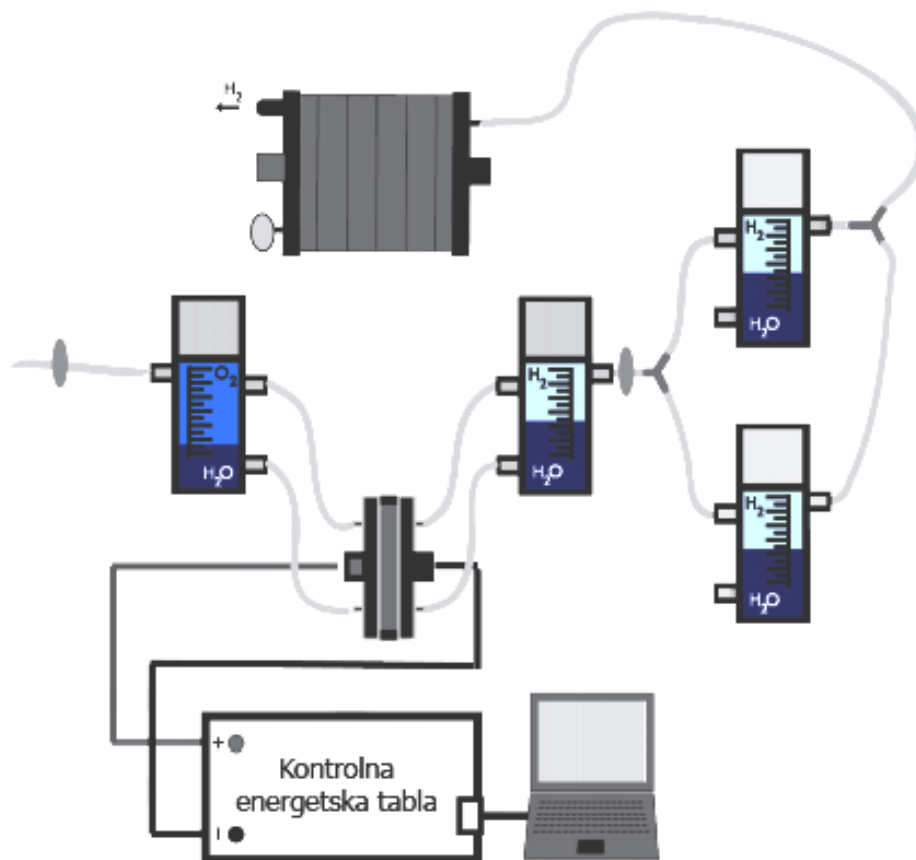
Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti snime strujno-naponske karakteristike, prikažu krive snaga/napon i opišu glavne odlike krivih karakteristika.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, gorivnu ćeliju, generator vodonika, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, 4 skladišna kanistera napunjena sa destilovanom vodom do nivoa označenog sa 5 cm³, 8 poveznih creva, 2 pričvršćivača creva, 1 crni kabl, 1 crveni kabl i štopericu.

Uputstva za eksperiment:

Kako se struja i napon ponašaju u zavisnosti od potrošača?

Na slici 4 prikazan je izgled postavke eksperimenta za proizvodnju vodonika sa energetsom kontrolnom tablom koja služi kao napajanje.



Slika 4: Postavka eksperimenta za proizvodnju vodonika

Proizvodnja vodonika:

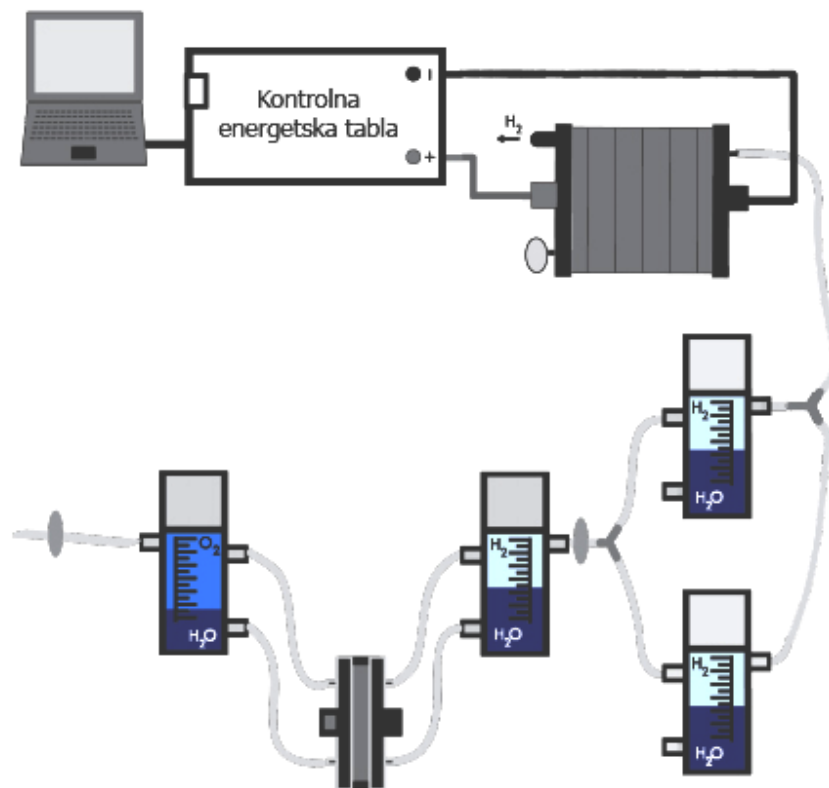
1. Postaviti eksperiment kao na slici 4, popuniti sve skladišne kanistere vodom do oznake od 5 cm^3 , ukoliko to već nije urađeno.
2. Zatvoriti izlaz vodonika iz gorivne ćelije.
3. Izabrati H_2 "Hydrogen generator" u programu.
4. Postaviti generator vodonika na 650 mA i proizvesti 30 cm^3 vodonika i 15 cm^3 kiseonika.
5. Zaustaviti elektrolizu u programu: postaviti ciljanu struju na 0 mA.
6. Očistiti gorivnu ćeliju: otvoriti izlaz vodonika iz gorivne ćelije u trajanju od 0.5 s i zatim zatvoriti.
7. Pokrenuti ponovo generator vodonika dok se odgovarajuće količine ne dosegnu ponovo.
8. Zaustaviti elektrolizu u programu: postaviti ciljanu struju na 0 mA.
9. Odvojiti (isključiti) generator vodonika sa kontrolne energetske table.

Potrošnja vodonika:

10. Povezati gorivnu ćeliju na kontrolnu energetska tablu.
11. Prebaciti na "Fuel cell" režim u programu.
12. Postaviti ciljanu struju na 0 mA u programu.
13. Snimati napon pri povećanju struje i vrednosti uneti u tabelu na radnom listu (u okviru pitanja 3).

Kako se gorivna ćelija ponaša pri direktnom snabdevanju kiseonikom?

Na slici 5 prikazana je postavka eksperimenta za potrošnju vodonika kod gorivne ćelije.



Slika 5: Postavka eksperimenta za potrošnju vodonika kod gorivne ćelije

Proizvodnja vodonika:

14. Postaviti eksperiment ponovo kako je prikazano na slici 4.
15. Izabrati H₂ “Hydrogen generator” režim.
16. Postaviti generator vodonika na 650 mA i proizvesti 30 cm³ vodonika.
17. Zaustaviti elektrolizu u programu.
18. Odvojiti (isključiti) generator vodonika od energetske kontrolne table.

Potrošnja vodonika:

19. Povezati gorivnu ćeliju na kontrolnu energetska tablu (kao na slici 5) i prebaciti u “Fuel cell” režim.
20. Postaviti ciljanu struju na 150 mA u programu.
21. Posmatrati napon gorivne ćelije (plava kriva).
22. Snabdeti gorivnu ćeliju sa dodatnim kiseonikom iz kanistera kiseonika, umesto samo vazduha: otvoriti pričvršćivače creva i držati ga ispred okna za ventilaciju gorivne ćelije. Posmatrati vrednosti napona gorivne ćelije.

ZADACI za eksperiment 2 (radni list 2)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Šta je galvanska ćelija/galvanski element?
2. Kako se vodonik može skladištiti?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

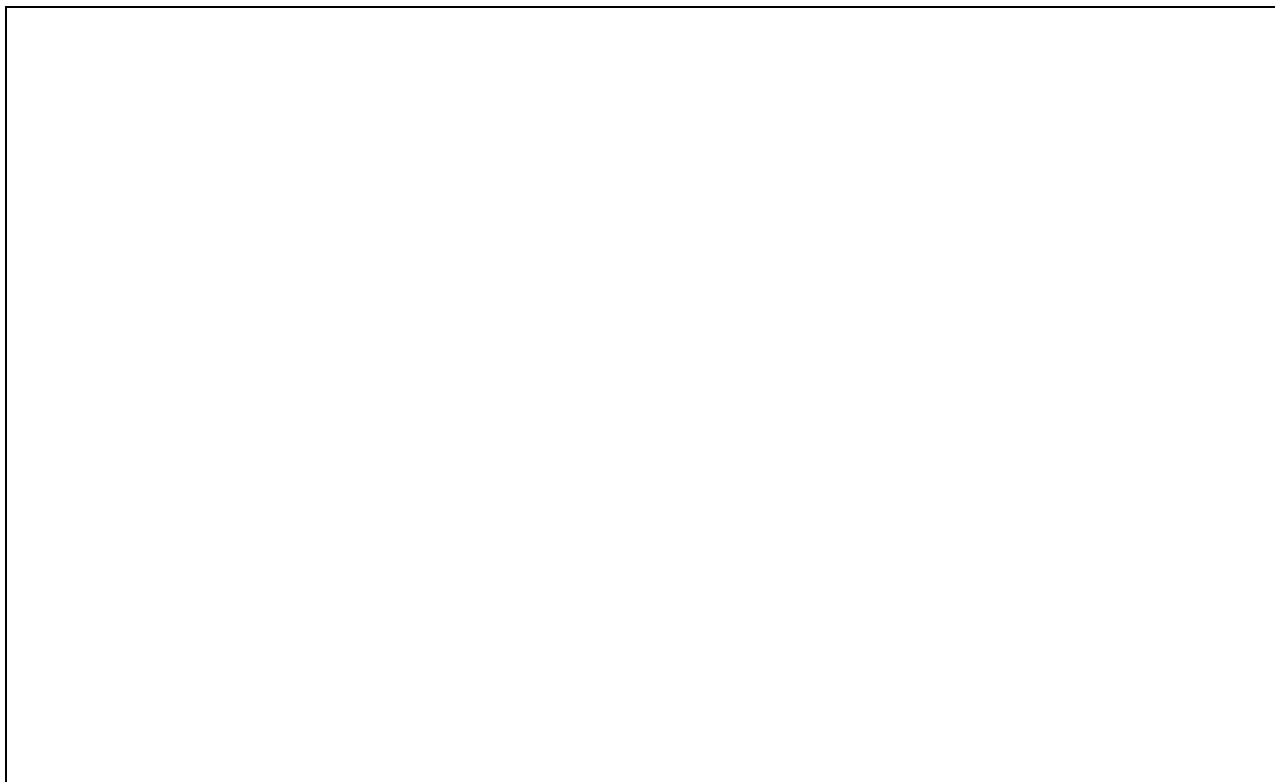
Pitanja u vezi eksperimenta

3. Uneti izmerene vrednosti ovde. Izračunati snagu.

I [mA]	U [mV]	P [mW]

4. Nacrtati napon/struja krivu karakteristike.

5. Nacrtati snaga/struja krivu karakteristike.



OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

6. Ako se više električne energije proizvede iz elektrana nego što je potrebno, opseg mogućih načina se koristi da bi se obezbedio balans. Jedan način je da se višak električne energije skladišti. Koje načine skladištenja energije poznajete?
7. Da li vodonik u svom čistom obliku postoji na našoj planeti?
8. Kompanija u Nemačkoj postavila je gorivne ćelije u podrumu kako bi smanjila rizik od požara. Kako gorivne ćelije mogu smanjiti rizik od požara?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

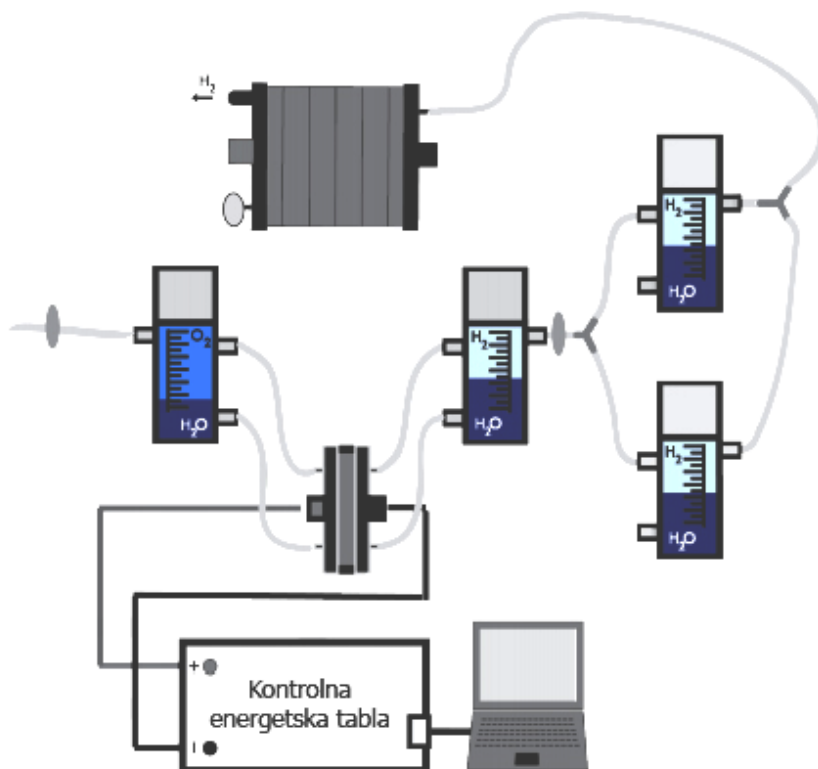
Eksperiment 3 – Proračun efikasnosti gorivne ćelije

Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti proračunaju efikasnost gorivne ćelije, razumeju jednačine hemijske reakcije za gorivne ćelije i elektrolizu, kao i da razumeju funkcije membrane.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, gorivnu ćeliju, generator vodonika, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, 4 skladišna kanistera napunjena sa destilovanom vodom do nivoa označenog sa 5 cm³, 8 poveznih creva, 2 pričvršćivača creva, 1 crni kabl, 1 crveni kabl i štopericu.

Kako se struja i napon ponašaju u zavisnosti od potrošača?

Na slici 6 prikazana je postavka eksperimenta za proizvodnju vodonika, gde kontrolna energetska tabla služi kao napajanje.



Slika 6: Postavka eksperimenta za proizvodnju vodonika

Proizvodnja vodonika:

1. Postaviti eksperiment kao na slici 6, popuniti sve skladišne kanistere vodom do oznake od 5 cm^3 , ukoliko to već nije urađeno.
2. Zatvoriti izlaz vodonika iz gorivne ćelije.
3. Izabrati H_2 "Hydrogen generator" u programu.
4. Postaviti generator vodonika na 650 mA i proizvesti 15 cm^3 vodonika.
5. Zaustaviti elektrolizu u programu: Postaviti ciljanu struju na 0 mA.
6. Očistiti gorivnu ćeliju: otvoriti izlaz vodonika iz gorivne ćelije u trajanju od 0.5 s i zatim zatvoriti.
7. Pokrenuti ponovo generator vodonika dok se odgovarajuće količine ne dosegnu ponovo.
8. Zaustaviti elektrolizu u programu: postaviti ciljanu struju na 0 mA.
9. Odvojiti (isključiti) generator vodonika sa kontrolne energetske table.

Potrošnja vodonika:

10. Povezati gorivnu ćeliju na kontrolnu energetska tablu.
11. Prebaciti na "Fuel cell" režim u programu.
12. Postaviti ciljanu struju na vrednost između 200 i 400 mA u programu i zabeležiti vrednosti za trajanje, napon i struju za svaki specificirani nivo vodonika na radnom listu (u okviru pitanja 5).

ZADACI za eksperiment 3 (radni list 3)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Šta je energetska efikasnost?
2. Šta je PEM u gorivnoj ćeliji?
3. Od kog materijala je napravljena membrana PEM gorivne ćelije?
4. Koju karakteristiku membrana gorivne ćelije mora da ima?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

5. Potrošnja vodonika gorivne ćelije (vrednosti iz primera):

Merenje br. i	Potrošnja vodonika [cm ³]	Trajanje [s]	Napon [mV]	Struja [mA]
0	0			
1	5			
2	10			
3	15			
4	20			
5	25			

6. Kreirati zapremina/vreme grafikon. Šta može biti prepoznato sa zapremina/vreme grafikona?

7. Proračunati energetske efikasnosti za merenja od $i > 0$:

$$\eta_i = \frac{U_i \cdot I_i \cdot t_i}{V_{H_2i} \cdot H_u} \quad (3)$$

Gde je $H_u = 9.9 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$, ostale veličine su prema tabeli iz petog pitanja (i označava i -to merenje): V_{H_2i} potrošnja vodonika, t_i trajanje, U_i napon, I_i struja (sve merene veličine u jednačini 3 svesti na njihove osnovne jedinice).

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

9. Zašto je formula za računanje energetske efikasnosti gorivne ćelije recipročna formuli za računanje energetske efikasnosti generatora vodonika?
10. Zašto su membrane skupe?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Eksperiment 4 – Efekat dimnjaka u gorivnoj ćeliji

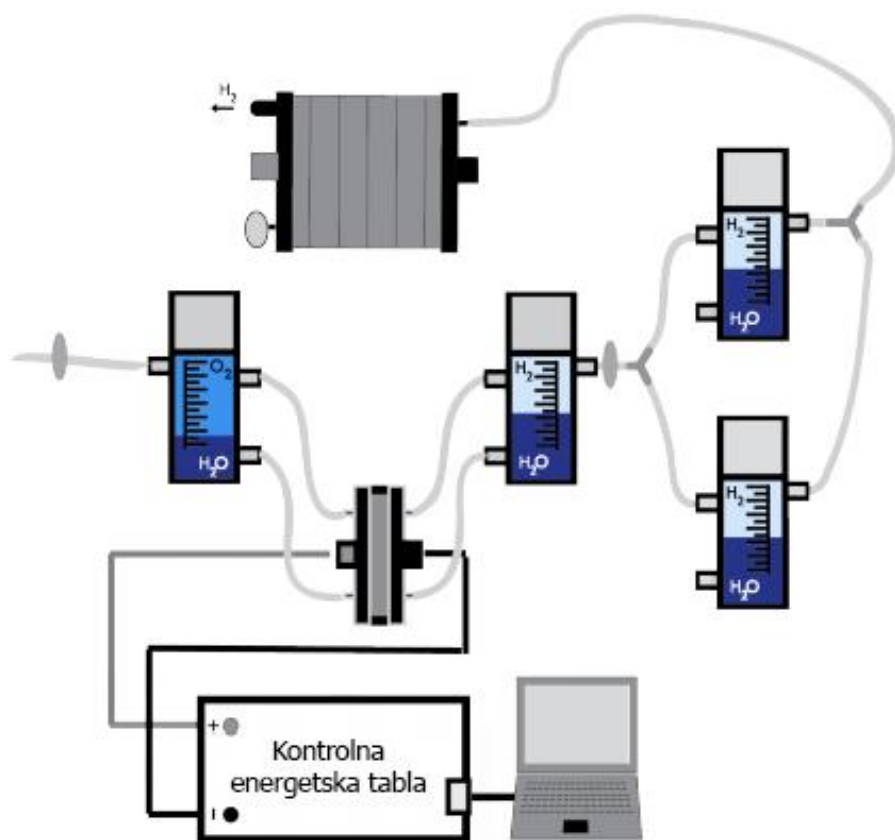
Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti razumeju procese koji se odvijaju u gorivnoj ćeliji, izmere karakteristične vrednosti gorivne ćelije, prikažu kvalitativnu zavisnost gorivne ćelije od kiseonika i potrošnju vodonika gorivne ćelije tokom rada.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, gorivnu ćeliju, generator vodonika, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, 4 skladišna kanistera napunjena sa destilovanom vodom do nivoa označenog sa 5 cm³, 8 poveznih creva, 2 pričvršćivača creva, 1 crni kabl i 1 crveni kabl.

Uputstva za eksperiment:

Kako se struja i napon ponašaju u zavisnosti od potrošača?

Na slici 7 prikazana je postavka eksperimenta za proizvodnju vodonika sa kontrolnom energetska tablom koja služi kao napajanje.



Slika 7: Postavka eksperimenta za proizvodnju vodonika

Proizvodnja vodonika

1. Postaviti eksperiment kao na slici 7, popuniti sve skladišne kanistere vodom do oznake od 5 cm^3 , ukoliko to već nije urađeno.
2. Zatvoriti izlaz vodonika iz gorivne ćelije.
3. Izabrati H_2 "Hydrogen generator" u programu.

4. Postaviti ciljanu struju za generator vodonika na nivo pri kome će napon biti oko 2300 mV. U zavisnosti od starosti i stanja generatora vodonika, ciljana struja neophodna da se dostigne ovaj nivo će biti oko 660 mA. (U razdoblju od 6 do 8 minuta, sva tri kanistera će biti puna sa vodonikom).
5. Zaustaviti elektrolizu u programu: postaviti ciljanu struju na 0 mA.

Korisni savet:

Očistiti gorivnu ćeliju sa vodonikom, kako bi uklonili vlagu, ako gorivna ćelija dostiže svega oko 1 V izlaznog napona:

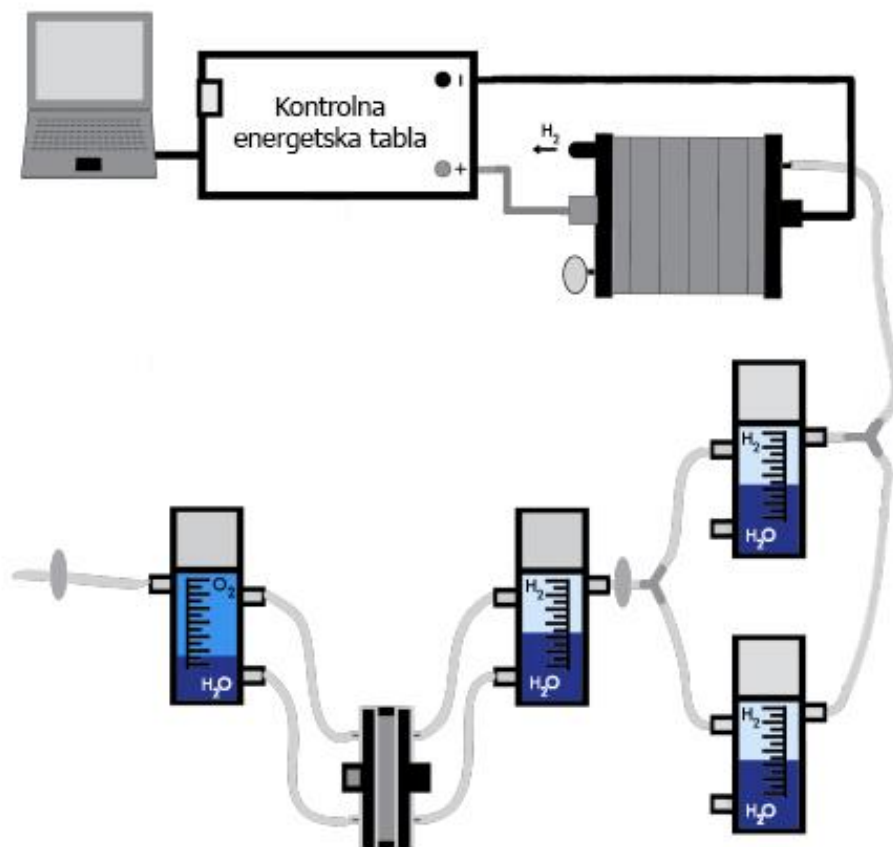
Otvoriti izlaz vodonika iz gorivne ćelije i odmah ga zatvoriti (napon gorivne ćelije će porasti na 3000 mV(staro)/4000 mV(normalno)/5000 mV(novo stanje)). Proizvesti vodonik ponovo do određene količine.

6. Zaustaviti elektrolizu u programu: postaviti ciljanu struju na 0 mA.
7. Odvojiti (isključiti) generator vodonika sa kontrolne energetske table.

Potrošnja vodonika:

8. Povezati gorivnu ćeliju na kontrolnu energetska tablu.

Na slici 8 prikazana je postavka eksperimenta za potrošnji vodonika gorivne ćelije.



Slika 8: Postavka eksperimenta za potrošnju vodonika gorivne ćelije

9. Prebaciti na “Fuel cell” režim u programu.
10. Kliknuti na A “Automatic characteristic curve”.

Prikazane krive su:

- $U = f(I)$
- $P = f(I)$

Snaga je izračunata koristeći formulu $P = U \cdot I$.

Krive karakteristika će biti prikazane za oko jednog minuta.

Dugme A “Automatic characteristic curve” će biti ponovo prikazano u sivoj boji.

11. Sačuvati merenje.
12. Generisati vodonik ponovo, ukoliko je ukupni vodonik u skladišnim kanisterima manji od 30 cm^3 , pogledati korak 3. U suprotnom nastaviti sa sledećim korakom.

13. Oboriti gorivnu ćeliju na stranu, tako da su ventilacioni otvori na vrhu i dnu, te vazduh može da cirkuliše vertikalno.
14. Kliknuti na A “Automatic characteristic curve”. Krive karakteristika će biti prikazane za oko jednog minuta. Dugme A “Automatic characteristic curve” će se potom ponovo pojaviti u sivoj boji.
15. Sačuvati merenje.

ZADACI za eksperiment 4 (radni list 4)

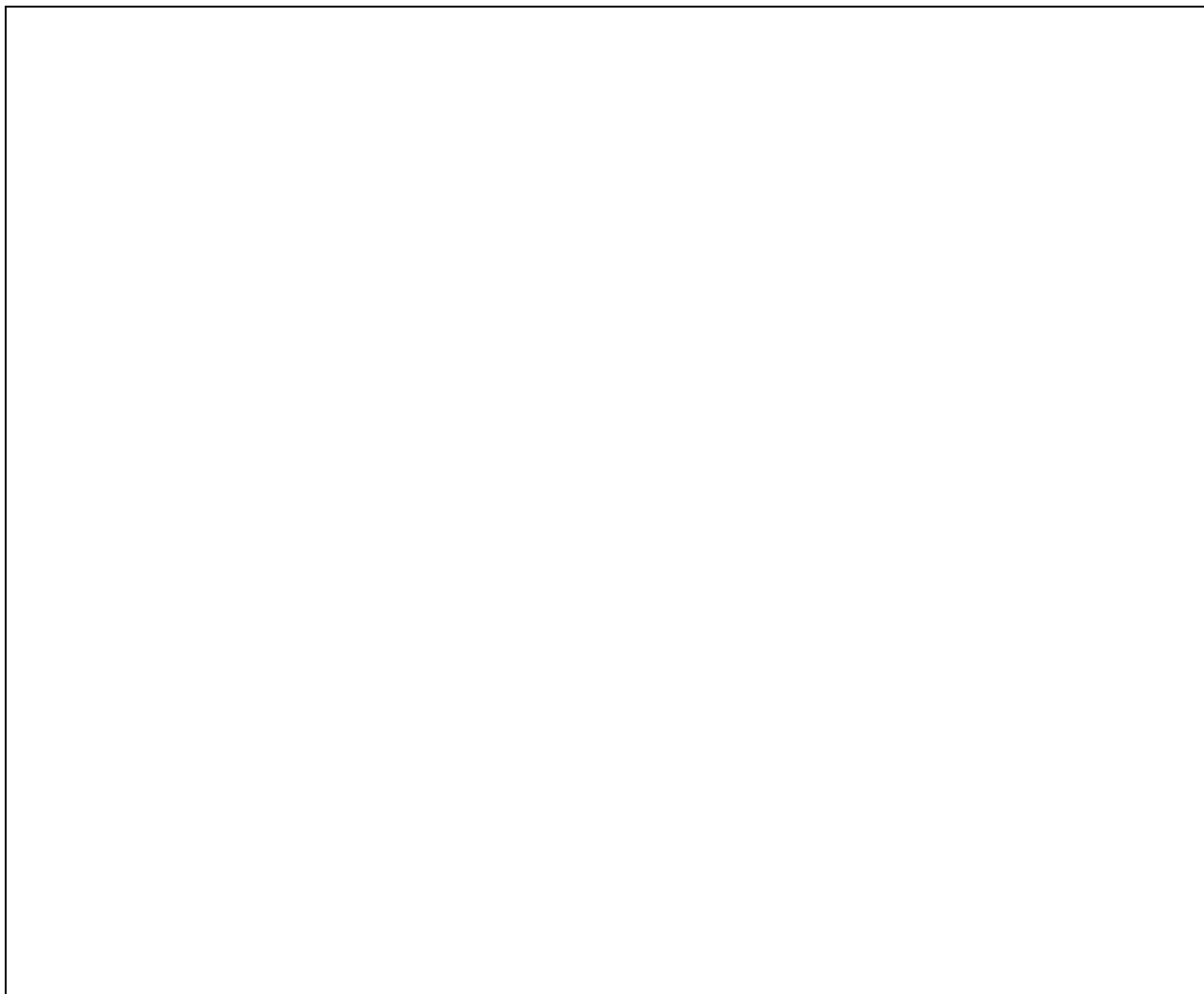
Opšta pitanja/inicijalni test

1. Prikazati opšti opis efekta dimnjaka.
2. Skicirati horizontalnu projekciju gorivne ćelije u svom normalnom uspravnom položaju.
3. Skicirati horizontalnu projekciju gorivne ćelije u svom normalnom ležećem položaju.
4. Zašto se gorivna ćelija greje?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

5. Opisati protok gasa (vazduh, kiseonik) u gorivnoj ćeliji u njenom normalnom uspravnom položaju.
6. Opisati protok gasa (vazduh, kiseonik) u gorivnoj ćeliji u njenom normalnom ležećem položaju.
7. Otvoriti fajlove krive karakteristika u programu za rad sa tabelama (npr. Excel) i nacrtajte ih grafički jednu preko druge. Šta se može zaključiti iz analize?



OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

8. Kako je efekat dimnjaka vidljiv u gorivnoj ćeliji koja je u ležećem položaju?
9. Šta komercijalne gorivne ćelije koriste umesto efekta dimnjaka da unesu više kiseonika?
10. Velike gorivne ćelije su toplije od male CET gorivne ćelije (iz trenažera čiste energije).
Šta je rezultat?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 3

SPEKTAR ZRAČENJA I SOLARNI UGLOVI

- ☐ **Spektar zračenja**
- ☐ **Količnik vazdušne mase**
- ☐ **Solarni uglovi**
- ☐ **Dijagram putanje Sunca**
- ☐ **Solarno i lokalno vreme**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Cilj treće vežbe je da se studenti upoznaju sa izgledom i značajem spektra zračenja crnih tela temperaturno različitih, da uvide veličinu snage koju takva tela odaju zračenjem, a samim tim i potencijalne mogućnosti iskorišćenja Sunčeve energije. U okviru vežbe opisani su bitni solarni uglovi, dijagram putanje Sunca, kao i razlike između solarnog i lokalnog satnog vremena.

1. Spektar zračenja Zemlje

Izvor insolacije je naravno Sunce, džinovska, 1,4 miliona kilometara u prečniku, termonuklearna pećnica, koja neprestano pretvara atome vodonika u helijum. Rezultujući gubitak mase se pretvara u oko $3.8 \cdot 10^{20}$ MWh elektromagnetske energije svakog sata koja se odaje zračenjem sa površine Sunca u okolni prostor.

Svaki objekat u prirodi zrači energiju u zavisnosti od njegove temperature. Uobičajen način za opisivanje koliko energije objekat odaje zračenjem je poređenje tog objekta sa teoretskom tvorevinom nazvanom crno telo. Crno telo se definiše kao savršeni emiter i savršeni apsorber. Kao savršeni emiter, crno telo isijava više energije po jedinici površine od bilo kog realnog objekta na istoj temperaturi. Kao savršeni absorber, crno telo absorbuje svo zračenje koje dospe na njega, to jest, nijedan deo zračenja se niti reflektuje niti prolazi kroz crno telo. Crno telo emituje zračenje na svim talasnim dužinama, ali gustina snage zračenja crnog tela na određenoj talasnoj dužini zavisi od njegove temperature i opisana je Plankovim zakonom:

$$E_{\lambda} = \frac{3.74 \cdot 10^8}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{14400}{\lambda \cdot T}} - 1)} \quad (1)$$

gde je $E_{\lambda} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right]$ snaga zračenja po jedinici površine crnog tela, T je apsolutna temperatura crnog tela u stepenima Kelvina, a λ [μm] je talasna dužina.

Ako se Zemlja modeluje kao crno telo sa temperaturom od 288K (što je 15°C), dobija se emisioni spektar (spektar zračenja) prikazan na slici 1.

Površina ispod Plankove krive (kriva na slici 1) između bilo koje dve talasne dužine je površinska snaga emitovana između tih talasnih dužina, tako da je ukupna površina ispod Plankove krive jednaka ukupnoj površinskoj emitovanoj snazi u vidu zračenja.

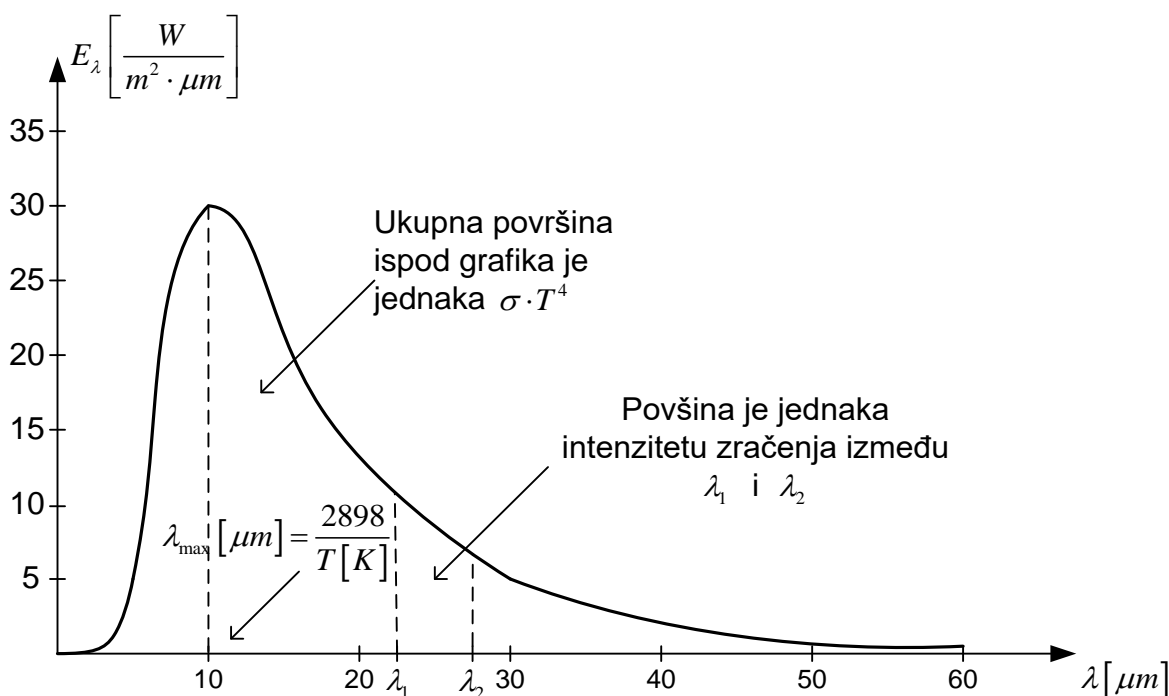
Ukupna emitovana snaga je zgodno predstavljena *Stefan–Boltzmann–ovim zakonom* zračenja:

$$E = A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

gde je E [W] ukupna emitovana snaga crnog tela, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right]$ Stefan – Boltzmann–ova konstanta, a A [m²] površina apsolutno crnog tela.

Još jedna pogodna osobina krive zračenja crnog tela je data *Wien-ovim zakonom pomeranja*, pomoću koga se izračunava talasna dužina na kojoj crno telo emituje maksimalnu snagu:

$$\lambda_{\max} [\mu\text{m}] = \frac{2898}{T [\text{K}]} \quad (3)$$



Slika 1: Spektar zračenja po jedinici površine crnog tela temperature 288 K

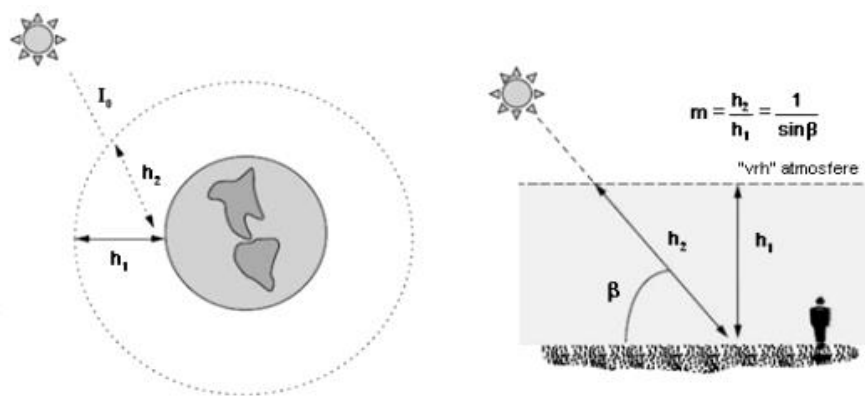
2. Količnik vazdušne mase, m

Dok solarno zračenje dolazi do Zemljine površine, jedan deo tog zračenja biva apsorbovan od strane raznih čestica koje sačinjavaju atmosferu, što spektru zračenja koji dolazi do Zemlje daje nepravilan, džombast oblik. Spektar Sunčevog zračenja zavisi i od dužine puta kroz atmosferu koje zračenje treba da pređe da bi došlo do Zemljine površine. Kada se dužina puta h_2 , koju pređu Sunčevi zraci na putu kroz atmosferu, podeli sa minimalnom mogućom dužinom tog puta h_1 (što se događa kada je Sunce direktno iznad posmatranog mesta na Zemljinoj površini), dobija se veličina koja se zove *količnik vazdušne mase* ili samo vazдушna masa i obeležava se sa m . Kao što se vidi na slici 2, pod jednostavnom pretpostavkom da je Zemlja ravna, odnosno da je jako malo zakrivljena, količnik vazdušne mase se može izraziti kao:

$$m = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\sin \beta}, \quad (4)$$

gde su h_1 i h_2 prethodno definisani putevi koje prelaze sunčevi zraci, a β altitudni ugao Sunca.

Količnik vazdušne mase od 1 (piše se "AM1") znači da se Sunce nalazi direktno iznad posmatranog mesta na Zemlji. Po konvenciji, AM0 znači da ne postoji atmosfera, to jest da do površine Zemlje dolazi „očigledni” ekstraterestrički fluks (fluks ekstraterestričkog zračenja koji uđe u atmosferu), A. Najčešće se za prosečno sunčevo zračenje na površini Zemlje pretpostavlja količnik vazdušne mase od 1.5. Kako Sunčevi zraci prolaze kroz veći deo atmosfere, manje energije dolazi do površine Zemlje, a spektar zračenja se pomera ka većim talasnim dužinama.



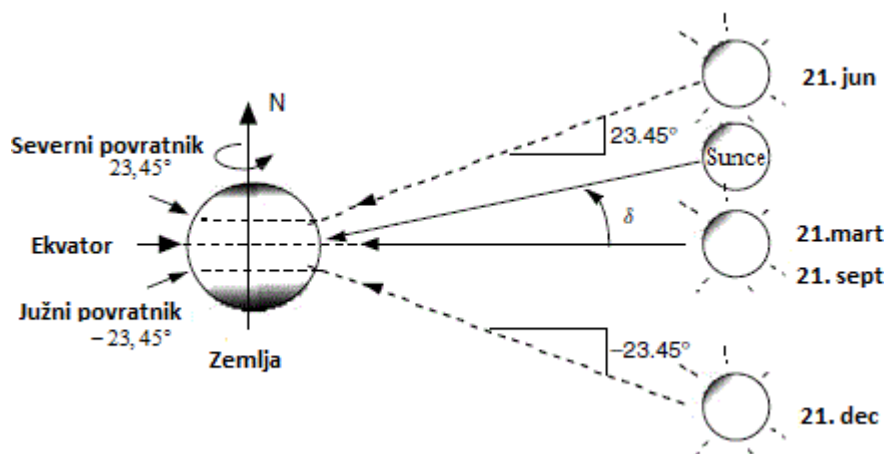
Slika 2: Količnik vazdušne mase m

3. Altitudni ugao Sunca u solarno podne β_N i solarna deklinacija δ

Iako se Zemlja okreće oko Sunca, sa dijagrama na kome je Sunce nepokretno, a Zemlja oko njega kruži po eliptičnoj putanji, teško je uočiti kako se različiti solarni uglovi vide sa određene pozicije na Zemlji. Alternativni (i drevni) pogled na sistem Sunce - Zemlja je prikazan na slici 3, na kojoj je Zemlja fiksirana i obrće se oko svoje ose sever (N, North) – jug (S, South). Sunce se nalazi negde u svemiru i „polako” se pomera gore-dole kako se menjaju godišnja doba.

Kao što je prikazano na slici 3, ugao obrazovan između ravni ekvatora i prave koja spaja centre Sunca i Zemlje se zove *solarna deklinacija* i obeležava se sa δ . Ona varira između ekstremnih vrednosti od -23.45° do 23.45° . Veoma dobra aproksimacija za vrednost solarne deklinacije se dobija ako se pretpostavi jednostavna sinusna zavisnost za godinu koja traje 365 dana i prolećnu ravnodnevnicu koja nastupa 81. dana u godini ($n=81$). Stvarne vrednosti solarne deklinacije blago variraju od godine do godine, ali taj uticaj se ne uzima u obzir. Za pretpostavljenu sinusnu zavisnost, vrednost solarne deklinacije δ za n -ti dan u godini iznosi:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 81)\right) \quad (5)$$



Slika 3: Alternativni izgled sistema Sunce-Zemlja

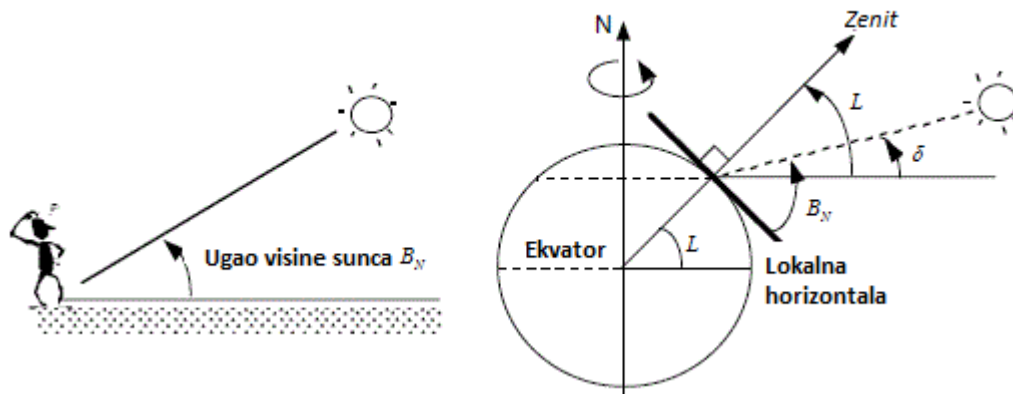
U proseku, usmeravanje solarnog panela u pravcu ekvatora, što za stanovnike Severne hemisfere znači usmeravanje solarnog panela u pravcu juga i njegovo naginjanje pod uglom geografske širine u odnosu na horizontalnu podlogu, je dobar praktičan način za postizanje dobrih godišnjih performansi solarnog panela. Za bolji učinak, u zimskim uslovima nagibni ugao

u odnosu na podlogu treba malo povećati, a leti ga malo smanjiti u odnosu na ugao geografske širine.

Na slici 4, na kojoj je prikazan sistem Zemlja-Sunce u kome se Sunce kreće, a Zemlja je nepomična, lako se određuje ključni solarni ugao, β_N , nazvan *altitudni ugao Sunca u solarno podne*. Altitudni ugao je ugao između prave koja spaja Sunce i posmatranu tačku na Zemlji i lokalne horizontale u posmatranoj tački. Sa slike 4 se može uočiti sledeća veza između solarnih uglova β_N i δ i ugla (severne) geografske širine, L :

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta, \quad (6)$$

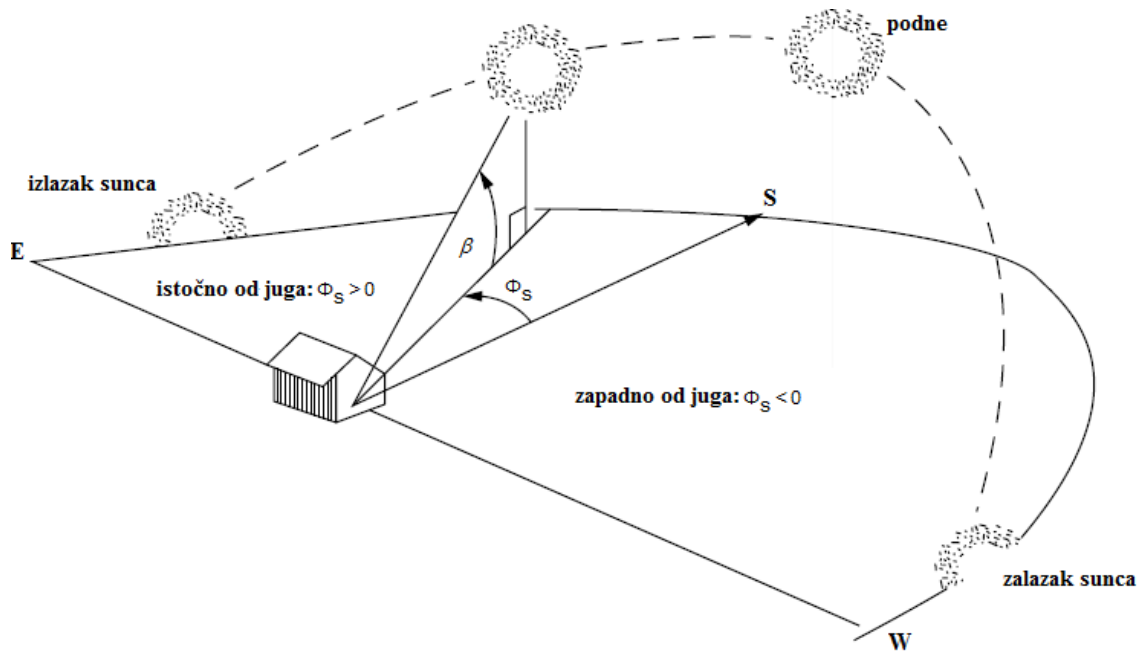
gde β_N predstavlja altitudni ugao Sunca u solarno podne, a δ solarnu deklinaciju. Na slici 4 je uveden pojam zenita, koji se odnosi na pravu povučenu iz posmatrane tačke normalno na površinu (ravan) Zemlje.



Slika 4: Altitudni ugao Sunca u solarno podne

4. Altitudni i azimutni ugao Sunca - β i ϕ_s

Pozicija Sunca "na nebu" u bilo koje doba dana se može opisati njegovim altitudnim uglom, β i njegovim azimutnim uglom, Φ_s , kao što je prikazano na slici 5. Indeks s u oznaci azimutnog ugla označava da se radi o Suncu, jer će kasnije biti uveden i azimutni ugao solarnog panela, koji će imati indeks c. Po konvenciji, azimutni ugao je pozitivan ujutru kada je Sunce na istoku i negativan poslepodne, kada je Sunce na zapadu. Na severnoj hemisferi se uglovi mere u odnosu na jug, kao što je prikazano na slici 5, dok se na Južnoj hemisferi mere u odnosu na sever.



Slika 5: Položaj Sunca na nebu, altitudni ugao Sunca β i azimutni ugao Sunca ϕ_s

Azimutni i altitudni ugao Sunca zavise od geografske širine posmatranog mesta, dana u godini i što je najvažnije, doba dana. Vreme će biti izraženo kao broj sati pre ili posle solarnog podneva. Npr. solarno vreme od 11h predstavlja jedan sat pre nego što Sunce prođe lokalni meridijan. Naredna dva izraza se koriste za izračunavanje altitudnog i azimutnog ugla Sunca:

$$\sin \beta = \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin L \cdot \sin \delta, \quad (7)$$

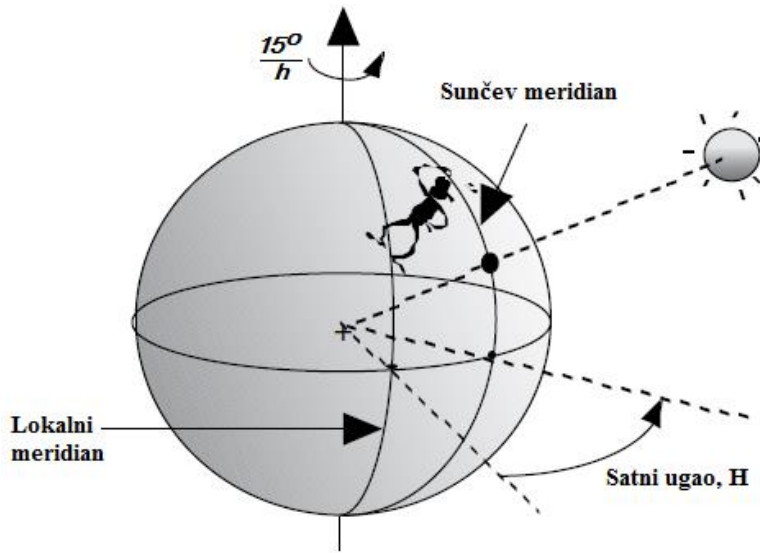
$$\sin \phi_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin H}{\cos \beta}. \quad (8)$$

U prethodnim izrazima vreme (doba dana) je izraženo preko veličine koja se naziva satni ugao, H . Satni ugao predstavlja broj stepeni za koji Zemlja mora da se zarotira pre nego što se Sunce nađe direktno iznad lokalne geografske dužine. Kao što je prikazano na slici 6, Sunce je u svakom trenutku direktno iznad određene linije geografske dužine, koja se naziva Sunčev meridijan. Razlika između lokalnog meridijana i Sunčevog meridijana je satni ugao, koji ima pozitivne vrednosti ujutru, pre nego što Sunce prođe lokalni meridijan.

Podrazumevajući da Zemlja obrne ceo krug od 360° za 24 h, ili $15^\circ/\text{h}$, satni ugao se može izraziti na sledeći način:

$$H = \frac{15^\circ}{h} \cdot (\text{broj sati pre solarnog podneva}). \quad (9)$$

Prema tome, satni ugao H pri solarnom vremenu od 11:00 biće $+15^\circ$ (Zemlji je potrebno da se zarotira za još 15° , ili jedan sat, pre nego što nastupi solarno podne). Posle podne, satni ugao je negativan, tako npr. pri 14 h solarnog vremena, H će biti -30° . Na slici 6 je prikazan način određivanja satnog ugla.



Slika 6: Satni ugao H , lokalni i Sunčev meridian; brzina rotacije Zemlje od $15^\circ/\text{h}$

Ovde postoji blaga komplikacija koja se odnosi na traženje azimutnog ugla Sunca preko izraza 8. Tokom proleća i leta, rano ujutru i kasno poslepodne, veličina azimutnog ugla Sunca iznosi više od 90° u odnosu na jug (to se nikada ne postiže tokom jeseni i zime). Kako za sinusnu funkciju važi da je $\sin(x) = \sin(180^\circ - x)$ potreban je neki uslov (test) koji će pomoći da se zaključi da li je azimutni ugao veći ili manji od 90° u odnosu na jug. Takav uslov (test) je sledeći:

$$\text{Ako je } \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L} \text{ onda je } |\phi_s| \leq 90^\circ, \text{ ukoliko uslov nije ispunjen } |\phi_s| > 90^\circ. \quad (10)$$

5. Dijagrami putanje Sunca za analizu senke

Ne samo da dijagrami putanje Sunca, pomažu da se izgradi osećaj gde se Sunce nalazi u bilo koje vreme, već imaju veliku praktičnu primenu na terenu kada se želi predvideti šablon padanja senke na FN panele, što je veoma značajno, zbog smanjene produktivnosti. Koncept je jednostavan. Ono što je potrebno je skica azimutnih i altitudnih uglova za drveće, zgrade i druge prepreke duž južnog horizonta koje mogu biti nacrtane preko dijagrama putanje Sunca. Odeljci na dijagramu putanje Sunca koji su prekriveni preprekama ukazuju na periode vremena kada će Sunce biti iza prepreke i kada je lokacija u senci.

Postoji nekoliko proizvoda na tržištu čiji je zadatak da procene lokaciju, koji superponiraju prepreke na dijagram putanje Sunca veoma brzo i lako. To se može dovoljno dobro uraditi i uz pomoć kompasa, uglomera i viska, ali zahteva nešto više rada. Kompas se koristi za merenje azimutnih uglova prepreka, a uglomer i visak mere altitudne uglove.

6. Solarno vreme i lokalno vreme

Za rad sa energijom Sunca uobičajeno je da se koristi solarno vreme (SV), gde je sve izmereno u odnosu na solarno podne (kada je Sunce na našoj liniji geografske dužine). Međutim postoje prilike kada je potrebno lokalno vreme (LV). Postoje dva podešavanja koja moraju biti izvršena kako bi se povezalo lokalno vreme i solarno vreme. Prvo je podešavanje geografske dužine koje ima vezu sa tim kako su regioni u svetu podeljeni po vremenskim zonama. Drugo je ad hoc faktor koji treba uzeti u obzir zbog neravnomernog načina na koji se Zemlja okreće oko Sunca.

Naravno, jednostavno nema efekta da ljudi podese svoje časovnike da pokazuje podne kada je Sunce na njihovoj geografskoj dužini (meridijanu). Kako Zemlja rotira 15° po satu (4 minuta po stepenu), za svaki stepen geografske dužine između dve lokacije, časovnici koji pokazuju solarno vreme razlikovali bi se za 4 minuta. Jedino kada bi dva časovnika pokazivala isto vreme jeste kada bi oba bili severno/južno jedan od drugog.

Da bi se rešile ove komplikacije sa vremenskom dužinom, Zemlja je nominalno podeljena na 24 jednočasovne vremenske zone, gde se svaka vremenska zona idealno prostire 15° od geografske dužine. Naravno, geopolitičke granice će uvek komplikovati granice iz jedne zone u drugu. Namera je da se svi časovnici unutar vremenske zone postave na isto vreme. Svaka

vremenska zona je definisana pomoću *Lokalnog Vremenskog Meridijana* lociranog u sredini zone uz poreklo ovakvog vremenskog sistema koji prolazi kroz Grinič, Engleska, na 0° geografske dužine.

Longitudinalna ispravka između lokalnog časovnog vremena i solarnog vremena zasnovana je na vremenu potrebnom da Sunce proputuje između lokalnog vremenskog meridijana i meridijana posmatrača. Ako je solarno podne na lokalnom vremenskom meridijanu, biće solarno podne 4 minuta kasnije za svaki stepen za koji je posmatrač zapadno od tog meridijana.

7. Izlazak i zalazak Sunca

Dijagram putanje Sunca može biti korišćen da se lociraju azimutni uglovi i približno vreme izlaska i zalaska Sunca. Preciznija procena izlaska/zalaska može biti nađena jednostavnom manipulacijom izraza (7).

Pri izlasku i zalasku Sunca, altitudni ugao β je nula pa se može napisati:

$$\sin \beta = \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin L \cdot \sin \delta = 0, \quad (11)$$

$$\cos H = -\frac{\sin L \sin \delta}{\cos L \cos \delta} = -\tan L \tan \delta. \quad (12)$$

Rešavajući za satni ugao pri izlasku Sunca, H_{SR} , dobija se:

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \quad (+ \text{ za izlazak Sunca}). \quad (13)$$

Treba primetiti u izrazu (13) da inverzija kosinusa dozvoljava i pozitivne i negativne vrednosti, pri tom treba koristiti znakovnu konvenciju, koja zahteva pozitivne vrednosti za izlazak Sunca, a negativne za zalazak.

Kako Zemlja rotira 15°/h, satni ugao može biti konvertovan u vreme izlaska ili zalaska koristeći:

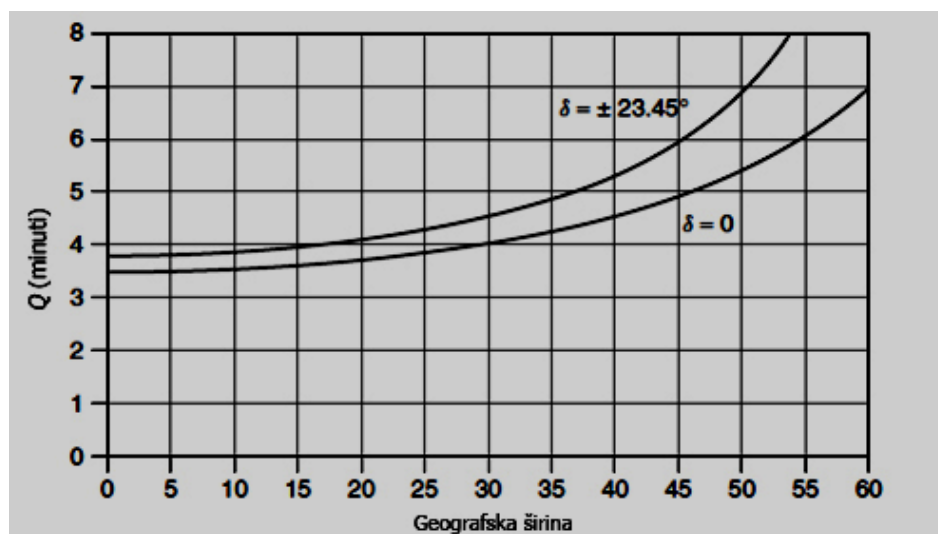
$$\text{Izlazak(geometrijski)} = 12:00 - \frac{H_{SR}}{15^\circ / h}. \quad (14)$$

Izrazi (11) do (14) su geometrijski odnosi zasnovani na uglovima merenim do centra Sunca, stoga je oznaka geometrijski izlazak u izrazu (14). One su potpuno adekvatne za bilo koji

slučaj uobičajenog rada u okviru solarne energetike, ali neće dati baš iste vrednosti koje bi pročitali u novinama za izlazak ili zalazak Sunca. Razlika između meteorološkog podatka o izlasku Sunca i geometrijskog izlaska (14) je posledica dva faktora. Prvo odstupanje prouzorokovano je atmosferskom refleksijom, ono savija sunčeve zrake čineći da se Sunce pojavi (izađe) 2.4 minuta ranije nego što bi bilo geometrijski i zađe 2.4 minuta kasnije. Drugo je da meteorološka definicija izlaska i zalaska Sunca predstavlja vreme pri kom vrh Sunca pređe horizont, a geometrijski kada centar pređe horizont. Ovaj efekat je zakomplikovan činjenicom da pri izlasku ili zalasku Sunce iskače ili tone znatno brže oko ravnodnevnicе kada se pomere više vertikalno nego pri dugodnevnicі ili kratkodnevnicі kada je kretanje Sunca mnogo više u stranu. Podešavajući faktor Q koji uzima ove komplikacije u obzir dat je sa:

$$Q = \frac{3,467}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR}} \quad (\text{min}). \quad (15)$$

Obzirom da je izlazak ranije kada je zasnovan na vrhu Sunca nego na sredini, Q treba oduzeti od geometrijskog izlaska. Slično, kako vrh Sunca tone ispod horizonta kasnije nego sredina Sunca, Q treba pridodati na geometrijski zalazak. Grafik izraza (15) prikazan je na slici 7.



Slika 7: Podešavajući faktor izlaska/zalaska koji uračunava refleksiju i vršnu definiciju izlaska. Takođe je prikazan opseg solarnih deklinacija.

Kao što se može videti za srednji opseg geografskih širina korekcija je tipično u opsegu od oko 4 do 6 min.

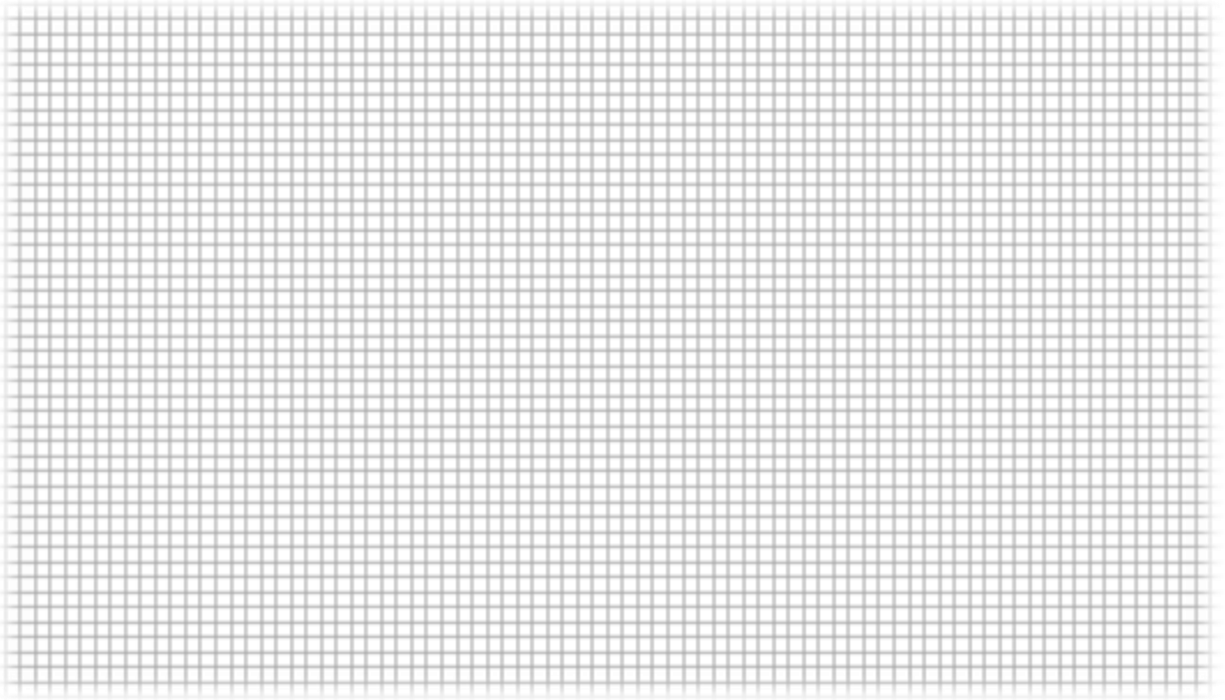
ZADATAK

Pomoću priloženog matlab koda, prikazati grafike spektra zračenja po jedinici površine crnog tela za Zemlju temperature 15°C i Sunce temperature 5800K , na graficima istaći koliko iznosi maksimalna snaga zračenja po jedinici površine crnog tela i pri kojoj talasnoj dužini je ona ostvarena. Graničnu talasnu dužinu za pretpostavku Zemlje kao crnog tela podesiti na $60\text{ }\mu\text{m}$.

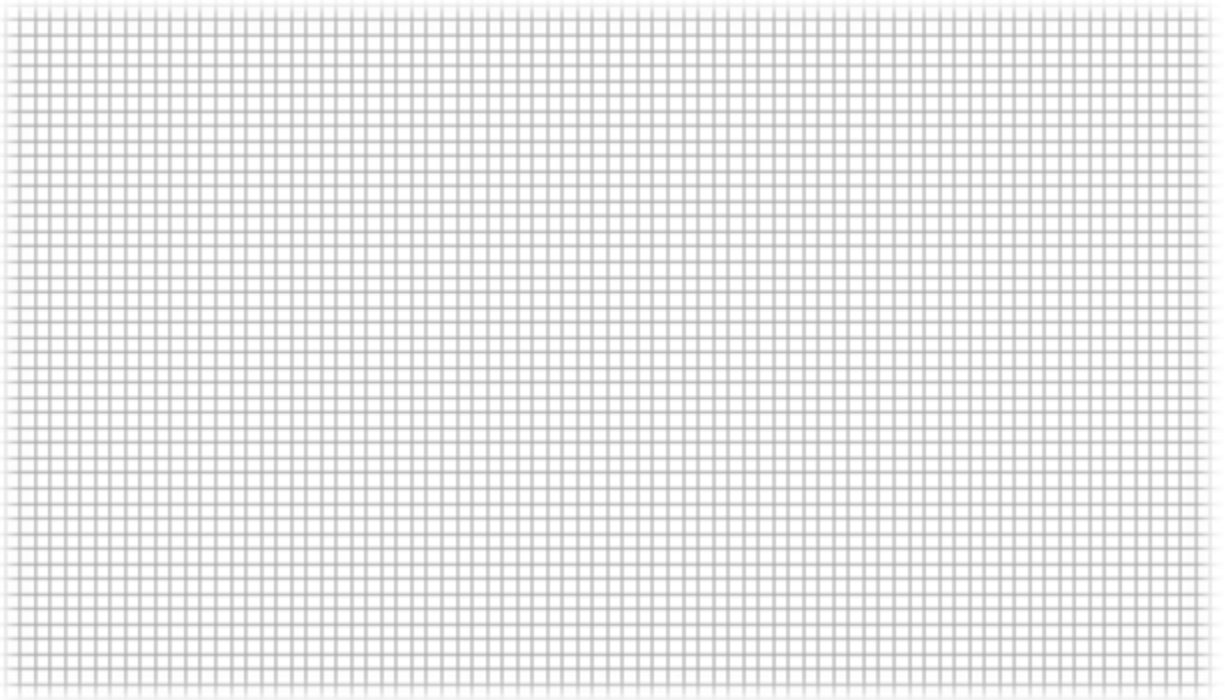
Za različite temperature crnog tela (u okviru tabele 1) odrediti maksimalnu snagu zračenja po jedinici površine kao i talasne dužine pri kojima je ona ostvarena i te rezultate upisati u tabelu 2.

Matlab kod:

```
talasnaduzina = 0.01:0.01:5.0; % opseg talasnih duzina u mikrometrima
T = 5000; % temperatura u stepenima kelvina
E = 3.742./ ((talasnaduzina.^5).*(exp(1.439e4./( talasnaduzina *T))-1)) ; % daje rezultat u
W/m2/um x 1e8
plot(talasnaduzina,E);
xlabel(' talasna duzina (\mum)'); % dodavanje oznaka osa i naziva grafika
ylabel('snaga zracenja (W/m^2/\mum) x 10^8');
title('Spektar zracenja crnog tela');
legend(sprintf('T = %.0f K',T));
```



Grafik 1.: Spektar zračenja po jedinici površine crnog tela temperature $15^{\circ}\text{C} = 288\text{ K}$



Grafik 2.: Spektar zračenja po jedinici površine crnog tela temperature 5800 K

Tabela 1:

Temperatura crnog tela [K]	1000	2000	3000	4000	5000
Maksimalna snaga [W/m²/μm]					
Talasna dužina λ_{max} [μm]					

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 4

SOLARNA ENERGIJA - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE

- ☐ **Razumevanje svojstava solarne ćelije**
- ☐ **Određivanje krivih karakteristika solarne ćelije**
- ☐ **Delimično zasenčene solarne ćelije**
- ☐ **Paralelna i redna veza solarnih ćelija**
- ☐ **Temperaturna zavisnost snage solarne ćelije**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Četvrta vežba obrađuje solarnu energiju i solarnu ćeliju kroz pet eksperimenata koji se izvode uz pomoć trenažera čiste energije.

Eksperiment 1 – Razumevanje svojstava solarne ćelije: U ovom eksperimentu, studenti će se upoznati sa tipičnim osobinama solarne ćelije. Oni će istražiti uticaj intenziteta zračenja i upadnog ugla zračenja na ponašanje solarne ćelije. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Opšta pitanja o solarnoj energiji, Pitanja o eksperimentu, Pitanja o razumevanju snage solarnih ćelija.

Eksperiment 2 – Određivanje krivih karakteristika solarne ćelije: U ovom eksperimentu studenti će ispitati uslove pod kojima solarni panel daje maksimalnu snagu. Koristeći merenja struje i napona, oni će nacrtati krive karakteristika za različite nivoe svetlosne iradijacije i prepoznati maksimalnu snagu solarne ćelije. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Opšta pitanja o solarnoj ćeliji, Pitanja o eksperimentu, Pitanja o razumevanju krivih karakteristika i snage solarne ćelije.

Eksperiment 3 – Delimično zasenčene solarne ćelije: U ovom eksperimentu studenti će odrediti strujno-naponske krive karakteristike za tri različita scenarija senke i identifikovati efekat senke na snagu solarne ćelije. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Snaga solarne ćelije - koja je redukovana u zavisnosti od veličine regije koja je pod senkom, Redno povezivanje solarnih ćelija, Bajpas diode (osnovni principi).

Eksperiment 4 – Paralelna i redna veza solarnih ćelija: U ovom eksperimentu, studenti će odrediti strujno-naponske krive karakteristike za ćelije povezane paralelno i ćelije povezane redno, takođe će prepoznati uticaj veze na snagu solarne ćelije. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Paralelna veza i prvi Kirhofov zakon, Redna veza i drugi Kirhofov zakon, Kombinovana paralelno-redna veza.

Eksperiment 5 – Temperaturna zavisnost snage solarne ćelije: U ovom eksperimentu, studenti će meriti temperaturu solarne ćelije, zagrevaće je i određivati strujno-naponsku krivu karakteristike pri različitim temperaturama. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Uticaj temperature na solarni panel, Temperaturna zavisnost struje, Temperaturna zavisnost napona.

1. Solarna energija - Osnovni principi

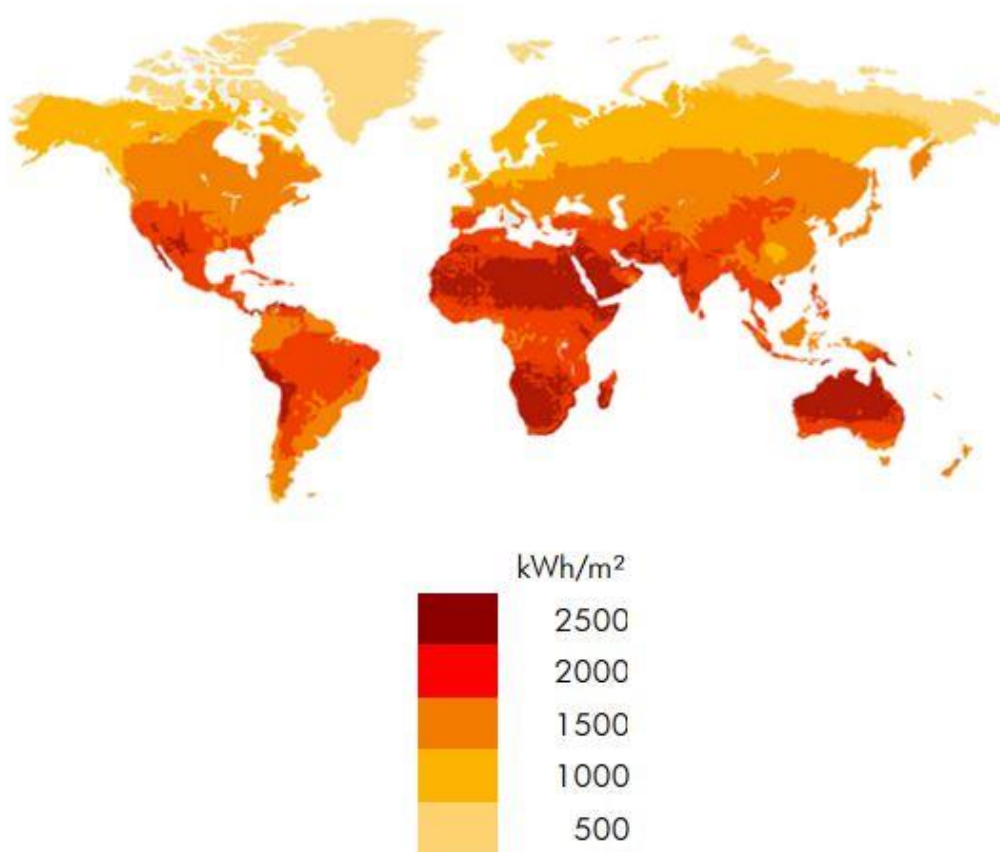
Sunce obezbeđuje energiju u vidu zračenja. Po vedrom danu oko 1000W/m^2 ove energije dosegne površinu Zemlje. U tabeli 1, prikazane su prosečne vrednosti iradijacije na Zemlji pri različitim vremenskim uslovima.

Tabela 1: Iradijacija na površini Zemlje pri različitim vremenskim uslovima

Vreme	Iradijacija G [W/m^2]
Vedro, plavo nebo	1000
Plavo nebo sa manjim oblacima	600-800
Maglovito, oblačno, Sunce se pojavljuje kao beli disk	200-400
Oblačno, sumorno nebo	50-150

Dok je trenutna iradijacija relativno nezavisna od lokacije, godišnja iradijacija se razlikuje u zavisnosti od regiona.

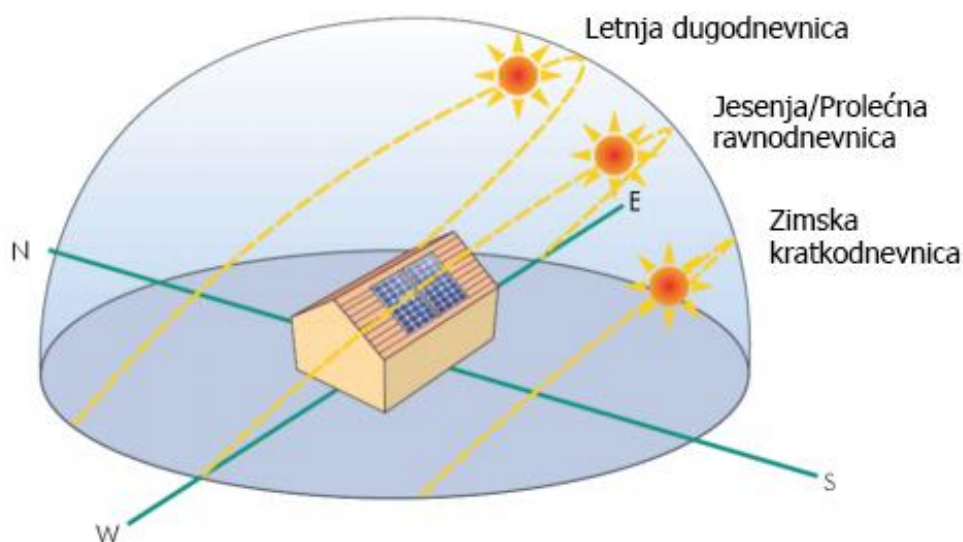
Na slici 1 prikazana je godišnja solarna insolacija na Zemlji.



Slika 1: Globalna godišnja solarna insolacija u kWh/m². Podatak iz Meteonorm-a.

Sunčevo zračenje koje dopire do Zemlje sastoji se od direktne i difuzione iradijacije. Kada su dani oblačni, sunčeva iradijacija je skoro isključivo difuziona. Direktna iradijacija formira glavnu komponentu zračenja. Iz tog razloga, ugao visine Sunca (altitudni ugao) i ugao zračenja (ugao između sunčevih zraka i normale na panel) na solarni panel su važni.

Na slici 2 prikazana je pozicija Sunca tokom godine, i može se zaključiti da je Sunce u najvišem položaju tokom letnje dugodnevnicе, a u najnižem tokom zimske kratkodnevnicе.



Slika 2: Pozicija Sunca tokom godine (primer za severnu hemisferu)

U temperaturnoj zoni, kao što su Centralna i Severna Evropa, oko 75% iradijacije se javlja u letnjem periodu i 25% preko zime. Optimalni nagib solarnog panela je takođe različit: leto 25°, zima 50° (za konkretnu lokaciju je potrebno izvršiti preciznije određivanje optimalnog nagiba, ovo su optimalne vrednosti gledajući širu regiju). Ove leto/zima vrednosti su obrnute za južnu hemisferu. Ako su solarni paneli montirani na takozvanog tragača, onda je moguće povećati godišnji prinos energije za 20% (jedna osa) do 30% (dve ose).

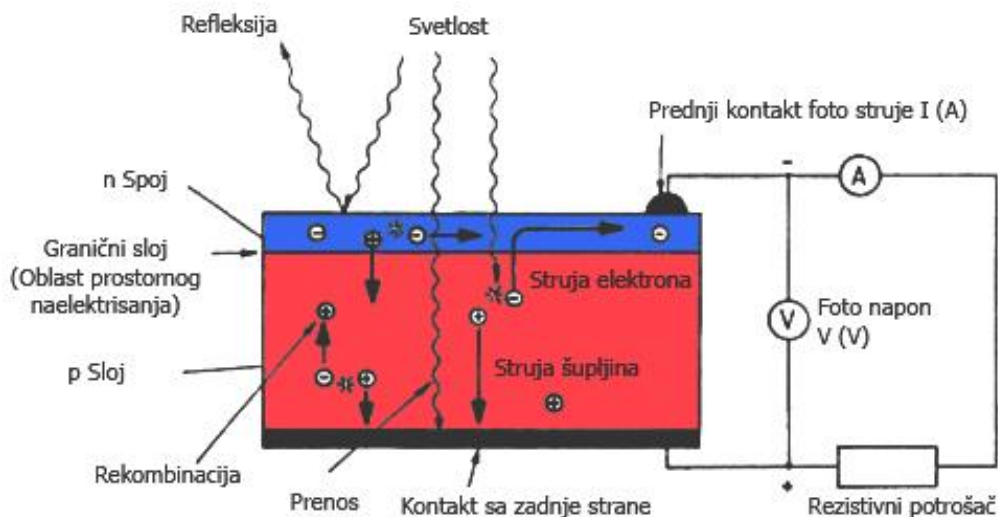
Solarna ćelija – fizika poluprovodnika

Solarna ćelija pretvara svetlost u električnu energiju. Silicijumska solarna ćelija je dioda napravljena od p-doniranog i n-doniranog kristalnog silicijuma. U n-tip sloju, jedan atom fosfora se distribuira na milione silicijumskih atoma. Atom fosfora ima jedan elektron više u spoljnom prstenu nego što je potrebno da se integriše sa silicijumskim kristalom. Ovaj elektron je slobodan da transportuje električno naelektrisanje. P-tip sadrži bor, kome nedostaje jedan elektron potreban za savršeno integrisanje sa silicijumskim kristalom. Elektron može da skoči u ovu “šupljinu”, što zauzvrat ostavlja šupljinu iza njega, i tako dalje. Šupljina se kreće kao nosilac pozitivnog naelektrisanja. Granični sloj između ova dva sloja uzrokuje da solarna ćelija funkcioniše kao dioda: Električno polje nastaje u graničnom sloju zbog šupljina iz p-tip sloja

koje se popunjavaju sa elektronima koji migriraju iz sloja n-tipa, ova oblast više ne sadrži slobodne elektrone i formira se visoko otporna barijera sa potencijalnom razlikom od 0.5-0.6 V.

Kada svetlost padne na solarnu ćeliju, elektroni na površini apsorbuju fotone. Ovi elektroni mogu da pređu potencijalnu barijeru i ako je električni potrošač povezan, struja može da teče. Fotoni apsorbovani od elektrona u blizini graničnog sloja ubrzavaju elektrone. Ako fotoni imaju minimum energije, poznate kao energija potencijalne barijere (eng. band gap) (E_g), onda ovi elektroni mogu da pređu granični sloj tj. barijeru. Fotoni apsorbovani daleko od graničnog sloja služe samo da rekombinuju elektron sa obližnjom šupljinom, i energija iz fotona je pretvorena u toplotu.

Na slici 3 prikazan je izgled i električna struja kroz solarnu ćeliju.



Slika 3: Izgled i električna struja u solarnoj ćeliji

Strujno-naponska kriva karakteristike pokazuje ponašanje diode: Ako je anoda, elektroda na p sloju, na višem potencijalu od katode, elektrode na n sloju, onda je dioda direktno polarisana i struja će početi da teče pri naponu od $U_0=0.7$ V (vrednost za silicijum). Ako je dioda obrnuto polarisana (inverzno), onda će struja poteći samo ukoliko se pređe inverzni granični napon od 150V, što će svakako uništiti diodu.

Kada svetlost padne na solarnu ćeliju, energija od fotona generiše slobodne nosioce naelektrisanja i fotoelektričnu struju I_{PH} . Fotoelektrična struja zavisi od iradijacije.

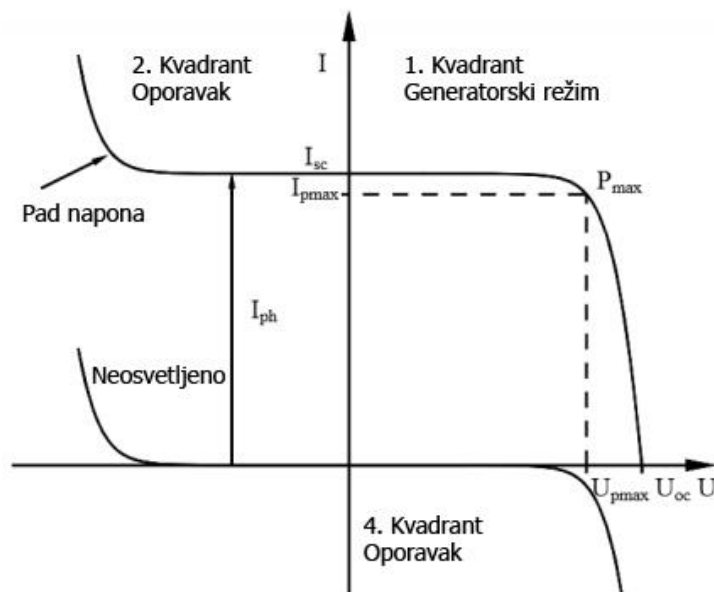
Zašto su solarne ćelije uglavnom tamno plave?

Poluprovodnici poput silicijuma imaju znatno veći indeks prelamanja nego vazduh. To znači da silicijum, sa svojom visoko reflektujućom površinom, ne apsorbuje veliki deo sunčeve svetlosti. Zbog toga je silicijum obložen sa antirefektivnim slojem. To znači da se manje svetla reflektuje na površinskom sloju uparenih materijala, jer se više apsorbuje ako su njihovi indeksi prelamanja slični. Antirefektivni sloj ima indeks prelamanja viši od vazduha, ali manji od silicijuma. Antirefektivni sloj znaci da 30% više svetlosti apsorbuje silicijum, što povećava efikasnost, zato što ovo apsorbovano svetlo stvara parove elektron-šupljina. To je antirefektivni sloj koji solarnoj ćeliji daje plavkast izgled, jer čak i sa antirefektivnim premazivanjem, refleksija na plavom kraju spektra je i dalje visoka.

Solarna ćelija – dioda

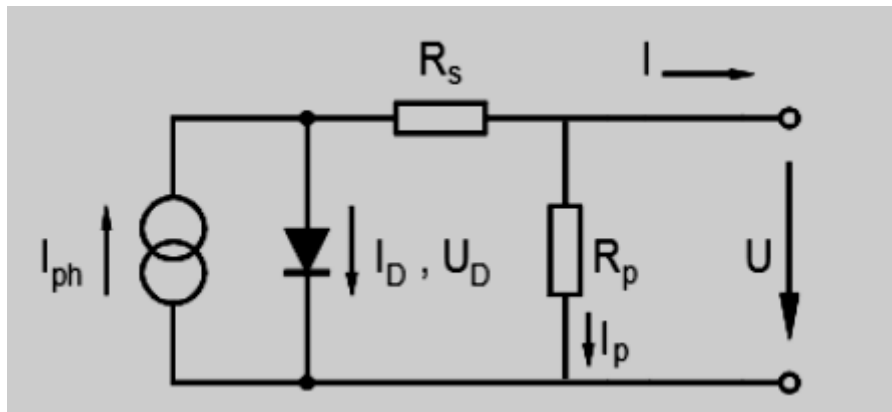
Osvetljena solarna ćelija se može prikazati kao strujni izvor i dioda povezani paralelno. Kriva karakteristike za diodu je podignuta za vrednosti fotoelektrične struje kada je solarna ćelija osvetljena.

Na slici 4 prikazana je strujno-naponska karakteristika solarne ćelije.



Slika 4: Strujno-naponska kriva karakteristike za solanu ćeliju

Model sa jednom diodom se koristi kao jednostavno ekvivalentno kolo solarne ćelije i prikazan je na slici 5.



Slika 5: Model solarne ćelije sa jednom diodom

Gde je:

$$\begin{aligned}
 I &= I_{PH} - I_D - I_P \\
 I_P &= \frac{U_D}{R_p} = \frac{U + IR_s}{R_p} \\
 I &= I_{PH} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{U + IR_s}{U_T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} \\
 U_T &= \frac{kT}{q}
 \end{aligned} \tag{1}$$

I_{PH} – fotoelektrična stuja [A],

I_D – struja diode [A],

U_D – napon diode [V],

R_s – redna otpornost (poluprovodnik, kontakti, veze) [Ω],

R_p – paralelna otpornost (kvalitet kristala) [Ω],

I – struja solarne ćelije [A],

U – napon solarne ćelije [V],

I_0 – inverzna struja zasićenja diode [A],

k – Bolcmanova konstanta $1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K,

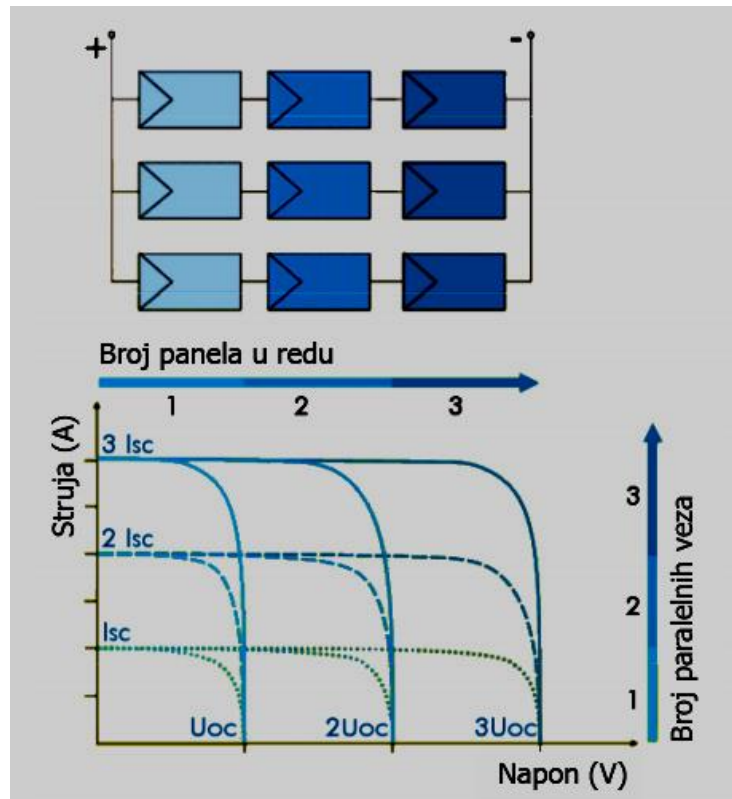
q – elementarna količina naelektrisanja $1.602 \cdot 10^{-19}$ C,

T – temperatura solarne ćelije u stepenima Kelvina.

Solarni paneli su povezani zajedno u rednu i paralelnu vezu te formiraju FN (eng. PV) generator. Da bi se izbegao gubitak snage, samo identični solarni paneli se koriste u jednom

generatoru, ukoliko je to moguće. Broj solarnih panela povezanih redno određuje izlazni napon, koji mora da odgovara ulaznom naponu invertora.

Na slici 6 je prikazano kako se menja strujno-naponska karakteristika FN generatora u zavisnosti od redno/paralelno veze solarnih panela.



Slika 6: Dodavanje struje i napona u kombinovanoj redno-paralelnoj vezi

Eksperiment 1 - Razumevanje svojstava solarne ćelije

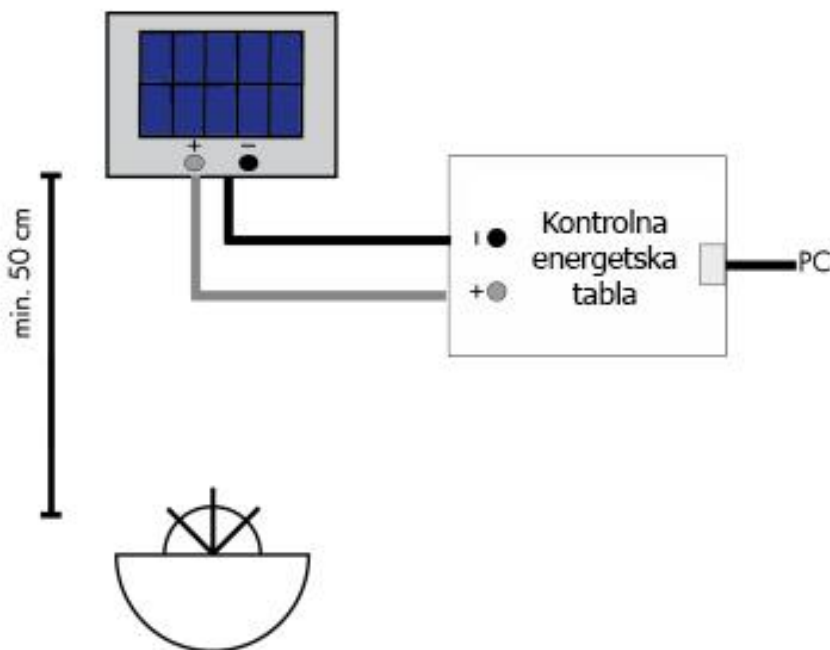
Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti procene uticaj efekta udaljenosti, upadnog ugla i jačine osvetljaja izvora svetlosti na snagu solarne ćelije.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, 1 solarni panel, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, 1 lampa (najmanje 75 W), 1 crni kabl, 1 crveni kabl i jednu traku za merenje (metar).

Uputstva za eksperiment:

Šta se dešava sa merenjima kada je ugao postavke promenjen?

Na slici 7 prikazan je izgled postavke za eksperiment 1.



Slika 7: Postavka eksperimenta 1

Šteta zbog prevelike temperature. Solarne ćelije se mogu oštetiti zbog zagrevanja od lampe, stoga je potrebno postaviti lampu na najmanje 50 cm od solarnog panela.

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 7.
2. Postaviti lampu na 50 cm od solarnog panela (ukoliko se koristi lampa od 60 W potrebno rastojanje je 20 cm).
3. Izabrati “Live module” u programu.
4. Uključiti lampu.
5. Ručno menjati upadni ugao svetlosti na solarni panel dok se ne postigne maksimalni napon otvorenog kola na grafiku. Pri tome, obezbediti da udaljenost od solarnog panela uvek bude ista. Osigurati da je podloga lampe uvek u istom položaju.

6. Prebaciti na režim “Solar module” u programu.
7. Ili: a) Snimiti “Automatic characteristic curve” ili b) Postepeno povećavati ciljanu struju i snimati odgovarajuće vrednosti pomoću “Read measurement” dugmeta.
8. Na kraju sačuvati merenja pomoću “Save measurement” dugmeta.

Kako se izmerene vrednosti ponašaju u zavisnosti od osvetljenja?

9. Postaviti lampu na 50 cm od solarnog panela.
10. Podesiti ugao iradijacije (zračenja) na 90° .
11. Zabeležiti vrednosti za izmereno rastojanje, solarni napon i solarnu struju.
12. Povećavati udaljenost lampe od solarnog panela dok se ne dostigne minimalni solarni napon, zatim zabeležiti izmereno rastojanje, solarni napon i solarnu struju za različite udaljenosti.

ZADACI za eksperiment 1 (radni list 1)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Šta je solarna energija?
2. Šta je solarna snaga i šta znači ‘fotonaponski’?
3. Šta je potrebno da se solarna energija uvede u javnu elektroenergetsku mrežu?
4. Kako je solarna ćelija sastavljena?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

5. Šta se dešava sa merenjima kada je ugao upadnog zračenja promenjen?
6. Šta se dešava sa merenjima kada je rastojanje promenjeno?
7. Koja promenljiva zavisi od udaljenosti između izvora svetlosti i solarnog panela?
8. Od čega zavisi generisana solarna snaga?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

9. Mi uvažavamo samo vrednosti napona u eksperimentima. Zašto je vrednost struje uvek ista?
10. Da li se ista količina solarne energije proizvede od strane solarnog panela svakoga dana u godini? Zašto da ili zašto ne? Šta bi moglo da bude rešenje za to?
11. Od kojih faktora zavisi količina generisane električne energije, a od kojih iskoristive električne energije?
12. Koja fizička veličina može biti izračunata na osnovu vrednosti struje i napona solarnog panela?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

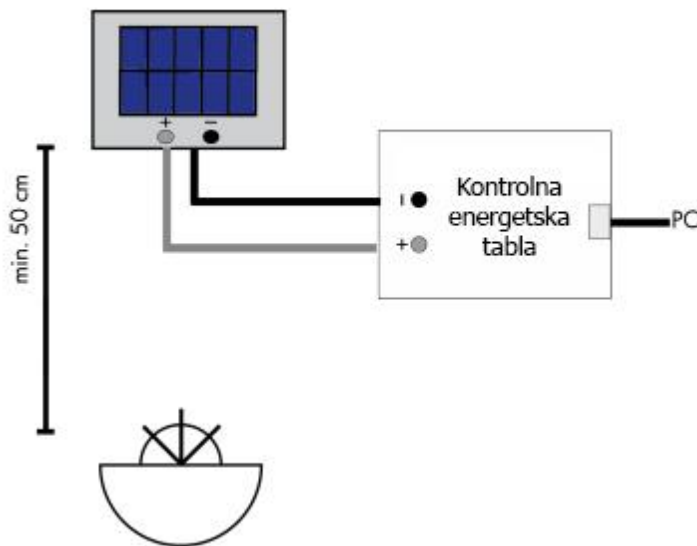
Eksperiment 2 – Određivanje krivih karakteristika solarne ćelije

Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti odrede kakav efekat imaju struja i napon na snagu solarne ćelije, da odrede opseg vrednosti za tačku maksimalne snage (MPP) i da razumeju koncept MPP tragača.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, 1 solarni panel, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, jednu lampu (najmanje 75 W), 1 crni kabl, 1 crveni kabl, jednu traku za merenje (metar), pakovanje tankih prevlaka u boji i tankog papira za ulogu senki.

Kada solarni panel obezbeđuje maksimalnu snagu?

Na slici 8 je prikazana postavka za eksperiment 2.



Slika 8: Postavka eksperimenta 2

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 8.
2. Postaviti lampu na 50 cm od solarnog panela (ukoliko se koristi lampa od 60 W potrebno rastojanje je 20 cm).
3. Izabrati “Solar module” u programu.
4. Uključiti lampu. Ugao iradijacije bi trebao biti oko 90° .
5. Izabrati A “Automatic characteristic curve”. Krive i tabelarne vrednosti prikazane su:
 - $I = f(U)$
 - $P = f(U)$Snaga P je izračunata koristeći formulu $P = U \cdot I$.
6. Na kraju sačuvati merenja pomoću “Save measurement” dugmeta.

Rizik od opekotina. Površina solarnog panela može biti vrela, stoga se panel može dotaći samo kada se dovoljno ohladi.

Kako se merenja ponašaju u zavisnosti od osvetljenja?

7. Držati pakovanje tankih prevlaka ispred lampe.
8. Izabrati A “Automatic characteristic curve”. Krive prikazane su:
 - $I = I(U)$
 - $P = P(U)$Snaga P je izračunata koristeći formulu $P = U \cdot I$.
9. Sačuvati merenja (dugme “Save measurement”).
10. Držati tanak papir ispred lampe.
11. Izabrati A “Automatic characteristic curve”. Krive prikazane su:
 - $I = I(U)$
 - $P = P(U)$Snaga P je izračunata koristeći formulu $P = U \cdot I$.
12. Sačuvati merenja (dugme “Save measurement”).
13. Koristiti program za rad sa tabelama (npr. Excel) i nacrtati na jednom grafiku 3 I-U krive, a na drugom 3 P-U krive.

ZADACI za eksperiment 2 (radni list 2)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Šta je kriva karakteristike?
2. Koje su prednosti solarne energije?
3. Koje su mane solarnih ćelija?
4. Kada je napravljena prva solarna ćelija?
5. Da li solarne ćelije proizvode direktnu ili naizmeničnu struju?
6. Kako se zove uređaj koji pretvara jednosmernu struju u naizmeničnu?
7. Koje vrste solarnih ćelija postoje? Koje imaju najveću efikasnost? Koje su najpovoljnije?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

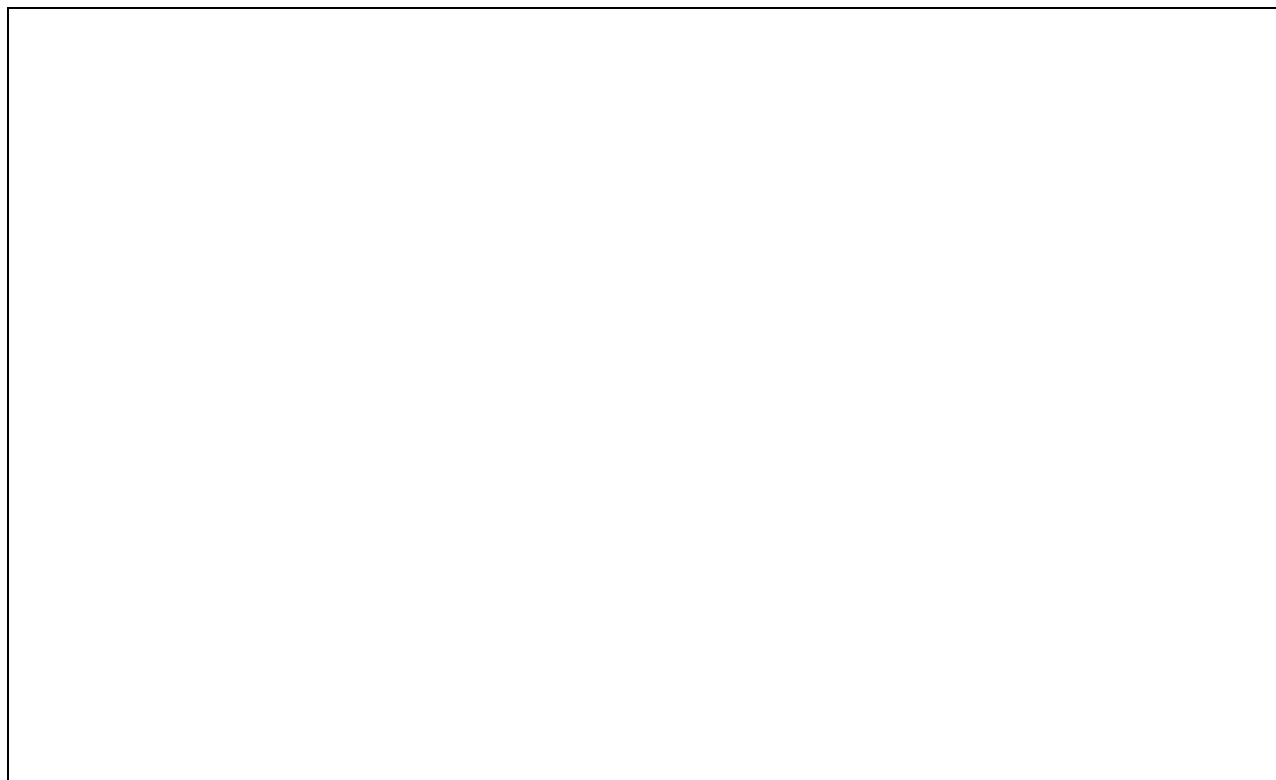
8. Pri kojim parametrima solarni panel pruža maksimalnu snagu?
9. Kako struja kratkog spoja I_{SC} solarnog panela zavisi od osvetljenja?
10. Sa zatamnjenom lampom, pri kojim parametrima solarni panel pruža maksimalnu snagu?
11. Kako je MPP (tačka maksimalne snage) solarnog panela izračunat?

12. Da li se MPP solarne ćelije menja sa manjim osvetljajem?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

13. Kako se zove komponenta koja se koristi u invertorima za FN (eng. PV) sistem koja pomaže u proizvodnji maksimalne snage solarnih panela?
14. Da li je efikasnost solarne ćelije uporediva sa efikasnošću dizel motora?
15. Solarni paneli korišćeni u eksperimentu generišu maksimalno 1.2 W, dok komercijalni solarni paneli generišu 260 W. Koliko solarnih panela bi bilo potrebno za rad sledećih uređaja: a) Radio u autu, b) Računar, c) Usisivač



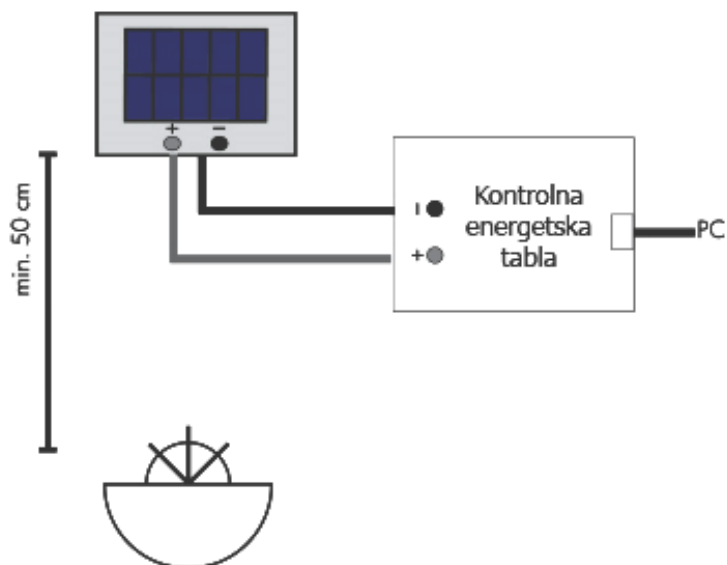
OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Eksperiment 3 – Delimično zasenčene solarne ćelije

Cilj ovog eksperimenta je da student ispitaju uticaj senke na snagu solarnog panela.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, 1 solarni panel, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, jednu lampu (najmanje 75 W), 1 crni kabl, 1 crveni kabl, jednu traku za merenje (metar), 1 neprovidan komad kartona za ulogu senke (9 cm x 3.5 cm, 1 cm dužine savijen preko) i 1 neprovidan komad kartona za ulogu senke (6 cm x 3.5 cm, 1 cm dužine savijen preko).

Na slici 9 prikazana je postavka eksperimenta 3.



Slika 9: Postavka eksperimenta 3

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 9.
2. Postaviti lampu na 50 cm od solarnog panela.
3. Izabrati “Live module” u programu.
4. Uključiti lampu.
5. Podesiti ugao iradijacije na oko 90° tako da je U_{SOL} na maksimumu.
6. Isključiti lampu kako bi se izbeglo nepotrebno zagrevanje solarnog panela.
7. Izabrati “Solar module” režim u programu.

Merenje bez uticaja senke:

8. Izabrati A “Automatic characteristic curve”. Krive prikazane su:

- $I = f(U)$
- $P = f(U)$

Snaga P je izračunata koristeći formulu $P = U \cdot I$.

9. Sačuvati merenje sa jasnim imenom fajla (EK3_bezsenke).
10. Isključiti lampu.

Merenje sa $\frac{1}{2}$ zasenčene ćelije:

11. Držati 6 cm dug komad kartona ispred gornje leve solarne ćelije na solarnom panelu.

Na slici 10 prikazan je način imitacije senke na panel uz pomoć kartona.



Slika 10: Pola solarne ćelije solarnog panela (2) je zasenčeno uz pomoć kartona (1)

12. Uključiti lampu.
13. Izabrati A “Automatic characteristic curve”.
14. Sačuvati merenje sa jasnim imenom fajla (EK3_polassenke).
15. Isključiti lampu.

Merenje sa jednom ćelijom zasenčenom:

16. Držati 9 cm dug komad kartona ispred gornje leve solarne ćelije na solarnom panelu.
17. Uključiti lampu.
18. Izabrati A “Automatic characteristic curve”.
19. Sačuvati merenje sa jasnim imenom fajla (EK3_senka).
20. Isključiti lampu.
21. Koristiti program za rad sa tabelama (npr. Excel) i na jednom grafiku prikazati sve snimljene I-U krive, a na drugom sve snimljene P-U krive.

ZADACI za eksperiment 3 (radni list 3)

Opšta pitanja/inicijalni test

8. Šta znači “kilovat-vrh (pik)”?
9. Da li će svaki FN (PV) sistem uvek generisati nominalni izlaz?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

10. Uporediti MPP struju i MPP snagu za neosenčen solarni panel i poluosenčen solarni panel.
11. Kako krive karakteristika izgledaju kada je jedna solarna ćelija solarnog panela potpuno prekrivena senkom?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

12. Zašto nikakva struja ne teče kada je jedna cela solarna ćelija solarnog panela pod senkom?
13. Kako se delimično zasenčene solarne ćelije mogu sprečiti da obaraju napon solarnog panela?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

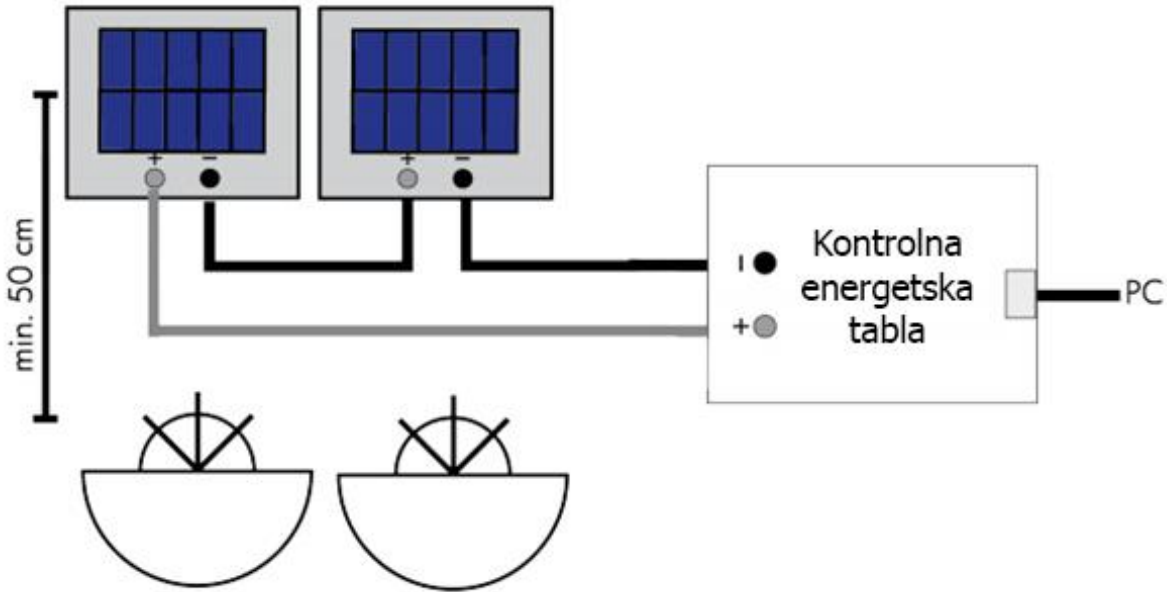
Eksperiment 4 – Paralelna i redna veza solarnih ćelija

Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti razumeju šta se dobija povezivanjem solarnih ćelija paralelno, a šta redno, koriste formule sume struja za paralelnu vezu, koriste formule sume napona za rednu vezu, kreiraju kombinovanu paralelno-rednu vezu i ispituju uticaj efekta senke na snagu solarnog panela.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, 2 solarna panela, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, jednu lampu (najmanje 75 W), 2 crna kabla, 2 crvena kabla i jednu traku za merenje (metar).

Podesiti postavku eksperimenta, maksimizirati solarni napon

Na slici 11 prikazana je postavka za eksperiment 4 sa solarnim panelima vezanim na red.



Slika 11: Postavka eksperimenta 4 – redna veza

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 11.
2. Postaviti lampu na 50 cm od solarnog panela.
3. Izabrati “Live module” u programu.
4. Uključiti lampu.
5. Ručno menjati upadni ugao svetlosti na solarni panel dok se ne postigne maksimalni solarni napon na grafiku (oko 2.2 V).

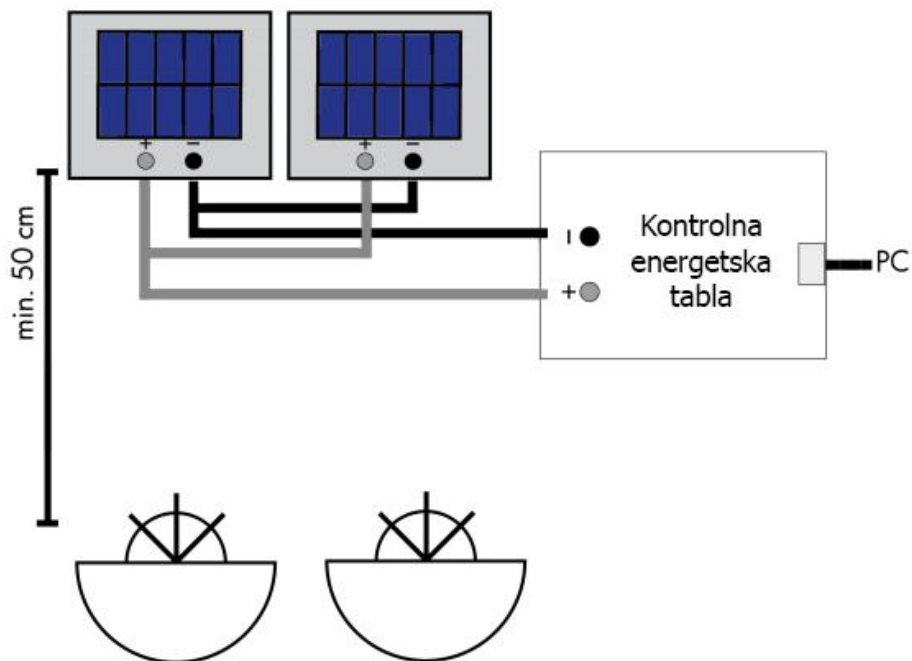
Rezultati merenja će se promeniti ukoliko se rastojanje između lampe i solarnog panela promeni, stoga treba voditi računa da osnova lampe uvek bude na istom mestu.

Povezati solarne panele redno

6. Izabrati “Solar module” režim u programu.
7. Izabrati A “Automatic characteristic curve”. Krive prikazane su:
 - $I = I(U)$
 - $P = P(U)$Snaga P je izračunata koristeći formulu $P = U \cdot I$.
8. Isključiti lampe
9. Sačuvati merenje sa jasnim imenom fajla (EK4_redno).

Povezati solarne panele paralelno

Na slici 12 prikazana je postavka za eksperiment 4 sa solarnim panelima vezanim paralelno.



Slika 12: Postavka eksperimenta 4 – paralelna veza

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 12.
2. Uključiti lampu.

3. Ukoliko je neophodno ponovo podesiti postavku eksperimenta:
 - 50 cm rastojanje od lampe do solarnog panela,
 - 90° upadni ugao,
 - Solarni napon na grafiku je oko 2.2 V.
4. Izabrati A "Automatic characteristic curve".
5. Sačuvati merenje sa jasnim imenom fajla (EK4_paralelno).
6. Koristiti program za rad sa tabelama (npr. Excel) i na jednom grafiku prikazati dve I-U i dve P-U krive.

ZADACI za eksperiment 4 (radni list 4)

Opšta pitanja/inicijalni test

11. Kako se naponska merenja ponašaju kada se solarne ćelije povezuju redno?

12. Kako se strujna merenja ponašaju kada se solarne ćelije povezuju paralelno?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

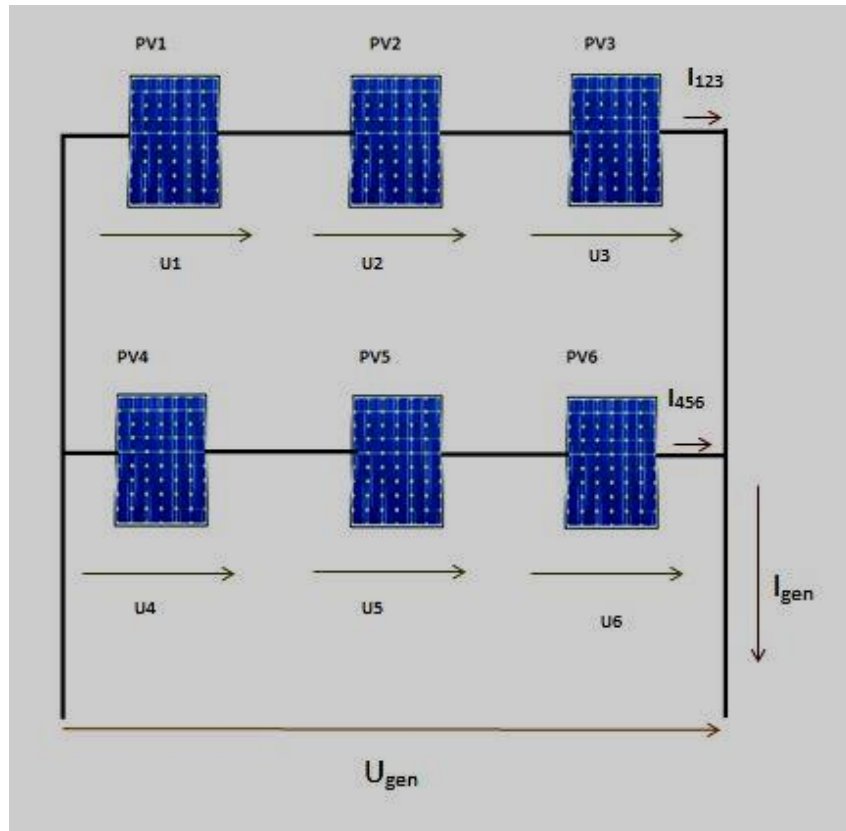
13. Da li se solarna ćelija ponaša slično kao drugi izvori snage, kao što su baterije, kada su povezane redno i paralelno?

14. Uporediti I-U krive karakteristike i P-U krive karakteristike za dva solarna panela povezana paralelno i redno, koristeći isti grafik.

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

15. Koje su sumarne jednačine za ukupnu struju i ukupan napon za ovakvu vezu?



Slika 13: Kombinovana redno-paralelna veza sa šest solarnih panela

16. Ako je jedna solarna ćelija u rednoj vezi solarnih ćelija uništena, da li je struja prekinuta?
17. Kako se problem iz prethodnog pitanja može rešiti?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

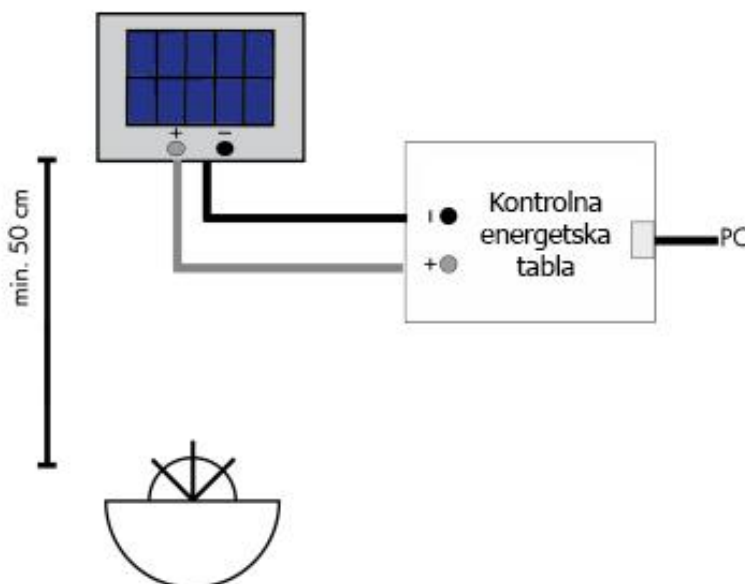
Eksperiment 5 –Temperaturna zavisnost snage solarne ćelije

Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti izmere temperaturu solarne ćelije, kreiraju i upoređuju krivie karakteristika solarne ćelije i prikažu uticaj temperature na snagu solarnog panela.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, solarni panel, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, jednu lampu (najmanje 75 W), 1 crni kabl, 1 crveni kabl, jednu traku za merenje (metar) i termovizijsku kamera.

Podesiti postavku eksperimenta, maksimizirati solarni napon

Na slici 14 prikazana je postavka za eksperiment 5.



Slika 14: Postavka eksperimenta 5

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 14.
2. Postaviti lampu na 50 cm od solarnog panela.
3. Izabrati “Live module” u programu.
4. Uključiti lampu.
5. Postaviti upadni ugao svetlosti na solarni panel na 90° dok se ne postigne maksimalni solarni napon na grafiku (oko 2.2 V).

Kako se merenja ponašaju u zavisnosti od temperature?

6. Izabrati “Solar module” režim u programu.
7. Izabrati A “Automatic characteristic curve”. Krive prikazane su:
 - $I = f(U)$
 - $P = f(U)$
 Snaga P je izračunata koristeći formulu $P = U \cdot I$.
8. Izmeriti temperaturu jedne od središnjih solarnih ćelija koristeći termovizijsku kameru. Zabeležiti vrednost kao T1.
9. Sačuvati merenje sa jasnim imenom fajla (EK5_T1).
10. Nastaviti sa merenjem temperature solarne ćelije i kreirati i sačuvati automatske krive karakteristika (eng. automatic characteristic curves) pri $T = 40^\circ\text{C}$ i $T = 50^\circ\text{C}$.

ZADACI za eksperiment 5 (radni list 5)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Skicirati tipičnu strujno-naponsku krivu karakteristike za solarni panel. Gde je struja kratkog spoja I_{SC} ? Gde je napon otvorenog kola U_{OC} ? Gde je tačka maksimalne snage (MPP)?
2. Šta je faktor popunjenosti za strujno-naponsku krivu karakteristike solarnog panela?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

3. Kako solarni napon i solarna struja zavise od temperature?
4. Pri kojoj temperaturi solarni panel pruža veću snagu?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

5. Zašto je važna zavisnost odstupanja karakterističnih vrednosti solarnog panela od temperature?
6. Šta se može uraditi da bi se suprotstavili smanjenju izlaza iz solarnog panela uzrokovano visokim letnjim temperaturama?
7. Koje talasne dužine sunčevog zračenja solarna ćelija koristi da izvrši konverziju u električnu energiju?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 5

MOGUĆNOSTI PRIMENE SOLARNE ENERGIJE NA PRIMERU JEDNE SOLARNE ČELIJE KAO IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE

- ☐ **Osnove fizike poluprovodnika**
- ☐ **Energetski procep**
- ☐ **P-N spoj**
- ☐ **Najjednostavnije ekvivalentno kolo solarne ćelije**
- ☐ **Složenije ekvivalentno kolo solarne ćelije**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Peta vežba ima za cilj da se studenti prošire saznanja o solarnoj ćeliji, njenoj strukturi, načinu funkcionisanja, materijalima koji se koriste za njenu izradu, odgovarajućim ekvivalentnim šemama i da na praktičnim primerima ispituju mogućnosti solarne ćelije.

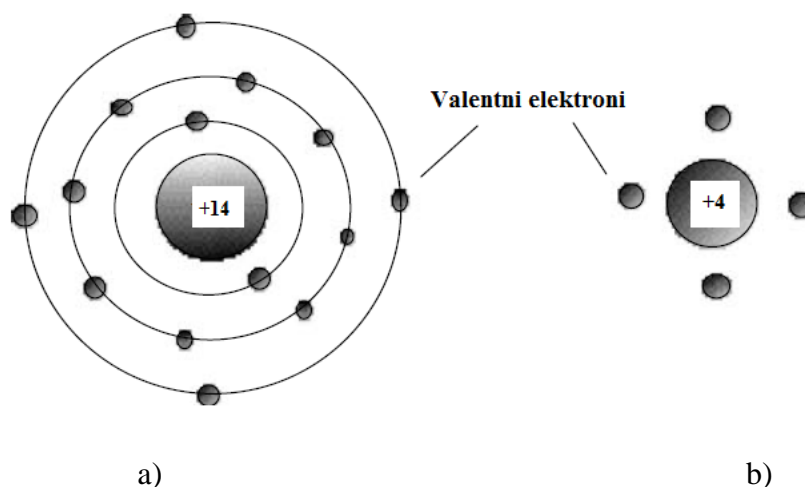
1. Osnove fizike poluprovodnika

Fotonaponske ćelije koriste poluprovodničke materijale koji pretvaraju svetlosnu energiju u napon, kao što nagoveštava sam naziv. Tehnologija kojom se to postiže jako je blisko povezana sa tehnologijama koje se koriste za proizvodnju tranzistora, dioda, i svih drugih poluprovodničkih elemenata koji su u svakodnevnoj upotrebi. Početno mesto za najveći broj trenutnih fotonaponskih tehnologija je, kao i za većinu poluprovodnika, čist kristalni silicijum. Silicijum (oznaka Si) se nalazi u četvrtoj koloni periodnog sistema elemenata, odnosno pripada IV grupi periodnog sistema elemenata, kao što je prikazano u tabeli 1. Germanijum je još jedan element IV grupe i takođe nalazi primenu u elektronici, kao poluprovodnik. Drugi elementi koji imaju važnu ulogu u izradi materijala za fotonaponske ćelije su napisani podebljanim slovima. Kao što će biti objašnjeno, Bor i Fosfor, iz III i V grupe, se dodaju silicijumu čime nastaje većina PV ćelija. Galijum i Arsen se koriste za proizvodnju GaAs solarnih ćelija, dok kadmijum (Cd) i telur (Te) koriste za proizvodnju CdTe solarnih ćelija.

Tabela 1: Deo periodnog sistema elemenata sa najvećom primenom u izradi fotonaponskih ćelija

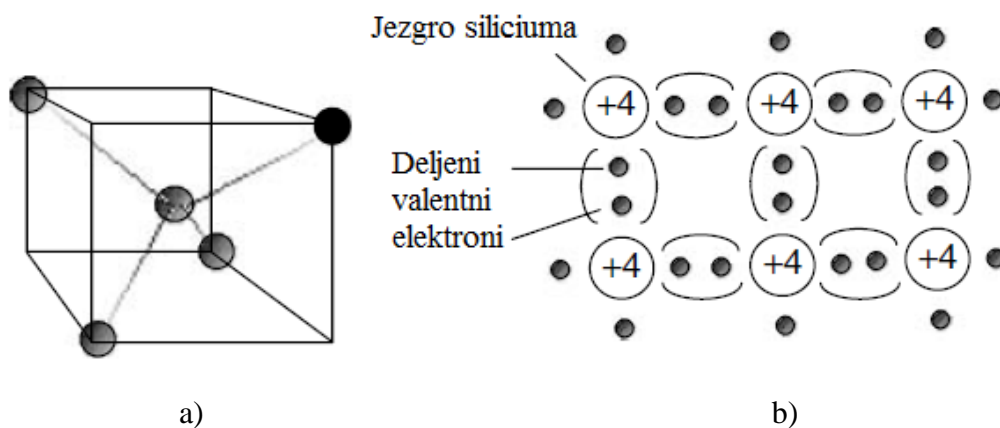
I	II	III	IV	V	VI
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te

Silicijum ima 14 protona u svom jezgru i 14 elektrona u omotaču koji kruže oko jezgra. Kao što je prikazano na slici 1 a), poslednja ljuska silicijuma sadrži 4 valentna elektrona, tj. silicijum je četvorovalentan. Ti valentni elektroni su jedini elektroni koji su važni u elektronici, tako da je uobičajeno da crtanje silicijuma kao da ima naelektrisanje jezgra +4 i 4 usko zbijena valentna elektrona, kao što se vidi na slici 1 b).



Slika 1: a) Stvarna i b) pojednostavljena struktura atoma silicijuma

U čistom kristalnom silicijumu, svaki atom formira kovalentnu vezu sa 4 susedna atoma prema trodimenzionalnom tetraedarskom šablonu, kao na slici 2 a). Radi jednostavnije analize ove kovalentne veze se predstavljaju kao da se nalaze u ravni, kao na slici 2 b).



Slika 2: a) Trodimenzionalana tetraedarska i b) dvodimenzionalna struktura atoma silicijuma

2. Energetski procep

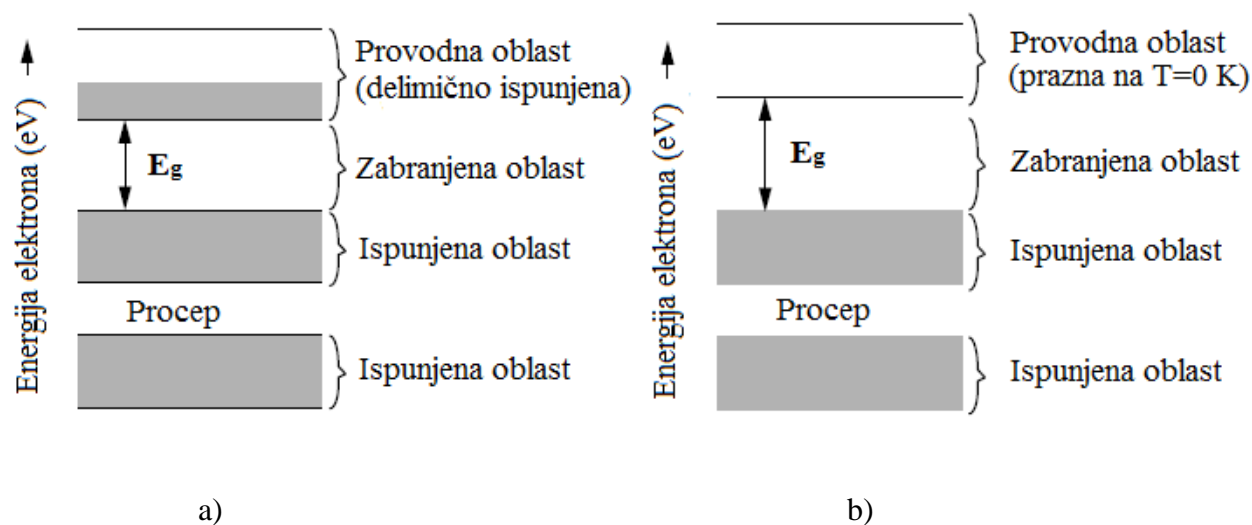
Na temperaturi apsolutne nule, silicijum je idealni izolator, ne postoje slobodni elektroni kao što je to slučaj kod metala. Sa povećanjem temperature, neki elektroni će dobiti dovoljno energije da se oslobode iz jezgra, čime postaju sposobni da *teku kao električna struja*. Sa daljim porastom temperature, veći broj elektrona postaje sposoban da prenosi struju, pa se provodnost silicijuma dodatno povećava (za razliku od metala, kod kojih se sa povećanjem temperature povećava otpornost). Promena provodnosti sa porastom temperature se koristiti za pravljenje veoma preciznih senzora – *termistora*. Provodnost silicijuma na sobnoj normalnoj temperaturi je i dalje jako niska, zato silicijum i jeste poluprovodnik. Dodavanjem malih količina drugih materijala, provodnost čistih poluprovodnika se može značajno povećati.

Kvantna teorija opisuje razliku između provodnika (metala) i poluprovodnika (kao npr. silicijuma) koristeći dijagrame energetskih procepa, kao što je prikazano na slici 3.

Elektroni moraju imati energije koje se nalaze unutar određenih dozvoljenih energetskih raspona.

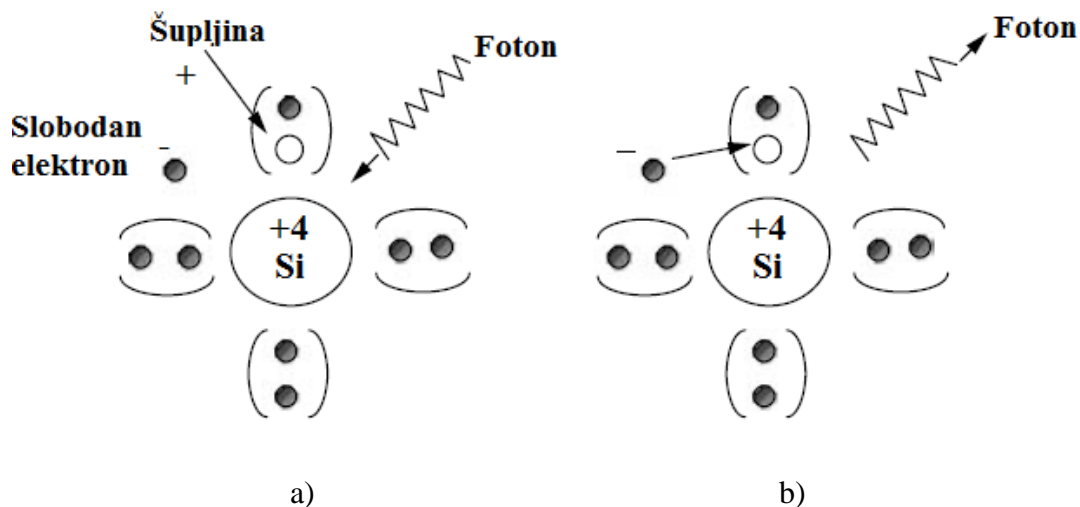
Najviši energetski raspon se naziva provodna oblast, i elektroni u ovoj oblasti mogu prenositi električnu struju. Kao što je prikazano na slici 3, provodna oblast za metale je delimično ispunjena, ali je za poluprovodnike na temperaturi apsolutne nule provodna oblast prazna. Na sobnoj temperaturi, samo se jedan na svakih 10^{10} elektrona nalazi u provodnoj oblasti.

Energija koju elektron mora da dobije da bi prešao iz zabranjene u provodnu oblast se zove *energetski procep* i obeležava se sa E_g . Jedinica kojom se izražavaju energije energetskih procepa je obično elektronVolt [eV], pri čemu je eV energija potrebna da se napon na elektronu poveća za 1 V ($1\text{eV}=1.6\cdot 10^{-19}\text{ J}$).



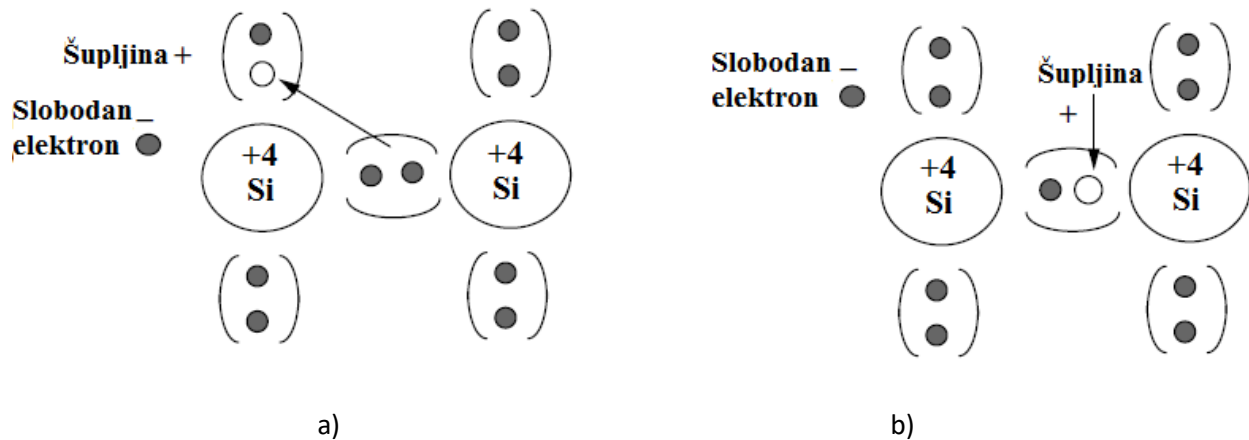
Slika 3: Energetski procep za a) metale i b) poluprovodnike

Energetski procep E_g za silicijum je jednak 1.12 eV, što znači da je to količina energije potrebna da se elektron oslobodi od elektrostatičke sile koja ga vezuje za njegovo jezgro – to jest, energije potrebna elektronu da bi prešao u provodnu oblast. Nameće se pitanje, odakle treba da dođe ta energija. Već je poznato da mali broj elektrona ovu energiju dobija termičkim putem. Za solarne ćelije, izvor energije su fotoni koji "nose" elektromagnetsku energiju sa Sunca. Kada foton sa više od 1.12 eV energije apsorbuje solarna ćelija, usamljeni elektron može preći u provodnu oblast. Kada elektron pređe u provodnu oblast, on iza sebe ostavlja jezgro sa naelektrisanjem +4 oko koga se nalaze samo 3 elektrona. To jest, u zbiru nastaje pozitivno naelektrisanje koje se naziva šupljina, koja je povezana sa jezgrom na način prikazan na slici 4 a). Osim ako ne postoji neki način da se elektroni "očiste" iz šupljina, oni će se rekombinovati, i ukloniće i elektron i šupljinu, kao što je prikazano na slici 4 b). Kada se dogodi rekombinacija, energija koja je povezana sa elektronom u provodnoj oblasti, se oslobađa u obliku fotona, što predstavlja osnovu za funkcionisanje LED (Light Emitting Diodes) tehnologija.



Slika 4: a) Stvaranje para elektron-šupljina i b) rekombinacija elektrona i šupljine

Važno je uočiti da nije samo negativno naelektrisan elektron u provodnoj oblasti sposoban da se kreće u kristalu, već se može kretati i pozitivno naelektrisana šupljina koja ostaje iza elektrona. Valentni elektron u energetskej oblasti ispunjenoj energijom se može lako kretati da bi popunio šupljinu u susednom atomu, ne morajući da promeni energetskej oblast. Čineći to, šupljina se, u suštini, pomera ka jezgru iz kog je elektron potekao, kao što je prikazano na slici 5. Ovaj postupak je analogan studentu koji napušta svoje mesto da bi otišao da popije kafu. Stvara se par student-slobodno mesto. Drugi student koji već sedi se može odlučiti da želi da sedi na novoupražnjenom mestu, premeštajući se na susedno mesto, ostavljajući svoje mesto upražnjenim. Upražnjeno mesto se prividno pomera kao što se šupljine pomeraju unutar poluprovodnika. Važna poenta je da se električna struja u poluprovodnicima može prenositi ne samo negativno naelektrisanim elektronima koji se kreću, već i pozitivno naelektrisanim šupljinama koje se kreću unutar poluprovodnika.



Slika 5: a) Elektron se pomera i popunjava šupljinu; b) Šupljina se pomera

Prema tome, fotoni sa dovoljnom količinom energije stvaraju parove elektron-šupljina u poluprovodniku. Fotoni se mogu okarakterisati njihovom talasnom dužinom, njihovom frekvencijom, kao i energijom; te tri veličine su povezane sledećim izrazom:

$$c = \lambda \cdot \nu, \quad (1)$$

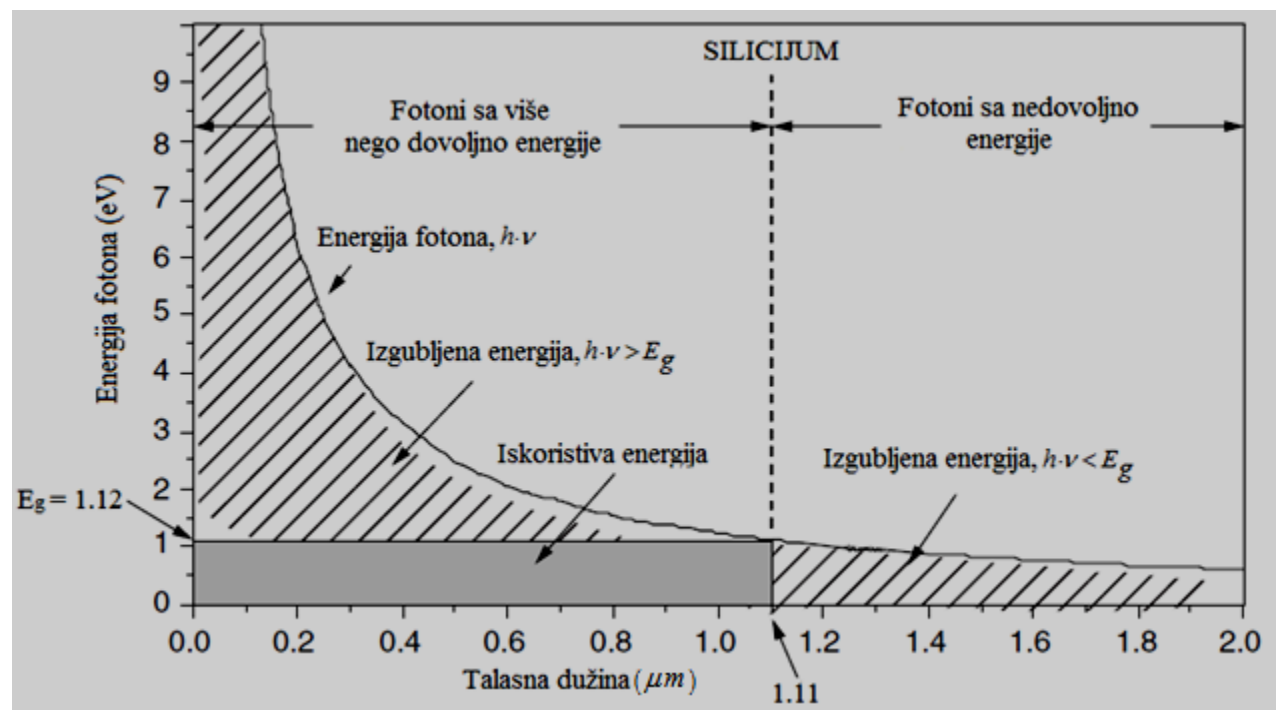
gde je c brzina svetlosti ($c=3 \cdot 10^8$ m/s), ν [Hz] je frekvencija, a λ [m] talasna dužina svetlosti i važi:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (2)$$

gde je E [J] energija fotona, a h je Plankova konstanta ($h=6.626 \cdot 10^{-34}$ Js).

Za silicijumske fotonaponske ćelije, fotoni sa talasnim dužinama većim od $1.11 \mu\text{m}$ imaju energiju $h \cdot \nu$ manju od 1.12 eV koliki je energetski procep i koliko je energije potrebno da se pobudi jedan elektron. Nijedan od ovih fotona ne stvara parove elektron-šupljina koji su sposobni da prenose struju, tako da je sva njihova energija izgubljena. Ta energija samo zagreva ćeliju. Sa druge strane, fotoni sa talasnim dužinama manjim od $1.11 \mu\text{m}$ imaju sasvim dovoljno energije da pobude elektron. Kako jedan foton može da pobudi *samo* jedan elektron sva energija preko 1.12 eV samo zagreva ćeliju. Grafik izraza (2) prikazan je na slici 6 ilustruje ovo važno

zapažanje. Energetski procepi za druge fotonaponske materijale – galijum-arsenid (GaAs), kadmijum – telurid (CdTe) i indijum – fosfid (InP), uz dodatak silicijuma su prikazane u tabeli 2.



Slika 6: Granična vrednost energije fotona od 1.12 eV

Tabela 2: Granična vrednost talasne dužine fotona i energetskog procepa materijala za pobuđivanje elektrona u kristalnoj rešetki

	Si	GaAs	CdTe	InP
Energetski procep [eV]	1.12	1.42	1.5	1.35
Granična talasna dužina [μm]	1.11	0.87	0.83	0.92

Sada se može načiniti jednostavna procena gornje granice za efikasnost silicijumske solarne ćelije. Širina energetskog procepa za silicijum je 1.12 eV, što odgovara talasnoj dužini od 1.11 μm, što znači da energija solarnog zračenja sa talasnim dužinama većim od 1.11 μm ne

može poslati elektron u provodnu oblast. Takođe, svi fotoni sa talasnim dužinama većim od 1.11 μm troše prekomernu energiju. Ako je poznat spektar solarnog zračenja, mogu se izračunati gubici usled ova dva fundamentalna fizička ograničenja. Pretpostavljajući standardni količnik vazdušne mase od $m=1.5$, 20.2% energije Sunčevog zračenja se gubi, jer fotoni imaju manje energije od širine energetskog procepa ($h\cdot\nu < E_g$), a narednih 30.2% energije se gubi jer fotoni imaju previše energije ($h\cdot\nu > E_g$). Preostalih 49.6% predstavlja maksimalni deo Sunčeve energije koji se može "sakupiti" silicijumskom fotonaponskom ćelijom. To jest, širina energetskog procepa silicijuma ograničava efikasnost silicijumske ćelije na ispod 50%.

Čak i ova jednostavna rasprava daje uvid u kriterijume za izbor materijala sa malim, odnosno velikim energetskim procepom. Sa manjim procepom, više energije je potrebno za pobuđivanje elektrona, što je dobro jer se tako stvaraju naponi koji omogućavaju struji da teče. Sa druge strane, mali energetski procep znači da veći broj elektrona ima "višak" energije iznad nivoa za stvaranje parova elektron – šupljina, čime se troši energija. Veliki energetski procep ima suprotne osobine. Veliki energetski procep znači da manje fotona ima dovoljno energije da stvori parove elektron-šupljina koji prenose struju, što ograničava struju koja se može proizvesti. Sa druge strane, veliki energetski procep daje naelektrisanjima veće napone sa manje suvišne energije. Drugim rečima, manji energetski procep veće struje sa manjim naponima, dok veći energetski procep daje manje struje i veće napone. Kako je snaga proizvod napona i struje, mora postojati neka vrednost energetskog procepa, obično između 1.2 eV i 1.8 eV, koja rezultuje sa najvećom snagom i efikasnošću. Efikasnost solarnih ćelija je grubo oko 20-25%, dosta ispod 49.6% što je izračunato uvažavanjem samo gubitaka usled fotona sa nedovoljnom energijom da elektron pošalju u provodnu zonu i usled fotona sa energijom prevelikom da se elektron pošalje u provodnu zonu.

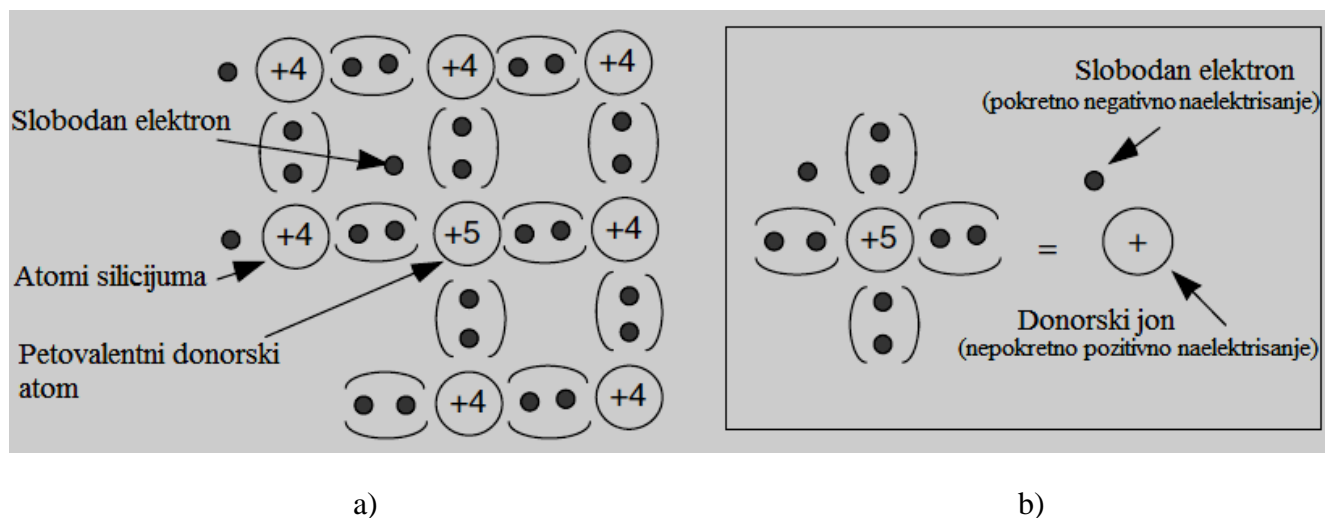
Drugi faktori koji doprinose padu u odnosu na teoretsku efikasnost uključuju:

1. Rekombinacija elektrona i šupljina pre nego što doprinesu toku struje.
2. Fotoni nisu apsorbirani u ćeliji jer se odbijaju od površine ćelije ili jer prolaze pravo kroz ćeliju ili su blokirani metalnim provodnicima koji sakupljaju struju sa vrha ćelije.
3. Unutrašnji otpori u ćeliji, na kojima se disipira snaga.

3. P-N spoj

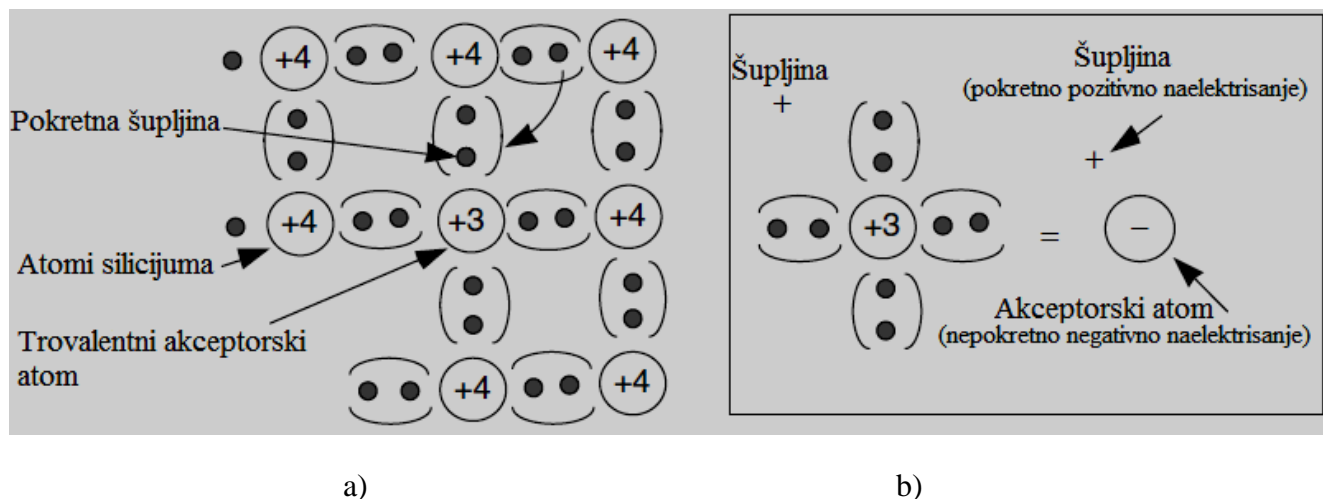
Sve dok je solarna ćelija izložena fotonima koji imaju energiju veću od energije energetske procepa, stvaraju se parovi elektron-šupljina. Problem je, naravno, što ti elektroni mogu da padnu ponovo u šupljinu, čime oba nosioca naelektrisanja nestaju. Da bi se izbegla ta rekombinacija, elektroni u provodnoj oblasti se moraju kontinualno "čistiti" iz šupljina. Kod fotonaponskih ćelija ovo se postiže stvaranjem ugrađenog električnog polja unutar samog poluprovodnika koji usmerava elektrone u jednom pravcu, a šupljine u drugom pravcu. Da bi se stvorilo električno polje, uspostavljaju se dve oblasti unutar kristala. Sa jedne strane linije koja razdvaja oblasti, čist silicijum je namerno zagađen veoma malom količinom trovalentnog elementa iz III kolone periodnog sistema elemenata; sa druge strane, mogu se dodavati petovalentni elementi iz V kolone periodnog sistema elemenata.

Razmatra se strana poluprovodnika koja je dopirana petovalentnim elementom, kao što je fosfor. Samo jedan atom fosfora se tipično dodaje na 1000 atoma silicijuma. Kao što je prikazano na slici 7 petovalentna "nečistoća" formira kovalentne veze sa 4 susedna atoma silicijuma. 4 od 5 atoma fosfora se čvrsto vezuju, ali peti elektron ostaje slobodan u kristalu. Kada taj elektron napusti blizinu svog donorskog atoma, ostaje +5 donorski jon fiksiran u rešetki, okružen sa samo četiri negativna valentna elektrona. To jest, svaki donorski atom se može predstaviti kao usamljena, nepokretna, pozitivno naelektrisana čestica plus slobodno negativno naelektrisanje, kao što je prikazano na slici 7 b). Petovalentni, tj. +5 elementi doniraju elektrone svojoj strani poluprovodnika, tako da se oni zovu *donori*. Kako sada postoje negativna naelektrisanja koja mogu da se kreću unutar kristala, poluprovodnik dopiran donorskim atomima se naziva *poluprovodnik n-tipa*.



Slika 7: a) Petovalentni donor u rešetki silicijuma; b) Predstava donorskog atoma

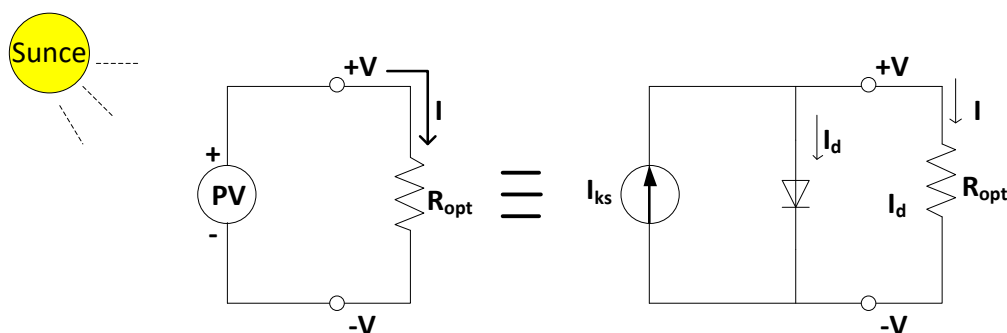
Sa druge strane poluprovodnika, silicijum se dopira trovalentnim elementom kao što je bor. Ponovo je koncentracija primese jako mala, na jedan atom bora dolazi oko 10 miliona atoma silicijuma. Atomi primese zauzimaju svoje mesto u kristalu i formiraju kovalentne veze sa susednim atomima, kao što je prikazano na slici 8. Kako svaka od ovih primesa ima samo tri elektrona, formiraju se samo tri kovalentne veze, što znači da se pozitivno naelektrisana šupljina nalazi uz svoje jezgro. Elektron iz susednog atoma silicijuma se može lako pomeriti u šupljinu, tako da se ove trovalentne primese nazivaju *akceptori*, jer primaju elektrone. Popunjena šupljina znači da sada 4 negativna naelektrisanja okružuje jezgro naelektrisano sa +3. Sve četiri kovalentne veze su formirane i stvaraju nepokretno naelektrisanje na svakom akceptorskom atomu. U međuvremenu, svaki akceptor je stvorio pozitivno naelektrisanu šupljinu koja je slobodna da se kreće po kristalu, tako da je ova strana poluprovodnika nazvana *poluprovodnik p-tipa*.



Slika 8: a) Trovalentni akceptor u rešetki silicijuma; b) Predstava akceptorskog atoma

4. Najjednostavnije ekvivalentno kolo solarne ćelije

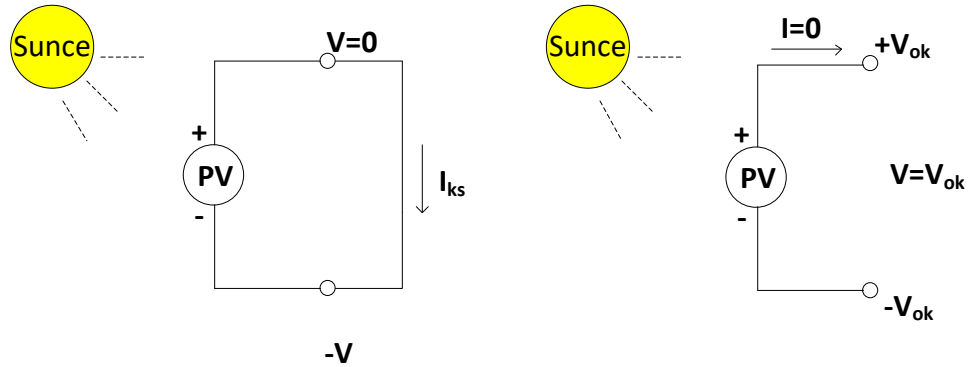
Najjednostavnije ekvivalentno kolo solarne ćelije se sastoji od realne diode koja je vezana u paraleli sa idealnim strujnim izvorom. Jačina struje koju isporučuje idealni strujni izvor je u direktnoj srazmeri sa solarnom iradijacijom kojoj je solarna ćelija izložena. Kada solarna ćelija nije osvetljena, u ekvivalentnoj šemi sa slike 9 nema idealnog strujnog izvora I_{ks} .



Slika 9: Jednostavno ekvivalentno kolo fotonaponske ćelije

Postoje dva stanja koja su od posebne važnosti za stvarnu PV ćeliju i za njeno ekvivalentno kolo. Kao što se vidi na slici 10, to su: struja koja teče kroz ćeliju kada su spoljašnji priključci kratko spojeni (*struja kratkog spoja*, I_{ks}) i napon na PV ćeliji kada su spoljašnji

priključci otvoreni (*napon otvorenog kola*, V_{ok}). Kada su krajevi ekvivalentnog kola PV ćelije kratko spojeni, struja ne teče kroz (realnu) diodu, jer je napon na diodi $V_d = 0$, tako da sva struja iz idealnog strujnog izvora teče kroz kratkospojene krajeve. Kako struja kratkog spoja mora biti jedna jedina, onda je jačina idealnog strujnog izvora takođe jednaka I_{ks} .



Slika 10: Važni parametri fotonaponske ćelije, struja kratkog spoja (levo) i napon otvorenog kola (desno)

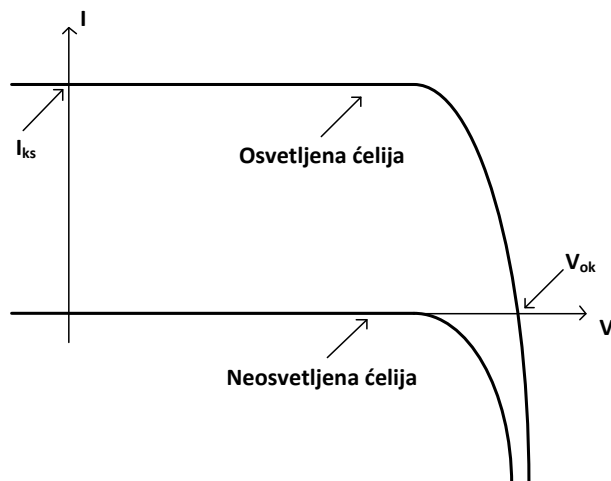
Sada se mogu napisati strujne i naponske jednačine po Prvom i Drugom Kirkohovom Zakonu za ekvivalentno kolo PV ćelije koje je prikazano na slici 9:

$$I = I_{ks} - I_d. \quad (3)$$

Kada se izraz za struju diode u zavisnosti od napona na diodi zameni u prethodni izraz, dobija se:

$$I = I_{ks} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right). \quad (4)$$

Treba primetiti da umanjilac u izrazu (4) predstavlja jednačinu za struju diode sa negativnim predznakom. To znači da grafik jednačine (4) predstavlja grafik struje I_{ks} dodat na krivu diode koja je okrenuta naopačke. Slika 11 pokazuje strujno-naponsku karakteristiku PV ćelije kada je mračno (nema osvetljenosti) i kada je svetlo (osvetljeno) na osnovu izraza (4).

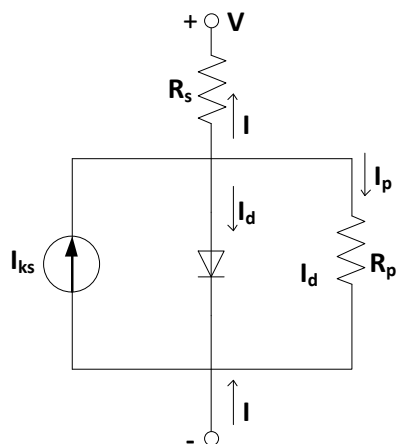


Slika 11: Strujno – naponska karakteristika za osvetljenu i neosvetljenu solarnu ćeliju

5. Složenije ekvivalentno kolo solarne ćelije

Postoje slučajevi kada je za analizu PV ćelije potrebno složenije ekvivalentno kolo od onog koje je predstavljeno na slici 9. Na primer, razmatra se uticaj senke koja pada na jednu od redno povezanih solarnih ćelija. Ako se jedna od ćelija nalazi u mraku (na nju je pala senka), ona ne proizvodi struju. U prethodnom pojednostavljenom ekvivalentnom kolu zasenčene ćelije, struja kroz idealni strujni izvor te ćelije je nula, njena dioda je zakočena i ne provodi struju (osim jako male vrednosti inverzne strije zasićenja). Ovo znači da se korišćenjem najjednostavnijeg ekvivalentnog kola dobija informaciju da se opterećenju neće prenositi snaga ako je makar i jedna PV ćelija zasenčena. Iako je tačno da su PV ćelije jako osetljive na senku (slučaj u kome su neke ćelije ili delovi ćelije izloženi svetlosti, a ostale nisu), ovaj slučaj nije tako loš kao što izgleda. Zaključak je da je potreban složeniji model da bi se rešavali problemi kao što je senka koja pada na solarnu ćeliju.

Složenije ekvivalentno kolo solarne ćelije osim idealnog strujnog izvora i diode sadrži i po jedan redni (R_s) i paralelni otpornik (R_p). Ovo ekvivalentno kolo je prikazano na slici 12.



Slika 12: Složenije ekvivalentno kolo solarne ćelije sa rednim i paralelnim otpornikom

ZADACI

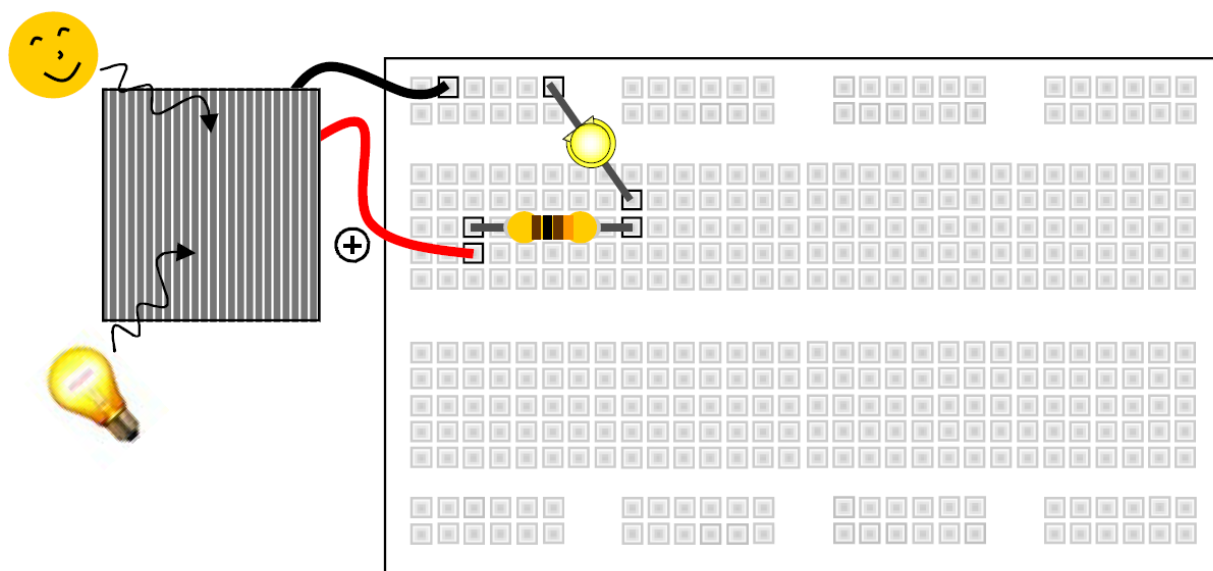
ZADATAK 1

Solarno napajanje za LED. Povezati kolo prikazano na slici 13. Potrebni elementi: solarna ćelija, otpornik od $470\ \Omega$ (žuta, ljubičasta, braon, zlatna), žuta LED. Solarna ćelija ima sledeće karakteristike:

Napon otvorenog kola, $V_{ok} = 4\text{ V}$.

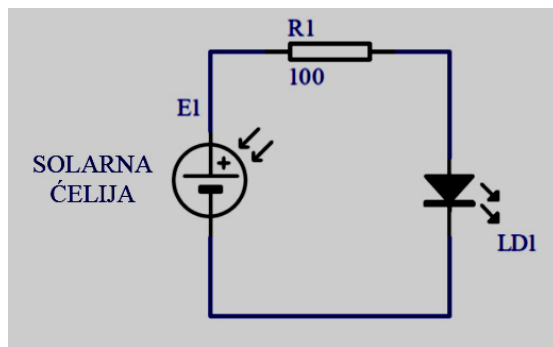
Struja kratkog spoja, $I_{ks} = 30\text{ mA}$.

Obratiti pažnju da duža elektroda LED označava + kraj.



Slika 13: Način povezivanja solarno napajane LED

Kako radi: Potrebno je da strujni krug bude zatvoren da bi struja tekla. Struja teče od pozitivnog kraja solarne ćelije, kroz otpornik do anode LED-a, i od katode LED-a nazad do negativnog kraja solarne ćelije. Tokom sunčanog dana solarna ćelija generiše 3.4 V. Radni napon LED-a je samo 2 V. Otpornik R1 konvertuje ulazni napon, tj. preuzima na sebe deo energije, pa time štiti LED od oštećenja.

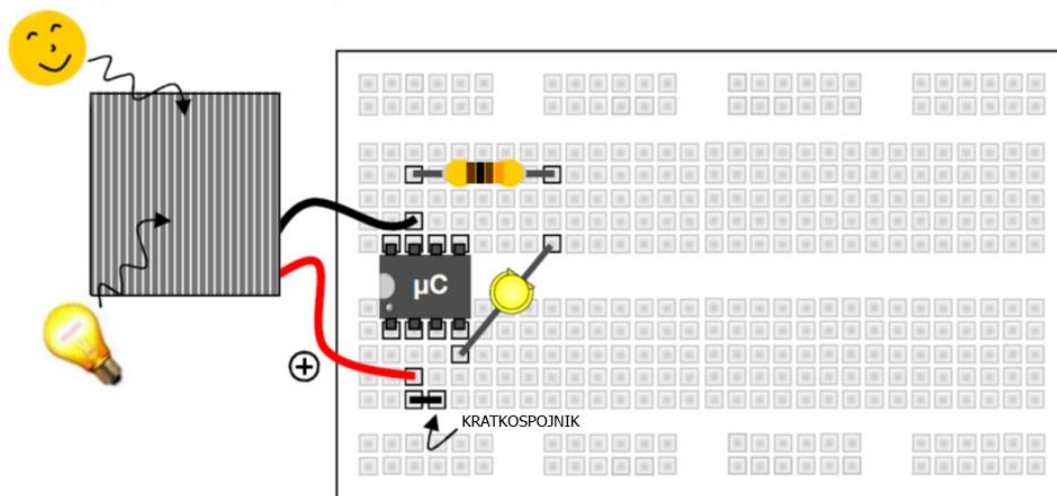


Slika 14: Električna šema solarno napajane LED

OCENA ZADATKA 1		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

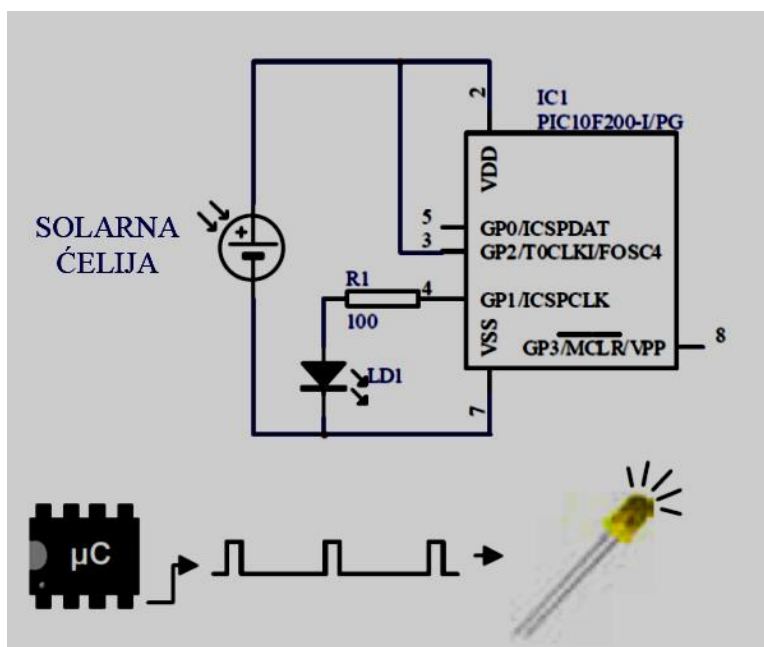
ZADATAK 2

Trepćuća solarno napajana LED. Povezati kolo prikazano na slici 15. Potrebni elementi: solarna ćelija, otpornik od $470\ \Omega$ (žuta, ljubičasta, braon, zlatna), žuta LED, mikrokontroler (μC) i džamper (kratkospojnik).



Slika 15: Način povezivanja trepćuće LED

Kako radi: Radni napon mikrokontrolera je 2-5 V. Ovaj napon se dobija iz solarne ćelije. Mikrokontroler je već programiran sa softverom koji naizmenično menja stanja na njegovom izlazu (iz uključeno u isključeno). Izlazni signal se dobija na pinu broj 4. Ukoliko imamo izlazni signal struja teče kroz otpornik i LED, čime uzrokuje da LED svetli.

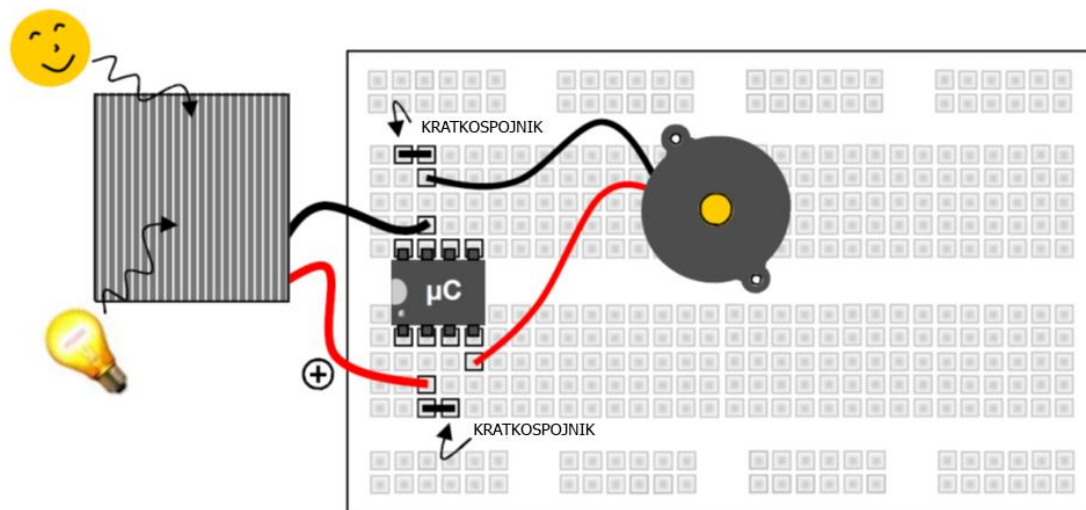


Slika 16: Električna šema trepćuće LED i oblik izlaznog signala mikrokontrolera

OCENA ZADATKA 2		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

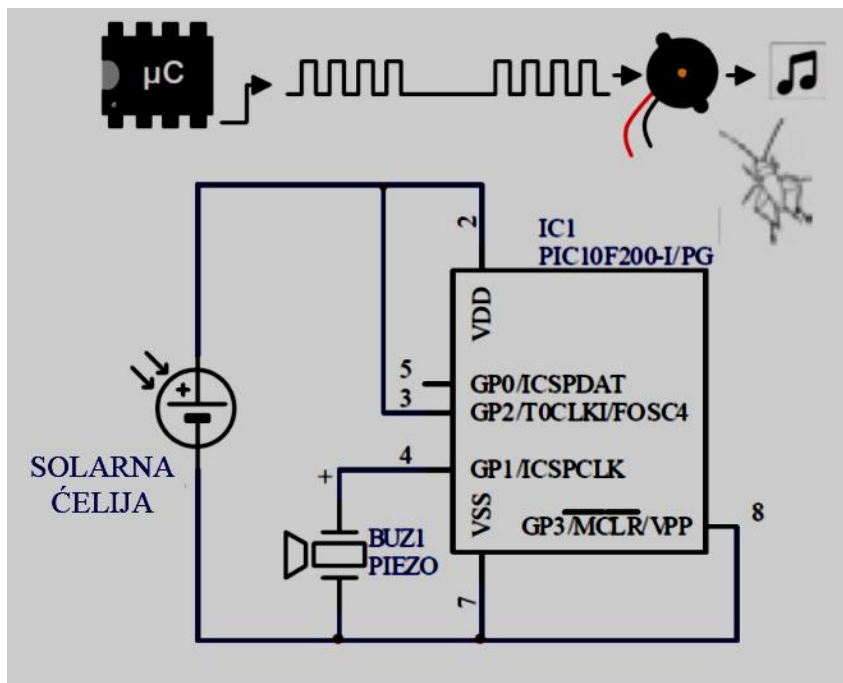
ZADATAK 3

Solarno napajani “cvrčak”. Povezati kolo prikazano na slici 17. Potrebni elementi: solarna ćelija, mikrokontroler (μC), *piezo* zvučnik i džamperi (kratkospojnici).



Slika 17: Način povezivanja solarnog “cvrčka”

Kako radi: Radni napon mikrokontrolera je 2-5 V. Ovaj napon se dobija iz solarne ćelije. Mikrokontroler je već programiran sa softverom koji ostvaruje realističan zvuk cvrčanja cvrčka. Izlazni signal cvrčanja je na pinu broj 4. Električni signal se pretvara u zvuk pomoću *piezo* zvučnika. **Zanimljiva primena:** ovaj uređaj se može koristiti kao alarm za buđenje, tako što će se oglašavati pri izlasku Sunca.

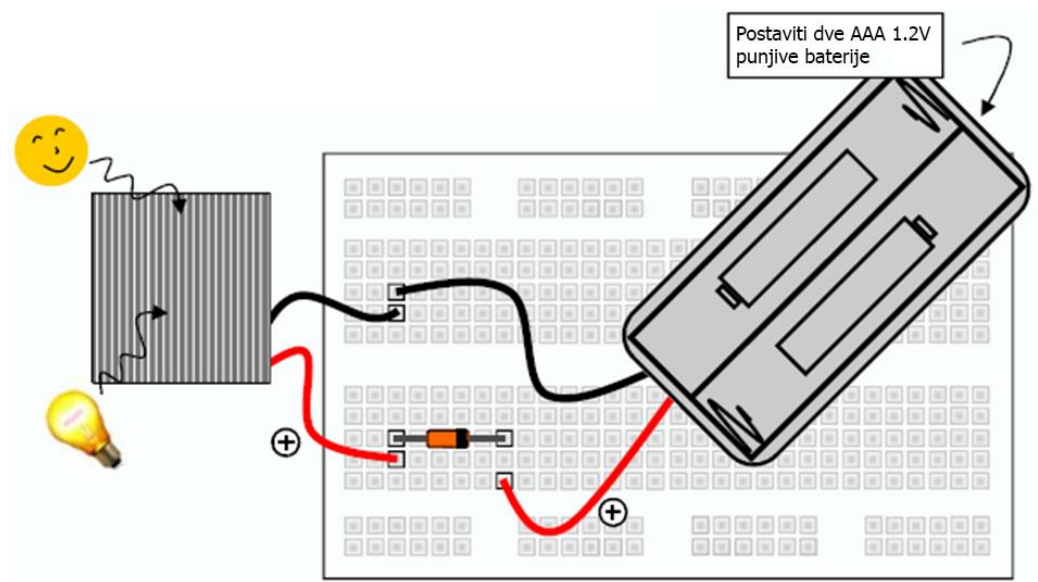


Слика 18: Električna šema “solarnog cvrčka” i oblik izlaznog signala mikrokontrolera

OCENA ZADATKA 3		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

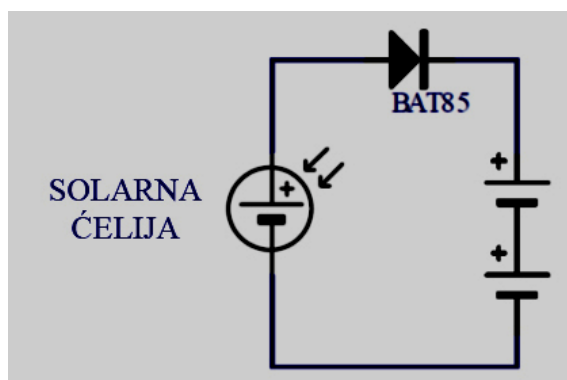
ZADATAK 4

Jednostavni solarni punjač baterija. Povezati kolo prikazano na slici 19. Potrebni elementi: solarna ćelija, dioda BAT85, kućište za dve AAA baterije, dve punjive AAA baterije od 1.2V.



Slika 19: Način povezivanja solarnog punjača baterija

Kako radi: Dokle god je solarna ćelija izložena svetlu, struja će teći od solarne ćelije preko diode, kroz baterije i nazad do solarne ćelije. Struja punjanja zavisi od količine svetlosti koja dospeva na solarnu ćeliju. Maksimalna struja koju može da generiše solarna ćelija je 30mA. Dioda sprečava pražnjenje baterija kroz solarnu ćeliju (npr. u toku noći), i dozvoljava proticanje struje samo u jednom smeru.

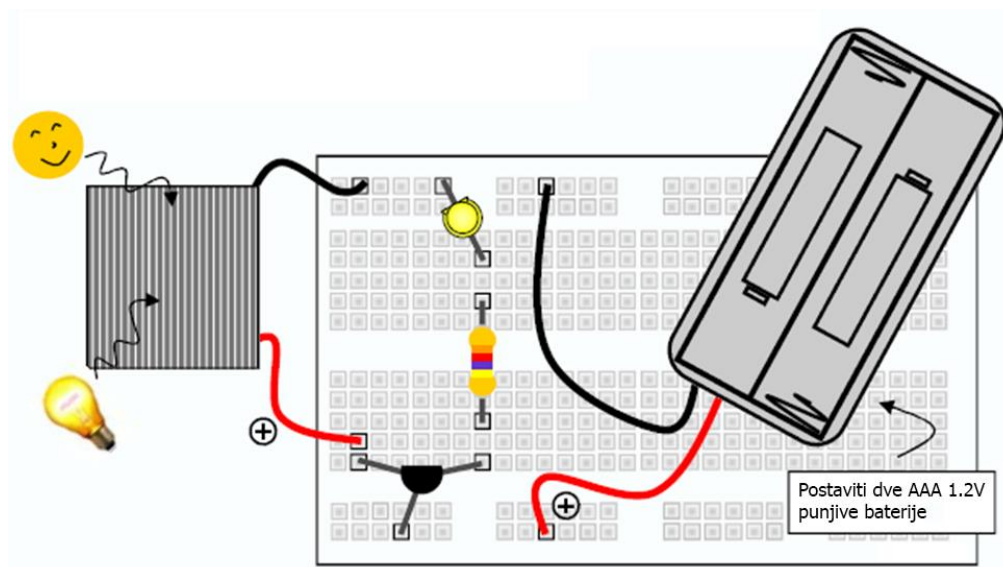


Slika 20: Električna šema solarnog punjača baterija

OCENA ZADATKA 4		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

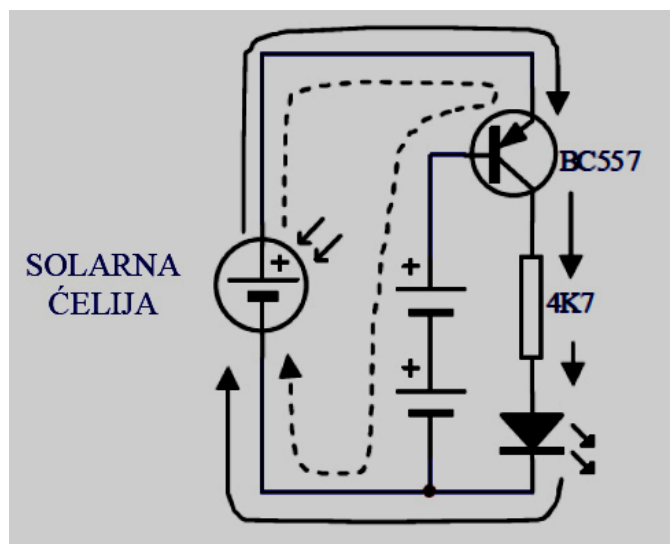
ZADATAK 5

Solarni punjač baterija sa indikacijom punjenja. LED svetli za vreme punjenja baterija. Povezati kolo prikazano na slici 21. Potrebni elementi: solarna ćelija, tranzistor BC557, otpornik od 4.7 k Ω (žuta, ljubičasta, crvena, zlatna), žuta LED, kućište za dve AAA baterije, dve punjive AAA baterije od 1.2 V.



Slika 21: Način povezivanja solarnog punjača baterija sa indikacijom

Kako radi: Kada Sunce sija, struja teče od pozitivnog kraja solarne ćelije kroz tranzistor (od emitera do baze), kroz baterije i nazad do solarne ćelije. To je bazna struja tranzistora koja je označena isprekidanom linijom. U našem primeru ova struja je takođe i struja punjenja baterija. Činjenica da struja teče između emitera i baze uzrokuje da je tranzistor uključen i potpuno provodan, kao da se radi o prekidaču. Dakle, struja teče i od solarne ćelije kroz tranzistor (od emitera do kolektora), kroz otpornik i LED i nazad do solarne ćelije. Ova struja uzrokuje da LED svetli, označena je punom linijom.

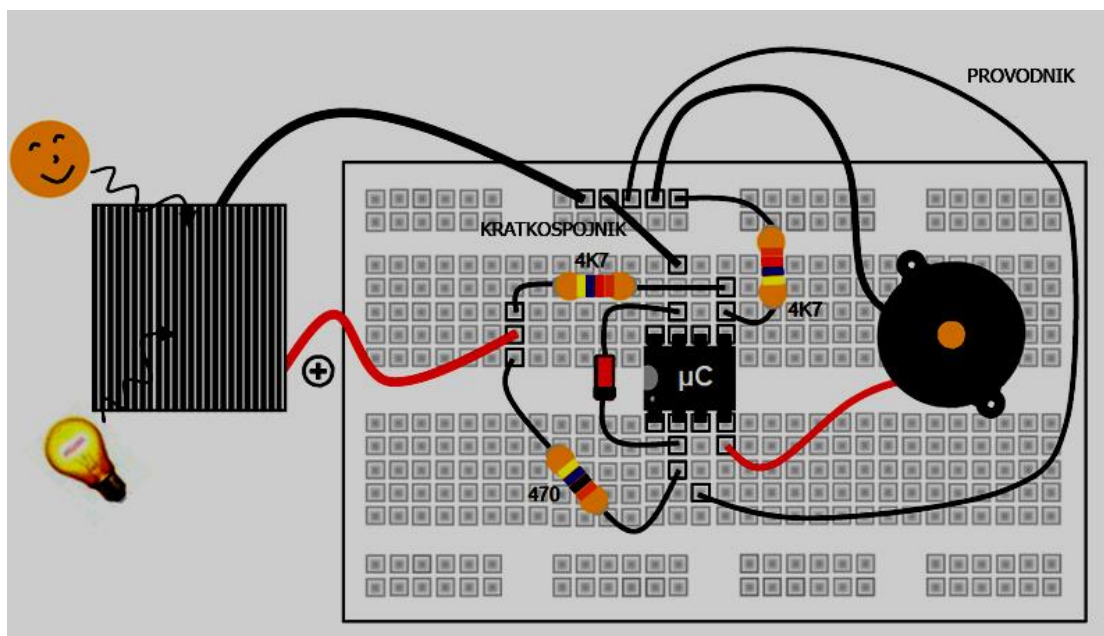


Slika 22: Električna šema solarnog punjača baterija sa indikacijom punjenja

OCENA ZADATAKA 5		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

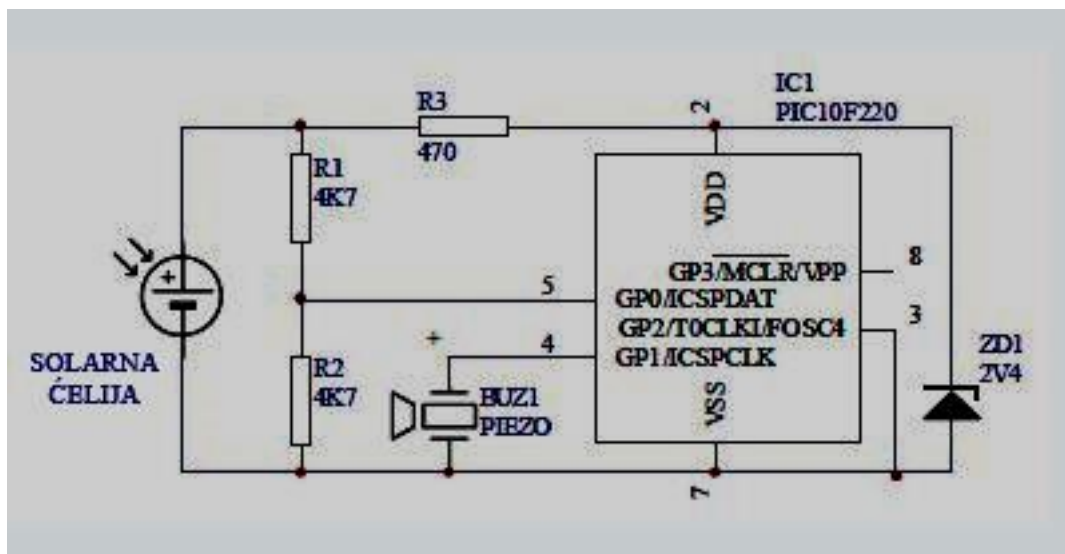
ZADATAK 6

Solarni muzički instrument, više svetlosti = viši tonovi. Povezati kolo prikazano na slici 23. Potrebni elementi: solarna ćelija, mikrokontroler (μC), dva otpornika od $4,7 \text{ k}\Omega$ (žuta, ljubičasta, crvena, zlatna), otpornik od 470Ω (žuta, ljubičasta, braon, zlatna), Zener dioda od 2.4 V , piezo zvučnik, džamperi (kratkospojnici) i komad žice.



Slika 23: Način povezivanja solarnog muzičkog instrumenta

Kako radi: Solarna ćelija obezbeđuje napajanje za mikrokontroler. Kada je mikrokontroler priključen na napon od 2 V, startuje njegov interni program. Zener dioda i otpornik od 470 Ω obezbeđuju da napajanje mikrokontrolera nikad ne bude veće od 2.4 V, čak i pri jakom Suncu. Preveliki napon može da uništi uređaj. Napon koji generiše solarna ćelija se takođe deli na pola pomoću dva jednaka otpornika od 4.7 k Ω . Polovinu napona solarne ćelije dovodimo na analogni ulaz mikrokontrolera. Čak i pri jakoj sunčevoj svetlosti ulazni napon ne može biti veći od $(4.5/2)$ V tj. od 2.25 V. Softver mikrokontrolera “meri” napon na ulazu i prevodi ga u karakterističnu audio frekvenciju (zvuk). *Piezo* zvučnik konvertuje signal u zvuk. Kada se promeni količina svetlosti koju prima solarna ćelija, takođe se menja i napon na ulazu mikrokontrolera. Softver će to detektovati i promeniti frekvenciju zvuka. Sa malo vežbe, možemo praviti melodiju pomeranjem ruku ili upotrebom baterijske lampe preko solarne ćelije uz približavanje i odaljavanje generisane svetlosti od ćelije.

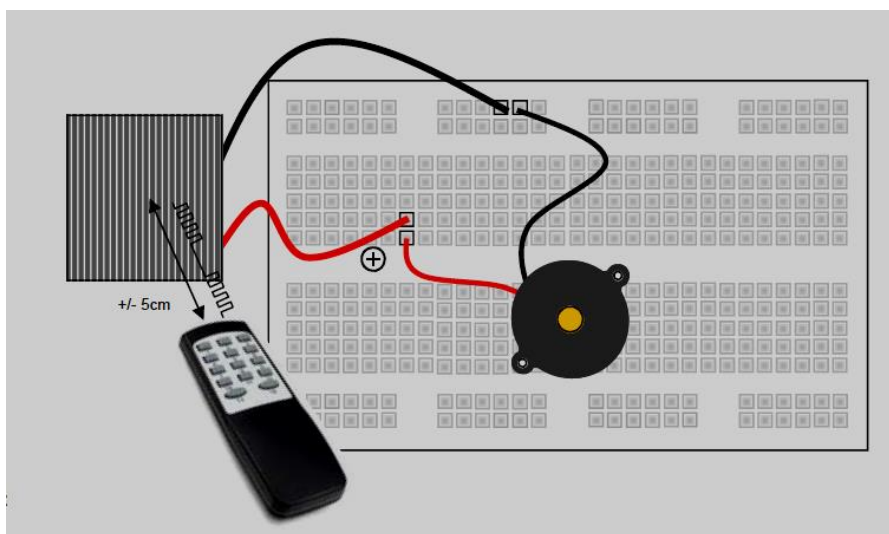


Slika 24: Električna šema solarnog muzičkog instrumenta

OCENA ZADATKA 6		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

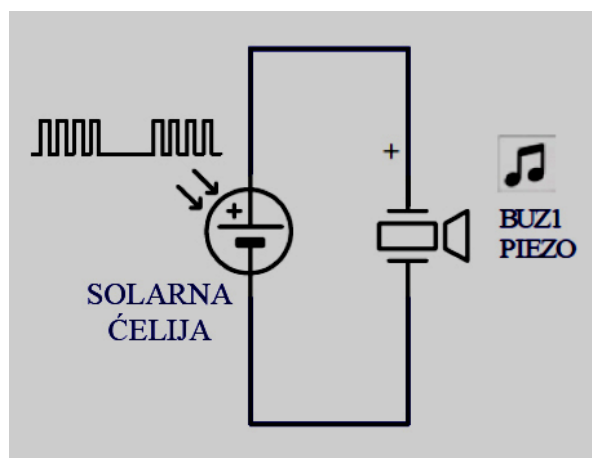
ZADATK 7

Ispitivač daljinskog IR upravljača. Povezati kolo prikazano na slici 25. Potrebni elementi: solarna ćelija, *piezo* zvučnik i daljinski IR upravljač.



Slika 25: Način povezivanja ispitivača daljinskog IR upravljača

Kako radi: Solarna ćelija je osetljiva na infracrveno svetlo. Kada uperimo infracrveno svetlo, solarna ćelija generiše napon, kao i u slučaju sunčeve svetlosti. Daljinski upravljač generiše zrak infracrvene svetlosti pri pritisku na bilo koje dugme. Taj zrak se uključuje i isključuje veoma brzo od strane interne elektronike daljinskog upravljača. Pritiskom na bilo koje dugme daljinskog upravljača generiše se različit oblik infracrvenog signala. Ovo omogućava prijemu da razlikuje svako dugme. U ovom kolu infracrveni signal se pretvara u zvučni signal pomoću *piezo* zvučnika. Za više zabave, možemo “poslušati” različite izvore svetlosti, kao što su LED, fluorescentne svetiljke itd.

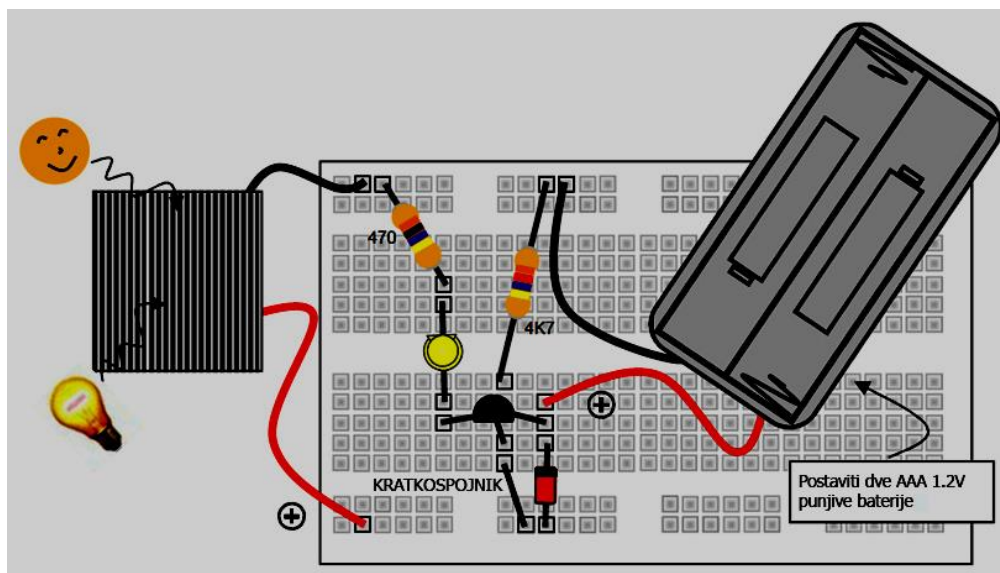


Slika 26: Električna šema ispitivača daljinskog IR upravljača

OCENA ZADATKA 7		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

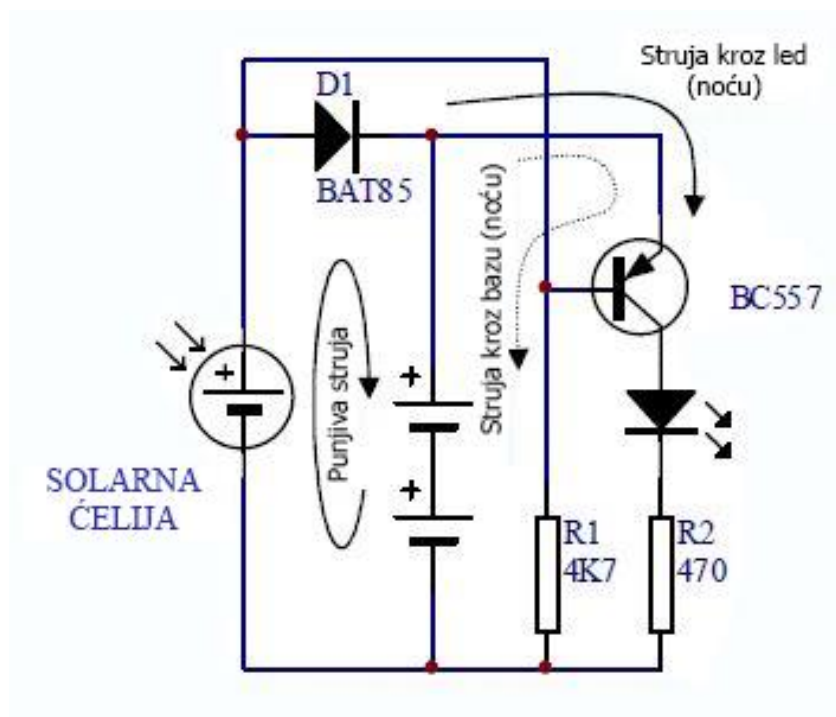
ZADATAK 8

Solarna baštenska lampa, LED se uključuje u suton i isključuje u zoru, potpuno automatski. Povezati kolo prikazano na slici 27. Potrebni elementi: solarna ćelija, tranzistor BC557, otpornik od 4.7 k Ω (žuta, ljubičasta, crvena, zlatna), otpornik od 470 Ω (žuta, ljubičasta, braon, zlatna), dioda BAT85, žuta LED, kućište za dve AAA baterije, dve punjive AAA baterije od 1.2 V i džamper (kratkospojnik).



Slika 27: Način povezivanja solarne baštenske lampe

Kako radi: Kada Sunce sija, napon koji generiše solarna ćelija će biti veći od napona baterije, pa će struja teći od solarne ćelije ka bateriji. Ova struja će puniti bateriju. Dioda BAT85 služi za prevenciju pražnjenja baterije kroz solarnu ćeliju pri uslovima slabog osvetljenja. Baza tranzistora je vezana na masu preko otpornika od 4.7 k Ω . Ovo izaziva da se tranzistor uključi i omogući struji da teče od baterije kroz tranzistor, LED i otpornik od 470 Ω i nazad do baterije. LED se uključuje. Međutim, treba napomenuti da je baza tranzistora takođe vezana za pozitivan kraj solarne ćelije. Dokle god Sunce sija, baza tranzistora je na dovoljno visokom potencijalu da spreči uključanje tranzistora, pa LED ostaje isključena tokom dana.

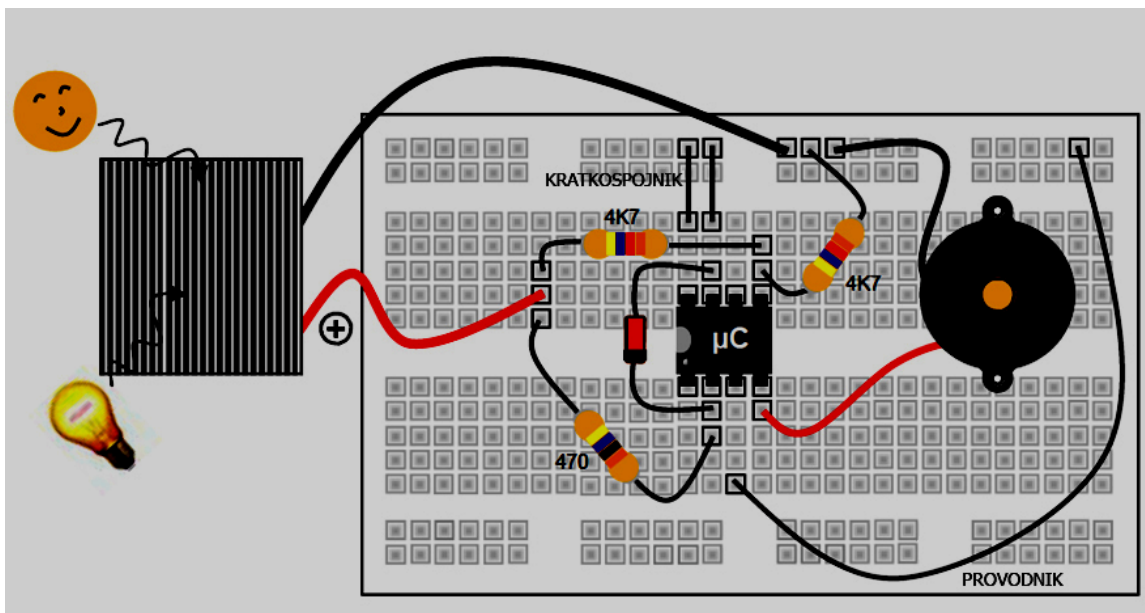


Slika 28: Električna šema solarne baštenske lampe

OCENA ZADATKA 8		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

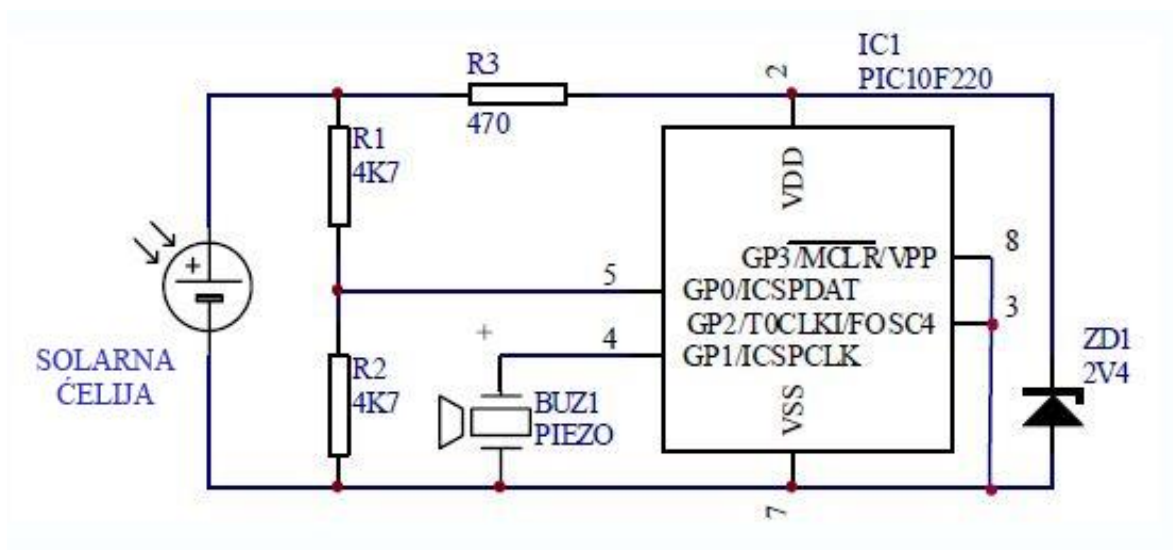
ZADATAK 9

Solarni detektor pokreta, najavljuje željene ili neželjene goste. Povezati kolo prikazano na slici 29. Potrebni elementi: solarna ćelija, mikrokontroler (μC), dva otpornika od $4.7 \text{ k}\Omega$ (žuta, ljubičasta, crvena, zlatna), otpornik od $470 \text{ }\Omega$ (žuta, ljubičasta, braon, zlatna), Zener dioda od 2.4 V , piezo zvučnik, džamperi (kratkospojnici) i komad žice.



Slika 29: Način povezivanja solarnog detektora pokreta

Kako radi: solarna ćelija predstavlja napajanje za mikrokontroler. Kada jednom mikrokontroler dobije napajanje od 2 V on startuje svoj interni program. Zener dioda i otpornik od 470 Ω obezbeđuju da napajanje mikrokontrolera ne bude veće od 2.4 V, čak i pri jakom Suncu. Preveliki napon može oštetiti komponentu. Napon solarne ćelije je takođe podeljen na pola pomoću otpornika od 4.7 k Ω i služi za napajanje analognog ulaza mikrokontrolera. Čak i pri jakom Suncu napon na ulazu mikrokontrolera nije veći od 4.5/2 V tj. od 2.25 V. Interni softver “meri” napon na ulazu i upoređuje ga sa prethodnom vrednošću. Kada on detektuje iznenadnu promenu (npr. kada je zrak prekinut ili nešto baca senku na solarnu ćeliju), generiše se signal na izlazu koji se pretvara u zvuk pomoću *piezo* zvučnika.

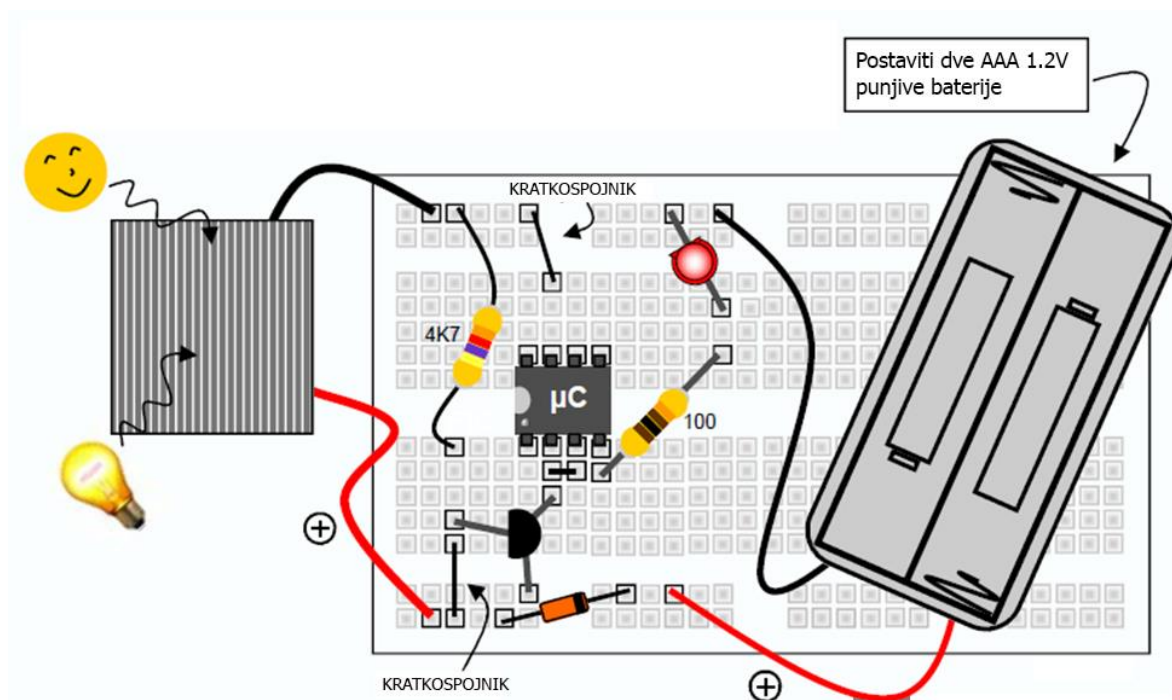


Slika 30: Električna šema solarnog detektora pokreta

OCENA ZADATKA 9		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 10

Solarno napajani LED alarm, puni se tokom dana, plaši provalnike tokom noći. Povezati kolo prikazano na slici 31. Potrebni elementi: solarna ćelija, mikrokontroler (μC), otpornika od $4.7\text{ k}\Omega$ (žuta, ljubičasta, crvena, zlatna), otpornik od $100\ \Omega$ (braon, crna, braon, zlatna), dioda BAT85, tranzistor BC557, kućište za dve AAA baterije, dve punjive AAA baterije od 1.2 V , džamperi (kratkospojnici) i crvena LED.



Slika 31: Način povezivanja solarno napajanog alarma

Kako radi: Kada Sunce sija, napon generisan na solarnoj ćeliji biće veći od napona na baterijama, pa će struja teći od solarne ćelije ka baterijama. Ova struja će puniti baterije. Dioda BAT85 služi za prevenciju pražnjenja baterije kroz solarnu ćeliju pri uslovima slabog osvetljenja. Baza tranzistora je vezana na masu preko otpornika od 4.7 k Ω . Ovo izaziva da se tranzistor uključi i snabde energijom mikrokontroler. Mikrokontroler će se ponašati identično kao u zadatku 2, dakle LED će blinkati. Međutim, treba napomenuti da je baza tranzistora takođe vezana za pozitivan kraj solarne ćelije. Dokle god Sunce sija, baza tranzistora je na dovoljno visokom potencijalu da spreči uključanje tranzistora, pa LED ostaje isključena tokom dana.

OCENA ZADATKA 10		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 11

Odgovorite na sledeća pitanja:

1. Šta se dešava ako se zamene plus i minus krajevi LED-a?

Odgovor:

2. Šta se dešava ako se u okviru zadatka 1, umesto otpornika od $470\ \Omega$ uvrsti otpornik od $4,7\ k\Omega$?

Odgovor:

3. Koliko je potrebno da se u potpunosti napune baterije, ako se punjenje vrši sa maksimalnom strujom ćelije?

Odgovor:

OCENA ZADATKA 11		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 6

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE

- ☐ **Kombinacija i integracija obnovljivih izvora energije**
- ☐ **Skladištenje vodonika**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Šesta vežba obrađuje sistem različitih obnovljivih izvora energije kroz jedan eksperiment koji se izvodi uz pomoć trenažera čiste energije.

Eksperiment 1 – Vodonik iz obnovljivih izvora energije: U ovom eksperimentu, studenti će kombinovati nekoliko obnovljivih izvora energije. U postupku eksperimenta, generator vodonika je napajan pomoću vetrogeneratora i solarnog panela. Generator vodonika potom snadbeva gorivnu ćeliju sa vodonikom, a zatim gorivna ćelija proizvodi električnu energiju.

Eksperiment 1 – Vodonik iz obnovljivih izvora energije

Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti implementiraju kombinaciju više obnovljivih izvora energije, izvrše proizvodnju vodonika i optimizaciju skladištenja vodonika, kao i da obezbede napajanje električnom energijom iz više izvora.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, generator vodonika, 1 vetrogenerator, 2 solarna panela, jednu gorivnu ćeliju, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, osnovu za postavljanje elemenata, potrošačku kuću, 4 skladišna kanistera napunjena sa destilovanom vodom do oznake od 5 cm³, 9 poveznih creva, 2 pričvršćivača creva, 5 crnih kablova i 5 crvenih kablova.

Šteta usled vode!

Voda na gorivnoj ćeliji može uništiti membranu. Stoga je potrebno puniti skladišne kanistere daleko od gorivne ćelije, držati gorivnu ćeliju suvom i nikada ne treba puniti vodom skladišne kanistere iznad nivoa označenog sa 5 cm³.

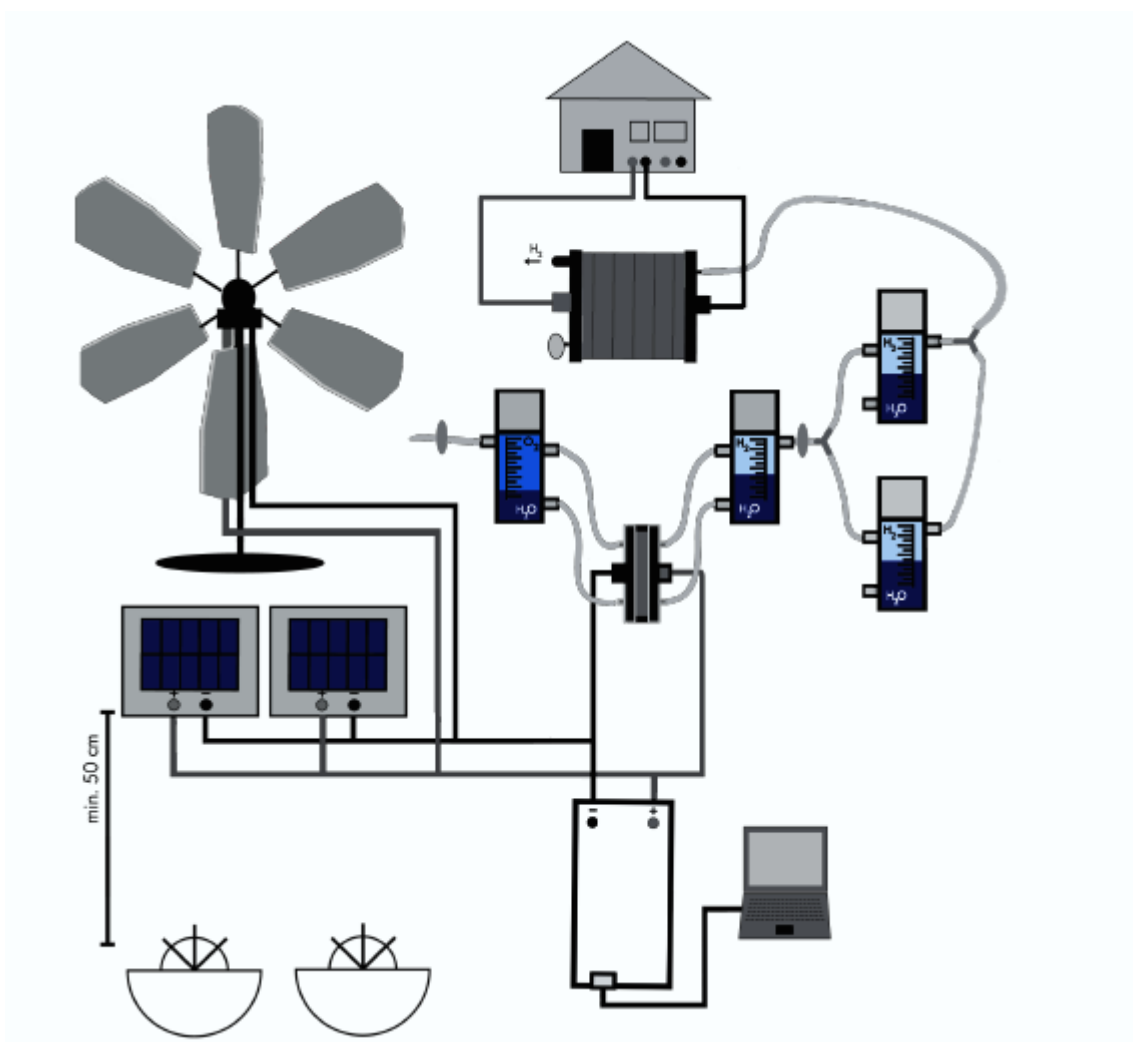
Šteta zbog kratkog spoja!

Izvori napona na gorivnoj ćeliji uništavaju membranu. Kada smo u režimu generator vodonika ("Hydrogen generator mode") energetska kontrolna tabla je naponski izvor koji može uništiti membranu. Generator vodonika, takođe, postaje naponski izvor, kada je u stanju mirovanja, zato što rezidualni (preostali) vodonik u generatoru vodonika može reagovati sa

kiseonikom. Stoga je gorivnu ćeliju potrebno povezivati kada je trenažer u režimu gorivne ćelije (“Fuel cell mode”) i nikada ne treba povezivati gorivnu ćeliju i generator vodonika za energetska kontrolnu tablu istovremeno.

Kakvu progresiju imaju krive karakteristika generatora vodonika?

Na slici 1 prikazana je postavka eksperimenta sa napajem generatora vodonika iz obnovljivih izvora energije (vetrogenerator i solarni FN (eng. PV) paneli), pri čemu je funkcija energetske kontrolne table samo kontrolna.



Slika 1: Postavka eksperimenta za rad gorivne ćelije i generatora vodonika sa obnovljivom energijom

Može li potrošač trajno da radi sa obnovljivim izvorima energije?

Uputstva za eksperiment:

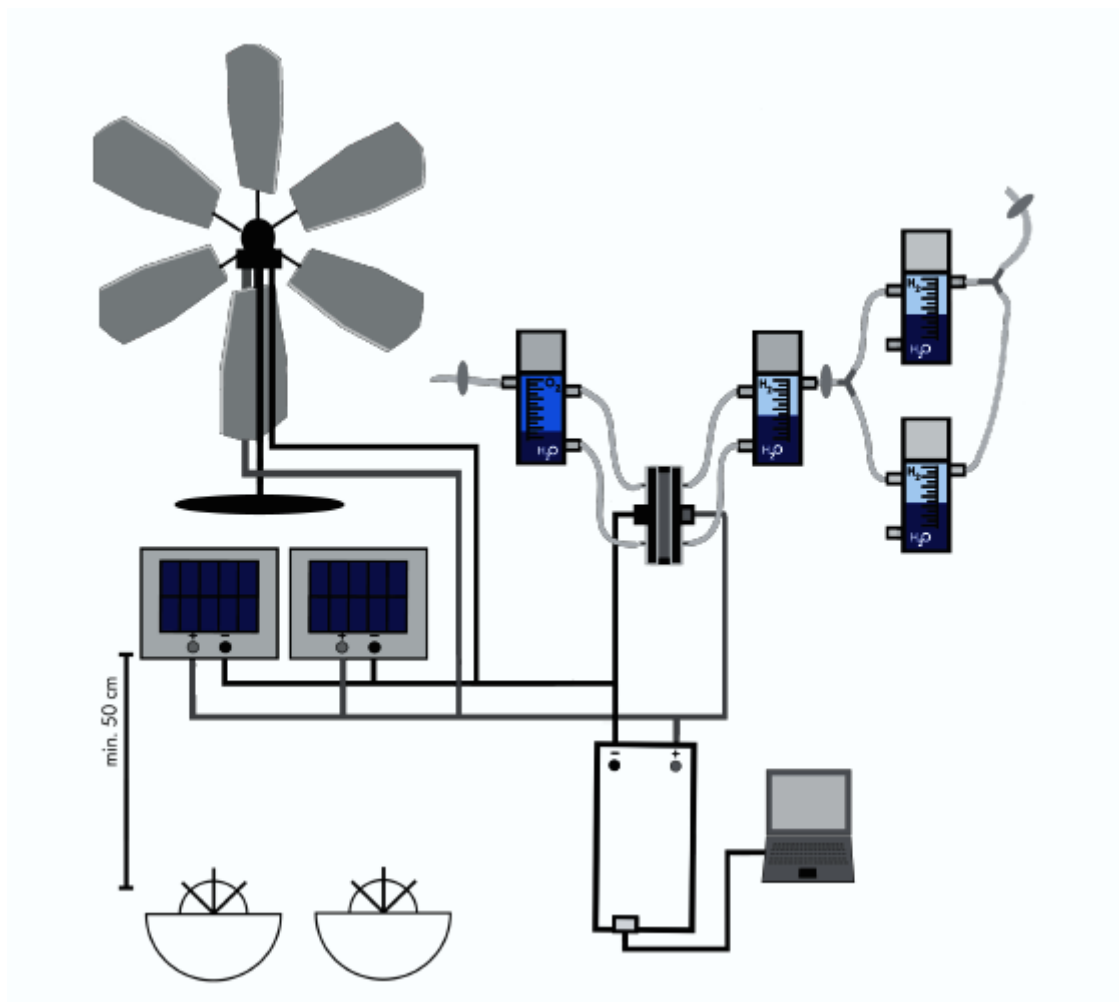
1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 1. Ukoliko to nije već urađeno, napuniti skladišne kanistere vodom do nivoa označenog sa 5 cm^3 .
2. Postaviti ventilator na 30 cm od vetrogeneratora tako da je pravac vetra u liniji sa osom rotora.
3. Postaviti rastojanje između lampe i solarnog panela na 50 cm.
4. Izabrati "Live module" u programu.
5. Uključiti lampu.
6. Ručno varirati upadni ugao svetlosti sa lampe na solarni panel sve dok se ne postigne maksimalni napon otvorenog kola na grafiku.

Rezultati merenja će se promeniti ako se promeni rastojanje između lampe i solarnog panela. Zbog toga je potrebno da baza lampe uvek bude u istom položaju.

7. Podesiti ugao iradijacije na 90° .
8. Uključiti lampe i ventilator.
9. 3 min posmatrati potrošača.
10. Simulirati različite vremenske uslove, po 3 min za svaki. Posmatrati potrošača i tabelarno zabeležiti zapažanja. Različiti vremenski uslovi se mogu simulirati na sledeći način:
Sunčano = lampu direktno obasjava solarnu ćeliju;
Oblačno = postaviti ambalažnu foliju između lampe i solarne ćelije;
Vetrovito = ventilator postaviti na nivo 3;
Mirno = isključiti ventilator.

Koji izvor energije generiše najviše vodonika?

Na slici 2 prikazana je postavka eksperimenta za određivanje proizvedene količine vodonika sa napajanjem generatora vodonika iz vetrogeneratora i solarnog FN panela, pri čemu energetska kontrolna tabla ima samo kontrolnu ulogu.



Slika 2: Postavka eksperimenta za proizvodnju vodonika sa napajenjem iz obnovljivih izvora energije

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 2, ali se u početku solarni panel ne povezuje sa energetsom kontrolnom tablom: ukoliko to nije već urađeno, napuniti skladišne kanistere vodom do nivoa označenog sa 5 cm³.
2. Proceniti koji će energetska izvor proizvesti najviše vodonika za 3 min.
3. Uključiti ventilator.
4. Proizvoditi vodonik 3 min koristeći vetrogenerator.
5. Isključiti ventilator.
6. Uneti proizvedenu količinu vodonika u tabelu na radnom listu.
7. Isključiti vetrogenerator sa energetske kontrolne table.
8. Povezati solarni panel na energetska kontrolnu tablu.

9. Uključiti lampu.
10. Proizvoditi vodonik 3 min koristeći solarni panel.
11. Isključiti lampu.
12. Uneti proizvedenu količinu vodonika u tabelu na radnom listu.

ZADACI za eksperiment 1 (radni list 1)

Opšta pitanja/inicijalni test

13. Koliko energije sa Sunca stiže na površinu Zemlje?
14. Za šta se može koristiti vodonik iz viška energije (snage)?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

15. Može li potrošač trajno da radi sa obnovljivim izvorima energije?

Osvetljenost potrošača	Sunčano	Oblačno	Noć
Vetrovito			
Mirno			

16. Koji energetski izvor proizvodi najviše vodonika?

Procena:

Merenja:

Solarni panel		Vetrogenerator	
Vreme [min]	Nivo H ₂ [ml]	Nivo H ₂ [ml]	Vreme [min]
3			
6			
9			
12			

--

OCENA

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

17. Zašto solarni paneli proizvode manje vodonika nego vetrogeneratori, iako teoretski treba da obezbede istu snagu?

18. Da li potrošač može trajno da radi sa obnovljivim izvorima energije?

19. Kakve dodatne prednosti ima korišćenje gorivnih ćelija u svemiru (uređaji i sistemi za putovanje kroz svemir)?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 7

BIODIZEL

- ☐ **Biomasa**
- ☐ **Biogoriva**
- ☐ **Biodizel**
- ☐ **Oprema za proizvodnju biodizela DL BIO – 10**
- ☐ **Proizvodnja biodizela**
- ☐ **Praktičan primer**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Cilj sedme vežbe je da se studenti upoznaju sa pojmovima biomasa i biogoriva i da uz pomoć laboratorijske postavke proizvedu biodizel.

1. Biomasa

Termin biomasa odnosi se na sve materijale biološkog porekla koji se mogu upotrebiti kao primarni izvor energije. Tu ne spadaju materijali koji su se promenili raznim geološkim procesima, na primer nafta i ugalj.

Biomasa se može podeliti na:

Biomasu u izvornom obliku (sirovu biomasu) koju čine:

1. Kopnena (trave, drveća, energetske zasadi, obradivi usevi),
2. Vodena (alge, vodene biljke).

Ostatke (otpadnu biomasu):

1. Komunalni otpad (komunalni čvrsti otpad, mulj i organske materije dobijene tretmanom otpadnog mulja),
2. Poljoprivredni čvrsti otpad (poljoprivredni biljni ostaci, stočni otpad i đubrivo),
3. Šumski ostaci (kora, lišće, ostaci nakon seče stabala),
4. Industrijski otpad (drvni otpad, piljevina, otpadno ulje).

Biomasa se može koristiti za dobijanje električne i toplotne energije ili za dobijanje tečnih i gasovitih goriva (biogoriva) koja se koriste u vozilima, domaćinstvima ili u postrojenjima različitih namena.

2. Biogoriva

Pod pojmom biogorivo podrazumevaju se goriva koja ili sama spadaju u biomasu ili su nastala preradom biomase, te kao takva, za razliku od fosilnih goriva, spadaju u obnovljive izvore energije. U biogoriva se ubrajaju i goriva koja su nusprodukt drugih procesa, i koja bi inače bila otpad. Nusproizvodi koji nastaju prilikom proizvodnje biogoriva su takođe veoma

značajni za krajnju ekonomičnost biogoriva i značajno utiču na ekonomiju zemlje jer se smanjuje potreba uvoza proizvoda koji se dobijaju pri proizvodnji biogoriva.

Biogoriva, biodizel i bioetanol su tečna goriva, proizvedena iz poljoprivrednih kultura, kao obnovljivih resursa. Kod nas je više zastupljen biodizel. Biodizel se dobija iz biljnih ulja (soje, uljane repice, suncokreta, palme), kao i iz otpadnih ulja i masti, procesom transesterifikacije, uz prisustvo katalizatora. Po hemijskom sastavu je mešavina metil estara masnih kiselina. Ovo gorivo jeste obnovljivi izvor energije jer se troši istom brzinom kojom se obnavlja. Gorivo je delom nižeg energetskog sadržaja, ali sadrži veći procenat kiseonika što pomaže boljem sagorevanju. U potpunosti može da zameni fosilno gorivo u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem.

3. Biodizel

Biodizel je prvi od alternativnih goriva koje je postalo poznato široj javnosti te je najraširenije biogorivo u Evropi.

Primena biodizela, u poređenju sa fosilnim dizelom, obezbeđuje u smislu zaštite životne sredine smanjenje efekta staklene bašte, kao i redukovanu emisiju sumpornih oksida, suspendovanih čestica i ugljenmonoksida. Kvantifikacija ovih efekata na životnu sredinu vrši se popularnim pristupom „Well-to-Wheel“ (WTW), gde se vrši merenje neto emisije tokom celokupnog lanca proizvodnje-potrošnje. Biodizel veoma čisto sagoreva i podseća na standardni dizel. Može se koristiti nezavisno ili u mešavini sa dizelom dobijenim rafinacijom sirove nafte i to u bilo kom odnosu. U zavisnosti od udela bio-goriva u mešavini, biodizeli se nazivaju B100 (čist, 100% biodizel), B5 (5% biodizel i 95% fosilni dizel), B20 (20% biodizel i 80% fosilni dizel), itd. Konvencionalni dizel motori bez teškoća koriste gorivo sa 20 odsto biodizela, a mnogi novi motori već mogu da koriste i čist biodizel. Biogoriva ne zahtevaju proizvodnju novog automobila odnosno novog automobilskog motora.

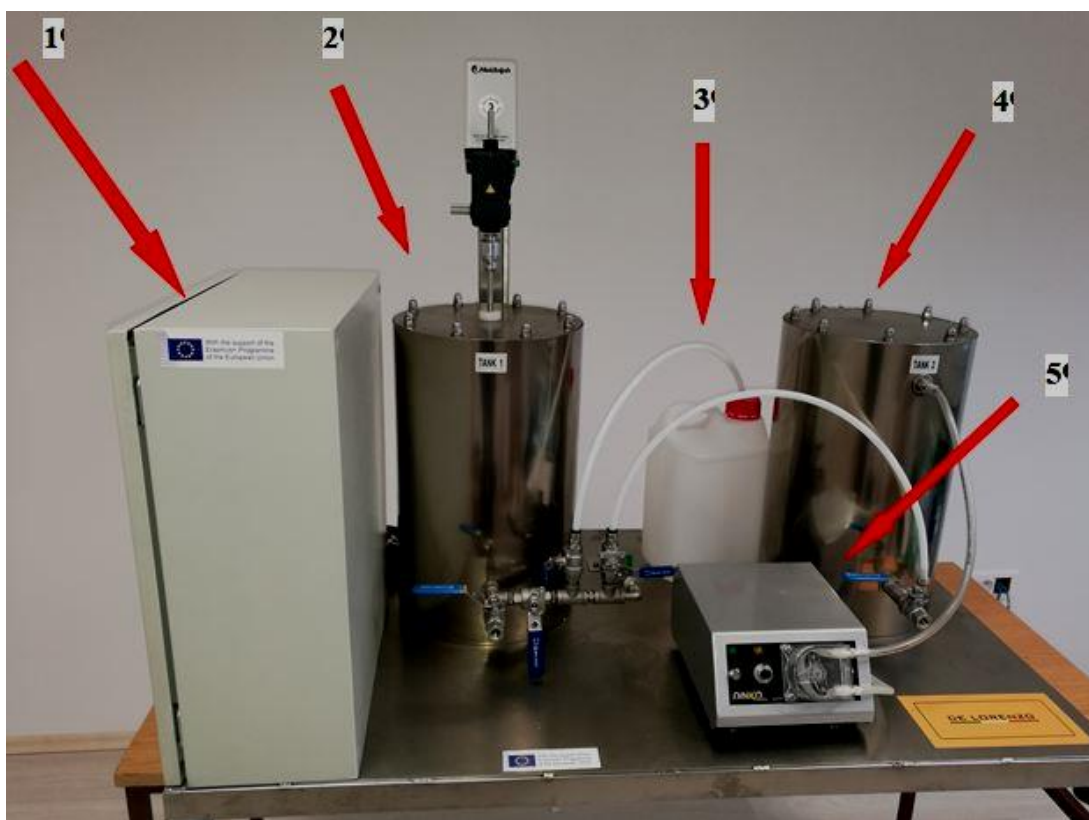
4. Oprema za proizvodnju biodizela DL BIO – 10

Oprema za proizvodnju biodizela učvršćena je na podlogu dimenzija 40x40x2cm.

Oprema se sastoji iz: komandne table, predtretmanskog rezervoara (tanka), plastičnog rezervoara za alkohol, reaktora i pumpe.

Ulje koje treba da se tretira odnosno koristi za proizvodnju biodizela je skladišteno u „tank 1“ (predtretmanski tank) čije su dimenzije 270 mm prečnika i 440 mm visine, oblika valjka izrađenog od nerđajućeg čelika. Kapacitet tanka je nešto veći, ali je predviđen za 10l. Plastična posuda za dopremu metoksida je kapaciteta 5l.

Dobijanje biodizela sprovodi se transesterifikacijom (alkoholizom) svežih i otpadnih biljnih jestivih ulja metanolom. Step en iskorišćenja pri proizvodnji biodizela iz otpadnih i svežih ulja iznad je 80% i zavisi od vrste ulja. Gustina, viskoznost i tačka smrzavanja svih uzoraka biodizela zavise od vrste ulja od kojih se dobija biodizel. Na slici 1 je predstavljena fotografija laboratorijske opreme za proizvodnju biodizela.



Slika 1: Laboratorijska oprema za proizvodnju biodizela

Komponente laboratorijske postavke su:

1. Komandna tabla
2. Predtretmanski rezervoar
3. Rezervoar alkohola
4. Reaktor
5. Pumpa

Komandna tabla koja je prikazana na slici 2 sadrži sve komponente neophodne za aktiviranje i funkcionisanje postavke za proizvodnju biodizela, kao i zaštitne elemente za bezbedno rukovanje ovim sistemom. Komandna tabla sadrži glavni prekidač koji stavlja ili isključuje celo postrojenje biodizela pod napon. Kada se biodizel postrojenje ne koristi glavni prekidač mora biti u poziciji „Off“. U slučaju vanrednog (havarijskog) stanja koristi se crveno dugme „Emergencia“. Prekidači „Resistance 1“, „Stirrer“, „Resistance 2“ i „Pump“ se koriste za aktivaciju sledećih elemenata respektivno: grejač u predtretmanskom rezervoaru, mešalica u predtretmanskom rezervoaru, grejač u reaktoru i pumpa. Na komandnoj tabli se nalaze i dva temperaturna kontrolera koji preko PID kontrolera omogućavaju/onemogućavaju rad grejača na određenoj kontrolisanoj temperaturi.



Slika 2: Komandna tabla laboratorijske opreme za proizvodnju biodizela

Predtretmanski rezervoar, kapaciteta oko 10l izrađen od nerđajućeg čelika, sadrži mešalicu, grejač snage 1500 W i temperaturni senzor sa digitalnim kontrolerom.

Rezervoar alkohola je izrađen od plastike i kapaciteta je 5l.

Reaktor, kapaciteta oko 10l izrađen od nerđajućeg čelika, sadrži grejač snage 1500 W i temperaturni senzor sa digitalnim kontrolerom.

Peristaltička pumpa sa podesivim protokom koji pomoću sistema ventila efikasno prenosi otpadno ulje iz predtretmanskog rezervoara u reaktor dozirajući pri tome količinu alkohola i obezbeđujući recirkulaciju (cirkulacija u oba smera). Peristaltičke pumpe, poznate i kao crevne pumpe, odlične su za transport širokog spektra fluida kada se zahteva efikasnost i velika

preciznost doziranja. Podjednako su efikasne sa viskoznim i abrazivnim medijima, kao i sa fluidima koji su osetljivi na deformacije. U suštini, peristaltička pumpa je vrsta pozitivno potisne zapreminske pumpe. Jednostavna konstrukcija pruža joj brojne prednosti u odnosu na druge tipove pumpi.

Pre priključenja na jednofaznu utičnicu sa uzemljenjem treba proveriti da li su svi prekidači i ventili na poziciji „Off“. Pre puštanja u rad treba proveriti da li postoji curenje u cevima.

5. Proizvodnja biodizela

Proces proizvodnje biodizela je hemijski proces. Hemijski proces se ogleda u reakciji ulja (biljnog ili životinjskog porekla) sa alkoholom (metanol ili etanol) i dobija se biodizel i glicerol. Ovakav vid hemijske reakcije naziva se transesterifikacija. Biodizel se može dobijati od sledećih ulja: sojino ulje, ulje uljane repice, goveđi loj, svinjska mast, orahovo ulje i ulje avokada. Otpadna ulja se prethodno moraju prečistiti (filtrirati) od ostataka hrane.

Katalizatori koji se koriste pri proizvodnji biodizela su: natrijum hidroksid i kalijum hidroksid. Karakteristike dobijenog biodizela se ogledaju u toploti sagorevanja, viskoznosti, gustini i tački očvršćavanja.

Eksperiment - Sintaza biodizela iz nekorišćenog i korišćenog suncokretovog ulja koristeći metanol i natrijum hidroksid

Uputstva za eksperiment:

1. Sipati 5l suncokretovog ulja u predtretmanskog rezervoar.
2. Podesiti temperaturu predtretmanskog rezervoara na 70 - 90°C i pokrenuti proces mešanja kako bi se izvršila dehidracija. Održavati istu temperaturu dok mehurići ne nestanu. Temperatura ne sme prelaziti 90°C da se ne dobije biodizel slabijeg kvaliteta.
3. Pripremiti 160 ml metanola po litri ulja i 3,5 g NaOH (98 %) po litri ulja. Ovi reagensi su vrlo toksični i sa njima treba postupati oprezno.
4. Upotrebiti peristaltičku pumpu, premeštajući vrelo ulje iz predtretmanskog rezervoara u reaktor i održavajući temperaturu na 50 - 55°C.

5. Dodati 75 % metanola kroz peristaltičku pumpu.
6. Pokrenuti recirkulaciju u reaktoru u trajanju od 1.5 h.
7. Ostaviti da odstoji dok se ne istaloži glicerol i ekstrahuje.
8. Dodati još 25 % metanola kroz peristaltičku pumpu.
9. Nastaviti recirkulaciju u reaktoru još 1.5 h.
10. Ostaviti da odstoji dok se ne istaloži glicerol i ekstrahuje.
11. Nakon ovih procesa biodizel može biti ispran destilovanom vodom, pažljivo mešajući i ostaviti da odstoji 12-24 h. Ukloniti vodu.
12. Ponoviti proces 2 – 3 puta dok voda kojom se ispira biodizel ne bude pH neutralna.

ZADACI

Zadatak 1

Odgovorite na pitanja:

1. Koji su načini prikupljanja otpadnih jestivih ulja?
2. Na koje sve načine se može koristiti biodizel?
3. Koje su prednosti korišćenja biodizela?
4. Koje su mane korišćenja biodizela?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Zadatak 2

Ispitati toplotu sagorevanja dobijenog biodizela. Ova vrednost je određena prenosom toplote koja se oslobađa sagorevanjem na izabranu količinu vode u epruveti.

Uputstvo:

Zapaliti u kašici 0.5 cm^3 dobijenog biodizela i dodati 0.2 cm^3 etanola kako bi se započelo sagorevanje, zbog niske zapaljivosti dizel goriva, te zagrevati iznad epruvetu sa 30 cm^3 destilovane vode. Popuniti tabelu:

Tip biodizela	Početna temp. vode	Krajnja temp. vode	Temperaturna razlika	Količina vode	Preneta toplota	Količina goriva	Gorivna toplota/gram

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Zadatak 3

Ispitati viskoznost dobijenog goriva.

Uputstvo:

1. Postaviti epruvetu ispod pipete od 1 ml.
2. Napuniti pipetu dobijenim biodizelom.
3. Izmeriti vreme da se pipeta isprazni.
4. Ponoviti merenja 3 puta i izračunati srednju vrednost.

Kalibrisati aparaturu koristeći 3 supstance poznate viskoznosti (heksan, dietilen glikom i maslinovo ulje).

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Zadatak 4

Izmeriti zagađenje preko čađi koja se dobija prilikom sagorevanja.

Uputstvo:

1. Zapaliti 0.3 cm^3 biodizela.
2. Ukloniti svu čađ dobijenu nakon sagorevanja uz pomoć prethodno izmerene papirne salvete.
3. Ponovo izmeriti salvetu sa čađi i izračunati težinu čađi.

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

LITERATURA

1. Vladica Mijailović: “Distribuirani izvori energije – princip rada i eksploatacioni aspekti”, Akademska misao, 2011.
2. Dragan M. Knežević: “Istraživanje procesa sagorevanja i izduvne emisije dizel motora pri pogonu biogorivima”, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2014.
3. Vladan Joksimović, Milan Stevanović, Zoran Marjanović: “Biogoriva- prednosti i nedostaci upotrebe”, 3. Konferencija o kvalitetu života, Kragujevac, 2008.
4. Slavko Tomović, “Alternativni izvori energije”, Tehnička knjiga, Beograd, 2002.
5. Momir Đurović, “Alternativni izvori energije i budućnost njihove primene u zemlji”, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Podgorica, 2002.
6. Gilbert M. Masters: “Renewable and Efficient Electric Power Systems”, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2013.
7. Clean Energy Trainer, Experiment Guide, Heliocentris.
8. Šefket Hećo: “Mogućnost korišćenja biomase na teritoriji Novog Pazara”, Master rad, Fakultet tehničkih nauka, Čačak.
9. Milenko B. Đurić, Aleksandar R. Čukarić, Željko Đurišić: “Elektrane”, Beopres, Beograd, 2004.
10. Božo Ilić, Živoslav Adamović, Zoran Kenjić, Rodoljub Blaženović: “Obnovljivi izvori energije i energetska efikasnost”, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.
11. Josip Baras, Slobodan Gaćeša, Dušanka Pejcin, “Etanol je strateška sirovina”, Hemijska industrija, vol. 56, br.3, str. 89-104, 2002.
12. Slobodan Alaković, Aleksandra Grujić, Ivana Vlajić-Naumovska, Milan Mijalković, “Gorivne ćelije, čista energija budućnosti”, Ecologica 2009, Vol 16, No. 54, str. 128-134, ISSN 0354 – 3285.