



PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE Z UPORABO BIODIVERZITETE

Interdisciplinarno področje: fizika in biologija
Raziskovalna naloga

Avtorja: Lucija DOLŽAN
Matej ZUPAN

Mentor: Jure AUSEC, univ. dipl. fiz.

Strahinj, 2020

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujema mentorju, profesorju Juretu Auscu, ki nama je pomagal pri izdelavi raziskovalne naloge in eksperimentih ter nama dajal koristne nasvete. Vodil naju je skozi labirint podatkov in eksperimentov ter naju uspešno pripeljal do končnega izdelka.

Zahvaljujema se tudi profesorici Sandri Žvagen, ki je jezikovno pregledala povzetek v angleščini, in dr. Nini Modrijan, ki je opravila jezikovni pregled.

Posebno zahvalo izrekava tudi laborantkama, Ivani Grošelji in Maši Škrlep, ki sta nama pomagali pri delu v laboratoriju.

Vsem še enkrat iskrena hvala.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETIČNE PREDPOSTAVKE	2
2.1	MIKROBNA GORIVNA CELICA.....	2
2.2	GLIVE KVASOVKE.....	2
2.3	METILENSKO MODRILO.....	4
2.4	PREGLED LITERATURE.....	5
2.4.1	Mikrobna gorivna celica s kvasovkami.....	5
2.4.2	Mikrobna gorivna celica z blatom.....	6
3	EMPIRIČNI DEL	7
3.1	CILJI.....	7
3.2	HIPOTEZE.....	7
3.3	RAZISKOVALNA VPRAŠANJA.....	7
3.4	IZBIRA BIOKULTURE.....	8
3.5	IZBIRA OSTALIH KOMPONENT IN PARAMETROV.....	11
3.6	IZVEDBA POSKUSA Z OPTIMALNIMI PARAMETRI.....	20
3.7	POGON RAZLIČNIH ELEKTRONSKIH KOMPONENT.....	21
3.8	FINANČNI IZRAČUN.....	26
3.8.1	Izračun cene kilovatne ure za baterijo.....	27
3.8.2	Izračun pridobljene električne energije iz ene gorivne celice.....	27
3.8.3	Izračun pridobljene električne energije za osem gorivnih celic.....	28
4	ZAKLJUČEK	29
5	VIRI IN LITERATURA	30

KAZALO SLIK

Slika 1: Shema mikrobne gorivne celice	2
Slika 2: V vsakdanjem življenju najpogosteje najdemo kvasovke v obliki kvasa.....	3
Slika 3: Redukcija metilenskega modrila	4
Slika 4: Prikaz poskusa s kvasovkami	5
Slika 5: Shema poskusa z blatom.....	6
Slika 6: Priprava vzorca z metilenskim modrilom	8
Slika 7: Nanos vzorca na petrijevko.....	8
Slika 8: Štetje kolonij	9
Slika 9: Kolonije kvasovk po inkubaciji.....	9
Slika 10: Elektrokemijska napetostna vrsta.....	11
Slika 11: Voda, nasičena s soljo iz solnega mostu (levo), in čista voda (desno)	21
Slika 12: Svetenje LED.....	22
Slika 13: Shema vezave gorivnih celic in LED	22
Slika 14: Vezava več gorivnih celic z dodanimi cevkami za pretok vode.....	23
Slika 15: Shema vezave gorivnih celic, kondenzatorjev in stenske ure.....	23
Slika 16: Gorivna celica	24
<i>Slika 17: Kondenzator</i>	<i>24</i>
<i>Slika 18: Stenska ura.....</i>	<i>24</i>
Slika 19: Sprememba napetosti na kondenzatorju, izmerjena z osciloskopom	25

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Vpliv masne koncentracije solne raztopine v mostu na električno napetost in tok	12
Graf 2: Vpliv dolžine solnega mostu na električno napetost in tok	13
Graf 3: Vpliv velikosti elektrod (anode in katode) na električno napetost in tok	14
<i>Graf 4: Vpliv količine kvasa na električno napetost in tok.....</i>	<i>15</i>
Graf 5: Vpliv preseka mostu na električno napetost in tok	16
Graf 6: Vpliv količine metilenskega modrila na električno napetost in tok	17
Graf 7: Vpliv soli v čaši z vodo na električno napetost in tok s časom.....	18
Graf 8: Sprememba električnega toka s časom pri različnih solnih mostovih	19
Graf 9: Sprememba električne napetosti in toka v odvisnosti od časa	20
Graf 10: Sprememba napetosti na kondenzatorju v odvisnosti od časa	25

KAZALO TABEL

Tabela 1: Rezultati petrijevok brez primesi	9
Tabela 2: Rezultati petrijevok s primesmi kuhinjske soli	9
Tabela 3: Rezultati petrijevok s primesmi kalijevega klorida	10
Tabela 4: Rezultati petrijevok s primesmi metilenskega modrila	10
Tabela 5: Začetni stroški	26
Tabela 6: Stroški poganjanja celic za 45 minut	26

Povzetek

V literaturi najdemo številne zapise o možnosti izkoriščanja biokultur za pridobivanje električne energije. Med mnogimi opisi poskusov, ki sva jih preizkusila tudi sama, sva opazila kar nekaj možnosti za izboljšave, zato sva se odločila analizirati delovanje pri različnih parametrih in jih čim bolj optimizirati.

Analizirala sva tako mikrobiološke dejavnike kot tudi fizikalne, ki vplivajo na delovanje izbrane biokulture in proizvodnjo električne energije. Spopadala sva se z mnogimi vprašanji, na katera sva si pomagala odgovoriti s številnimi eksperimenti. Odkrila sva optimalne parametre in jih uporabila za proizvodnjo električne energije, s katero sva uspela pognati elektronske komponente. Na koncu sva preračunala še finančno plat poskusa ter zapisala zaključke.

Ključne besede: glive kvasovke, mikrobna gorivna celica, anoda, katoda, ioni, eksperiment

Abstract

In literature many articles about the various uses of microbiological culture for generating electricity are available. Among many descriptions of the experiments that we tested ourselves, we discovered some opportunities for improvements. Therefore we decided to analyse how a microbiological culture works, using different parameters and optimizing them.

We analysed microbiological and physical parameters which affect our chosen biological culture and production of electricity. We were faced with many unanswered questions and only the many experiments we conducted brought us answers to those question. We figured out the optimal parameters and used them in experiments to produce electricity for powering electrical components. In the end, we calculated finances that would be needed for the experiments in commercial use and wrote down our conclusions.

Keywords: baker's yeast, microbial fuel cell, anode, cathode, ions, experiment

1 UVOD

Dandanes svetovna populacija potrebuje vse več energije, virov energije pa je vse manj – zlasti neobnovljivih virov. Obnovljivi viri so na drugi strani zaenkrat še dokaj slabo izkoriščani, saj je gradnja sončnih, vetrnih in vodnih (hidro)elektrarn zelo draga, ostali možni obnovljivi viri energije pa so slabo raziskani.

Znanstveniki zato poskušajo odkriti kakšno cenejšo metodo pridobivanja energije, s katero bi v prihodnosti lahko nadomestili upad pomena neobnovljivih virov.

Med iskanjem informacij po spletu sva naletela na nekaj člankov, raziskav in ostalih povezav, ki opisujejo izkoriščanje biokultur v energetske namene, vendar sva kmalu ugotovila, da je ta možnost pridobivanja energije še razmeroma neraziskana. Na podlagi te ugotovitve sva se odločila, da še sama raziščeva potencial takšne mikrobne elektrarne.

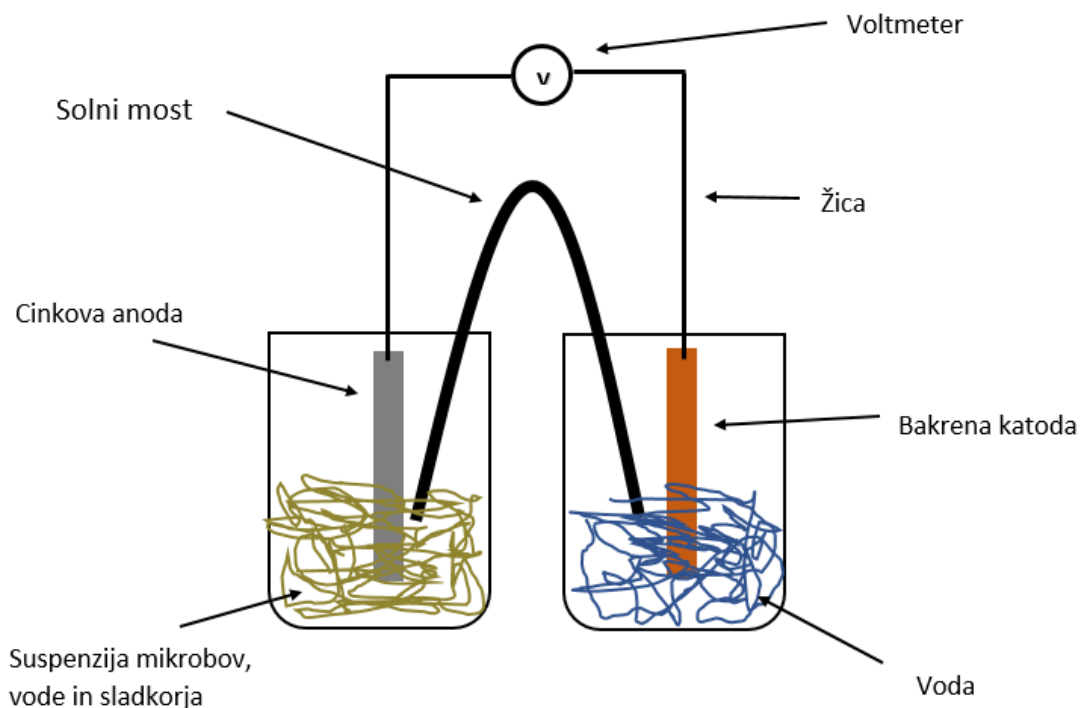
2 TEORETIČNE PREDPOSTAVKE

2.1 MIKROBNA GORIVNA CELICA

Mikrobna gorivna celica (v nadaljevanju: MFC, tj. ang. Microbial Fuel Cell) je bio-elektrokemični sistem, ki ustvarja električni tok s pomočjo mikroorganizmov.

Prvič je bil pojem MFC uporabljen v začetku 20. stoletja, ko je M. C. Potterju s pomočjo gliv kvasovk uspelo generirati sicer zelo malo električne napetosti in toka. Njegova spoznanja je leta 1931 nadgradil Branet Cohen, ki je z isto biokulturo ustvaril MFC, ki je bila uspešna pri generiranju električne napetosti 35 V, vendar električni tok ni dosegel več kot dveh miliamperov. Kasneje v 20. stoletju je MFC raziskovalo še več znanstvenikov, in sicer s pomočjo različnih biokultur, vendar nikomur ni uspelo generirati visoke električne napetosti in toka (Davison, 2019).

Delovanje MFC temelji na pretvarjanju kemične energije v električno s pomočjo mikroorganizmov. Zgodí se redoks reakcija, pri kateri sodelujejo mikroorganizmi. Redoks reakcije so vse reakcije, pri katerih atomi spremenijo svoje oksidacijsko stanje (oddajajo ali sprejemajo elektrone od drugih snovi v reakciji). Čez solni most oziroma protonsko membrano teče tok ionov, medtem ko od anode do katode teče tok elektronov, ki ga lahko uporabimo kot vir energije, kar prikazuje spodnja shema.



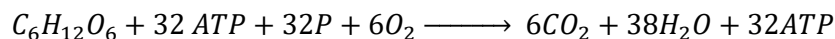
Slika 1: Shema mikrobne gorivne celice
(vir: Lasten)

2.2 GLIVE KVASOVKE

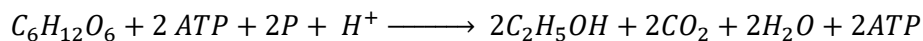
Kvasovke (lat. *Saccharomyces cerevisiae*) so evkariontski enocelični organizmi iz kraljestva gliv. Kvasovke imajo tipično premer 3–4 μm . Spadajo med fakultativne aerobe, torej jih lahko gojimo tako v aerobnih pogojih kot tudi v anaerobnih. Če pa jih opredelimo glede na temperaturo, so mezofilni mikroorganizmi, kar pomeni, da jim najbolj odgovarjajo temperature od 20 °C do 40 °C. Predstavljajo popolnoma nezahtevne mikroorganizme, saj se zelo dobro prilagajajo razmeram. So pomembni organizmi v raziskavah in veljajo za ene najbolj raziskanih evkariontskih mikroorganizmov (Orožen Adamič in Serbec, 2015).

V vsakdanjem življenju jih najdemo v suhem kvasu (kot kroglice) ali svežem kvasu. Uporabljajo se predvsem pri pridobivanju alkoholnih pijač s fermentacijo in pri peki izdelkov iz kvašenega testa. Kvasovke se uporabljajo tudi pri proizvodnji bioetanola kot biogoriva, potekajo pa tudi številne raziskave za proizvodnjo električne energije v mikrobnih gorivnih celicah.

Kvasovke v aerobnih pogojih (celično dihanje):



Kvasovke v anaerobnih pogojih (alkoholno vrenje):



V najinem poskusu je potekla reakcija celičnega dihanja, pri čemer se je sprostilo več energije (in prešlo je več ionov na elektrodi), kot bi se je, če bi šlo za alkoholno vrenje.

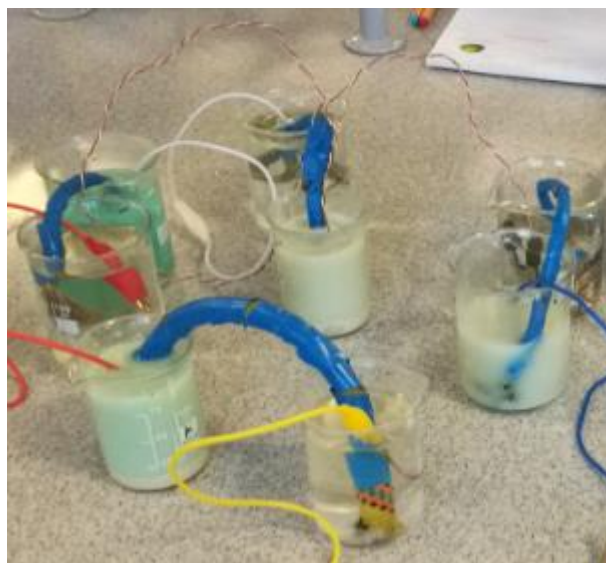


Slika 2: V vsakdanjem življenju najpogosteje najdemo kvasovke v obliki kvasa.
(Foto: Lucija Dolžan, 17. 12. 2019)

2.3 METILENSKO MODRILLO

To je barvilo modre barve s kemijsko formulo $C_{16}H_{18}ClN_3S$. Uporablja se predvsem kot barvilo ali indikator. Gre za razmeroma drago snov, zato se ne uporablja v velikih količinah.

Ko metilensko modrilo dodamo v vzorec, se vzorec čez nekaj časa razbarva. To se lahko zgodi, saj se pri razgradnji glukoze med celičnim dihanjem ob pomoči encimov gliv kvasovk sproščajo elektroni, zaradi katerih se barvilo reducira.



*Slika 3: Redukcija metilenskega modrila
(Foto: Lucija Dolžan)*

2.4 PREGLED LITERATURE

2.4.1 MIKROBNA GORIVNA CELICA S KVASOVKAMI

Silveira, Masaharu Ikegaki in Schneedorf (2017) so s pomočjo gliv kvasovk in z izbranimi parametri poskušali proizvesti čim večjo električno napetost in tok. Raziskava je dostopna na spletu.¹ Uporabili so dve 25-mililitrski čaši, grafitno anodo in katodo, stekleno cevko, dolgo 15 cm, s premerom 4 mm. Cevko so napolnili z agarjem, ki so mu dodali 1,5-molarno raztopino kalijevega klorida. Obe čaši so napolnili z 20 ml vode ter v eno od čaš dodali 0,8 g kvasa, zmešanega z 2 ml vode in 2 ml metilenskega modrila. Nato so dodali še 0,4 g glukoze, zmešane z 1 ml vode. V čašo s kvasovkami so pomočili grafitno anodo, v čašo z vodo pa katodo. Čaši so povezali s solnim mostom ter katodo in anodo povezali z voltmetrom. Poskus so izvajali približno 80 minut, v tem intervalu pa so vsakih 5 minut dodajali 0,8 g kvasa ter 2 ml vode. S tem so biokulturo ohranjali živo, posledično sta se ohranjala tudi električna napetost in tok. Najvišja izmerjena napetost je bila $354 \text{ mV} \pm 6 \text{ mV}$, električnega toka niso merili.



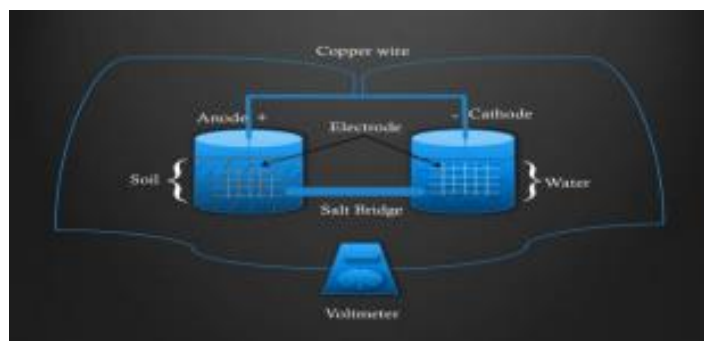
Slika 4: Prikaz poskusa s kvasovkami
(povzeto po: www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17518253.2016.1278280, 17. 12. 2019)

¹ Dostopno na: www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17518253.2016.1278280.

2.4.2 MIKROBNA GORIVNA CELICA Z BLATOM

Adeib Idris idr. (2016) so izvedli poskus z blatom.² Odločili so se, da bodo testirali dva vzorca blata, vzeta na različnem kraju. V poskusu so uporabili dve posodi. V eno so dali 1,5 l blata, v drugo pa 1,5 l vode. V blato so potopili železno anodo, v vodo pa katodo in ju povezali z bakreno žico (vmes so merili napetost). Bakterijam so želeli zagotoviti anaerobne pogoje, zato so posodi pokrili in naredili odprtini za solni most. Most je predstavljala bombažna vrv, namočena v raztopino soli. Poskus so izvedli s 15, 20, 25 in 30 cm dolgim mostom. Poskusili so tudi dovajati zrak, vendar niso dosegli zelene spremembe. Ugotovili so, da je električna napetost najvišja pri najdaljšem solnem mostu, ki je meril 30 cm.

V enem vzorcu blata so izmerili napetost 192,7 mV, medtem ko je napetost v drugem vzorcu blata merila 190,5 mV. Ugotovili so, da so bili v prvem vzorcu blata prisotni za poskus nekoliko ugodnejši mikroorganizmi, posledično je izmenjava ionov potekala hitreje, izmerjena električna napetost pa je bila višja. Prav tako se je izkazalo, da na električno napetost močno vplivata vrsta bakterij, ki so prisotne v blatu, in dolžina solnega mostu.



Slika 5: Shema poskusa z blatom

(Vir: www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/32/mateconf_iccpe2016_02001.pdf, 17. 12. 2019)

² Dostopno na:

www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/32/mateconf_iccpe2016_02001.pdf

3 EMPIRIČNI DEL

3.1 CILJI

Cilji, zastavljeni v tej raziskovalni nalogi, so:

- izdelati lastno mikrobno gorivno celico,
- raziskati, kakšni so optimalni pogoji za izbrano biokulturo,
- s poskusom doseči čim večjo električno napetost in tok,
- mikrobno gorivno celico povezati z različnimi elektronskimi komponentami,
- izračunati stroške proizvedene električne energije.

3.2 HIPOTEZE

Postavila sva naslednje hipoteze:

- S pomočjo mikroorganizmov je mogoče pridobivati električno energijo.
- S pridobljeno energijo je mogoče poganjati manjše elektronske naprave.
- Z optimalnimi pogoji lahko vplivamo na delovanje biokulture in posledično na količino pridobljene električne energije.
- Stroški pridobivanja električne energije na tak način so nižji od cene električne energije na trgu.

3.3 RAZISKOVALNA VPRAŠANJA

V raziskovalni nalogi so zastavljena tudi naslednja raziskovalna vprašanja:

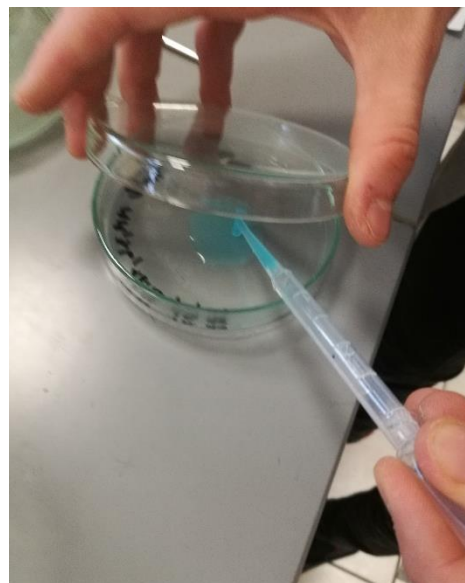
- Kolikšno največjo napetost in tok lahko dosežemo?
- Na kakšen način lahko vplivamo na delovanje biokulture?
- S katerim vsakdanjim mikroorganizmom lahko izvedemo poskus?
- Koliko energije lahko pridobimo iz določene količine surovin?

3.4 IZBIRA BIOKULTURE

Kot biokulturo sva izbrala glive kvasovke (lat. *Saccharomyces cerevisiae*). Za to sva se odločila, saj je biokultura cenovno dostopna, ni patogena, poleg tega pa je dobro poznana. Z izbrano kulturo sva izvedla vrsto raziskav in z njimi poskušala izbrati optimalne pogoje. Pripravila sva tekoči vzorec kvasa, zmešanega z vodo in saharozo (trsní sladkor), in spreminjala pogoje: različne količine metilenskega modrila, kuhinjske soli in kalijevega klorida.



Slika 6: Priprava vzorca z metilenskim modrilom
Foto: Lucija Dolžan



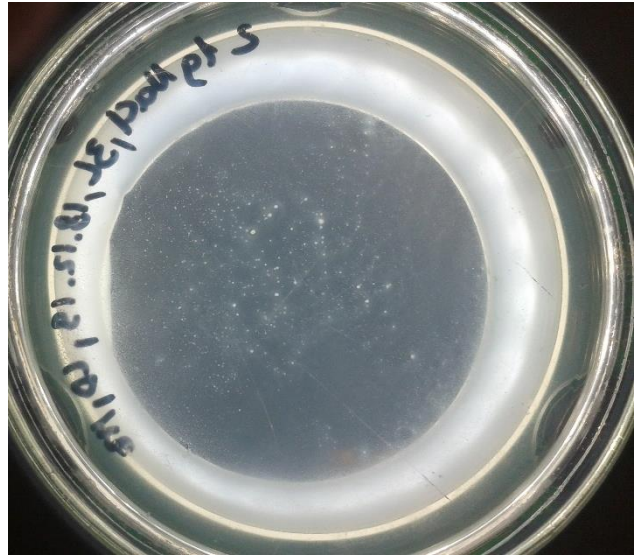
Slika 7: Nanos vzorca na petrijevko
Foto: Lucija Dolžan

Najprej sva pripravila 2-odstotni tehnični agar, ga vlila v petrijevke in počakala, da se strdi. Pripravila sva 30 petrijevok, saj sva za vsako količino izvedla tri ponovitve.

Nato sva pripravila posamezne vzorce soli in metilenskega modrila ter vsakega posebej zmešala s tekočim vzorcem kvasovk. Zmesi sva premešala, jih sterilno nanese na petrijevke in s hokejko razmazala čez celo površino petrijevke. Za vse vzorce sva uporabila 50 ml vode. Petrijevke sva inkubirala dva dni pri 37 °C. Nastale kolonije sva preštela in rezultate analizirala s pomočjo tabel.



Slika 8: Štetje kolonij
Foto: Lucija Dolžan



Slika 9: Kolonije kvasovk po inkubaciji
Foto: Lucija Dolžan

Prve tri petrijevke so bile kontrolne. Vanje sva vlila le tekoči vzorec kvasovk. Po inkubaciji sva na vseh treh petrijevkah preštela več kot 300 kolonij, kar pomeni, da petrijevke niso števne, saj naj bi števne vsebovale med 15 in 300 kolonij. Neštvene petrijevke so v tabelah označene s poševnico (/).

Tabela 1: Rezultati petrijevok brez primesi

navadna	brez primesi
1	/
2	/
3	/

Petrijevke s kuhinjsko soljo (NaCl) so bile po večini števne. Izjema sta bili prva ponovitev s primesjo 1 g soli, pri kateri sva preštela več kot 300 kolonij, in prva ponovitev s primesjo 10 g soli, pri kateri je bilo kolonij manj kot 15.

Tabela 2: Rezultati petrijevok s primesmi kuhinjske soli

NaCl	1 g	5 g	10 g
1	/	78	/
2	231	50	51
3	155	66	43
povprečje:	193 ± 38	65 ± 15	47 ± 4

Petrijevke s kalijevim kloridom (KCl) so pokazale naslednje rezultate:

Tabela 3: Rezultati petrijev s primesmi kalijevega klorida

KCl	1 g	5 g	10 g
1	106	82	25
2	81	71	23
3	104	44	17
povprečje:	97 ± 16	66 ± 22	22 ± 5

Petrijevke z metilenskim modrilom so bile polne kolonij.

Tabela 4: Rezultati petrijev s primesmi metilenskega modrila

MM	0,1 ml	0,3 ml	0,5 ml
1	253	/	243
2	/	198	211
3	201	/	/
povprečje:	227 ± 26	198	227 ± 16

Z inkubacijo sva se prepričala, da je za najin poskus najbolj ustrezna kuhinjska sol, saj je cenejša in manj škoduje biokulturi. Ugotovila sva tudi, da metilensko modrilo ne vpliva na rast gliv kvasovk, kar pomeni, da ga lahko pri izvedbi poskusa uporabljamo nemoteno.

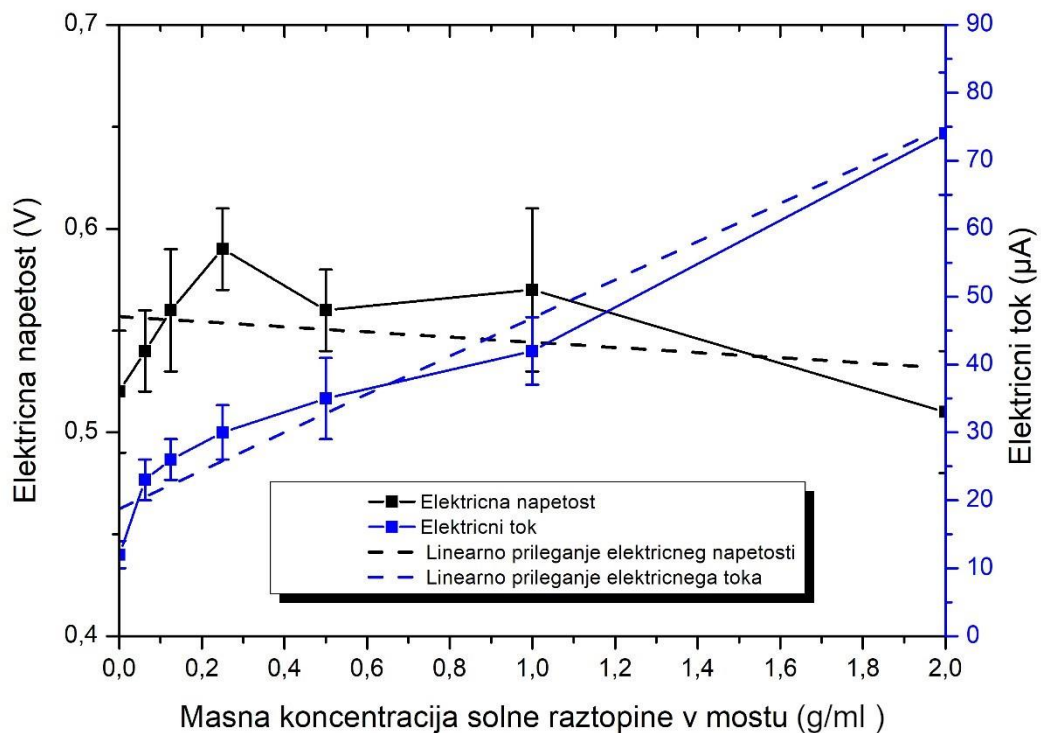
3.5 IZBIRA OSTALIH KOMPONENT IN PARAMETROV

Na podlagi raziskanega in prebranega sva izbrala naslednje komponente. Za anodo sva izbrala cink (Zn), za katodo pa baker (Cu). Izbirala sva na podlagi elektrokemijske napetostne vrste in dostopnosti oziroma cene snovi. Izbirala sva cenovno ugodni kovini, ki sta si na napetostni vrsti čim bolj oddaljeni, saj s tem, ko cink dobro oddaja elektrone, baker pa sprejema, ustvarimo velik potencial, ki se kaže v izmerjenem električnem toku. Bolj sta elementa med seboj oddaljena, večji potencial ustvarjata, posledično je večji tudi električni tok.



Slika 10: Elektrokemijska napetostna vrsta
(povzeto po: eucbeniki.sio.si/kemija2/617/index2.html, 29. 12. 2019)

Da bi odkrila idealne pogoje za eksperiment, sva morala raziskati še vpliv preseka in dolžine mostu, koncentracije mostu, velikosti elektrod, količine kvasa in koncentracije solne raztopine v mostu na količino producirane električne napetosti in toka. Rezultate sva upodobila z grafi, iz katerih so razvidni idealni pogoji.

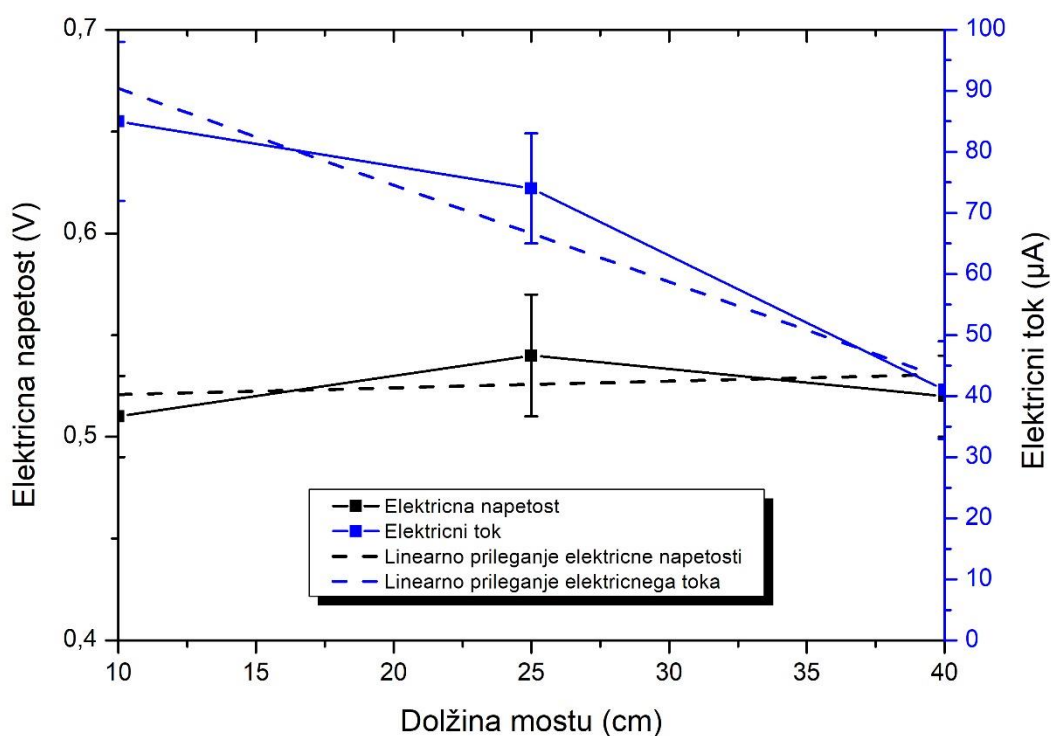


Graf 1: Vpliv masne koncentracije solne raztopine v mostu na električno napetost in tok

Iz grafa 1 je razvidno, da se električna napetost s spreminjanjem masne koncentracije solne raztopine v mostu drastično ne spreminja, se pa spreminja električni tok. Ko je bila masna koncentracija solne raztopine v mostu enaka 2 g/ml (raztopina je bila nasičena), je bil izmerjeni tok najvišji.

Eksperiment je bil izveden pri naslednjih pogojih:

- dolžina mostu je merila 25 cm,
- presek mostu je meril 1 mm²,
- v vsako od čaš sva vlila 50 ml vodovodne vode,
- v eno od čaš sva dodala 5 g kvasa in 2 g sladkorja,
- uporabila sva bakreno katodo in cinkovo anodo,
- poskus sva izvedla pri sobni temperaturi (22 °C).

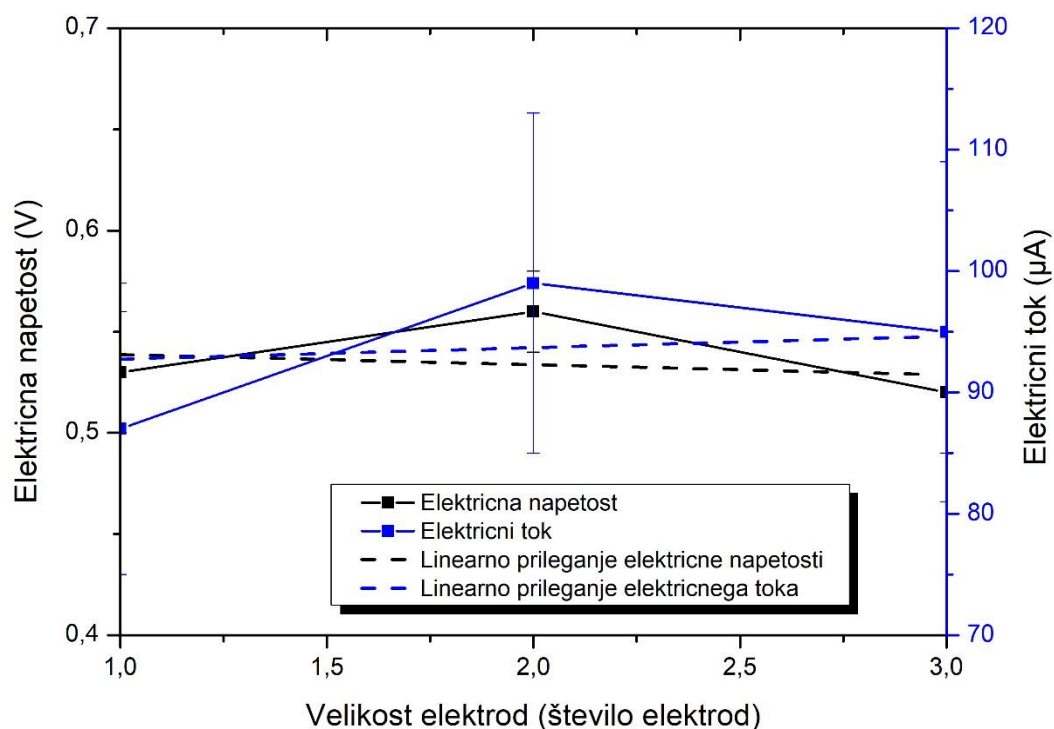


Graf 2: Vpliv dolžine solnega mostu na električno napetost in tok

Iz grafa 2 je razvidno, da se električna napetost ne spreminja veliko, vidi pa se upad izmerjenega električnega toka z daljšanjem solnega mostu.

Ekspiriment je bil izveden pri naslednjih pogojih:

- presek mostu je meril 4 mm²,
- nasičena solna raztopina v mostu (2 g soli/ml vode),
- v vsako od čaš sva vlila 50 ml vodovodne vode,
- v eno od čaš sva dodala 10 g kvasa in 2 g sladkorja,
- uporabila sva bakreno katodo in cinkovo anodo,
- poskus sva izvedla pri sobni temperaturi (22 °C).

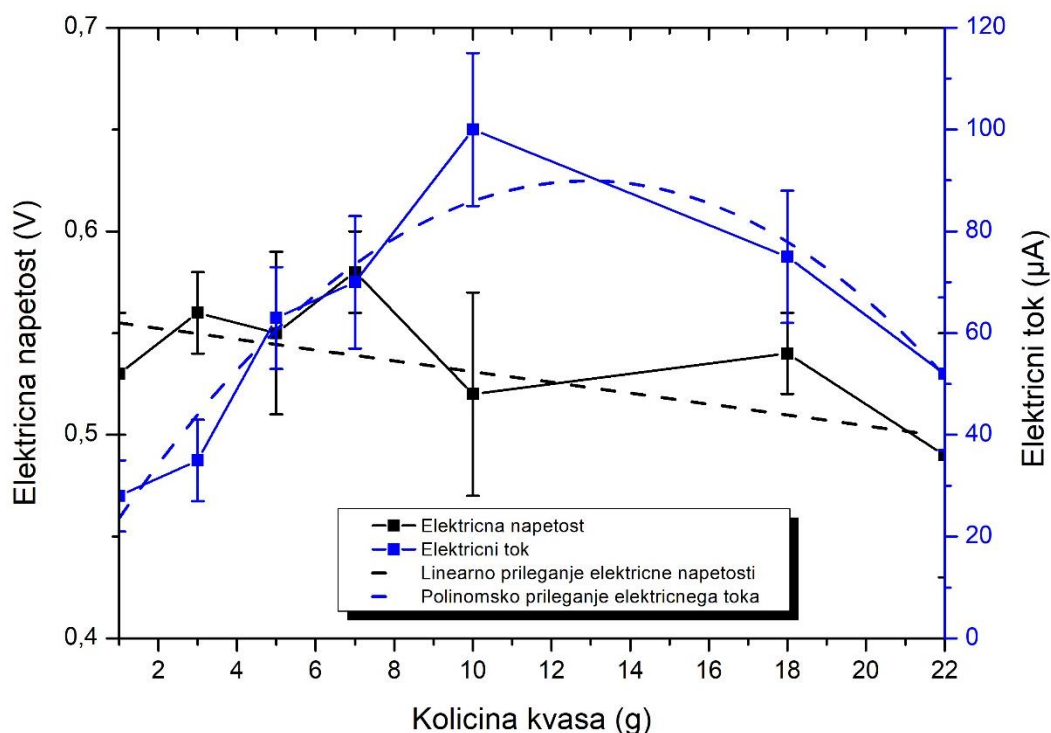


Graf 3: Vpliv velikosti elektrod (anode in katode) na električno napetost in tok

Pri tem eksperimentu sva postopoma dodajala elektrode, s čimer sva raziskovala vpliv števila elektrod (njihove površine) na električni tok in napetost. Iz grafa je razvidno, da velikost elektrod ne vpliva na električno napetost in tok.

Eksperiment je bil izveden pri naslednjih pogojih:

- presek mostu je meril 4 mm^2 ,
- nasičena solna raztopina v mostu (2 g soli/ml vode),
- v vsako od čaš sva vlila 50 ml vodovodne vode,
- v eno od čaš sva dodala 10 g kvasa in 2 g sladkorja,
- uporabila sva bakrene katode in cinkove anode,
- poskus sva izvedla pri sobni temperaturi ($22 \text{ }^\circ\text{C}$).

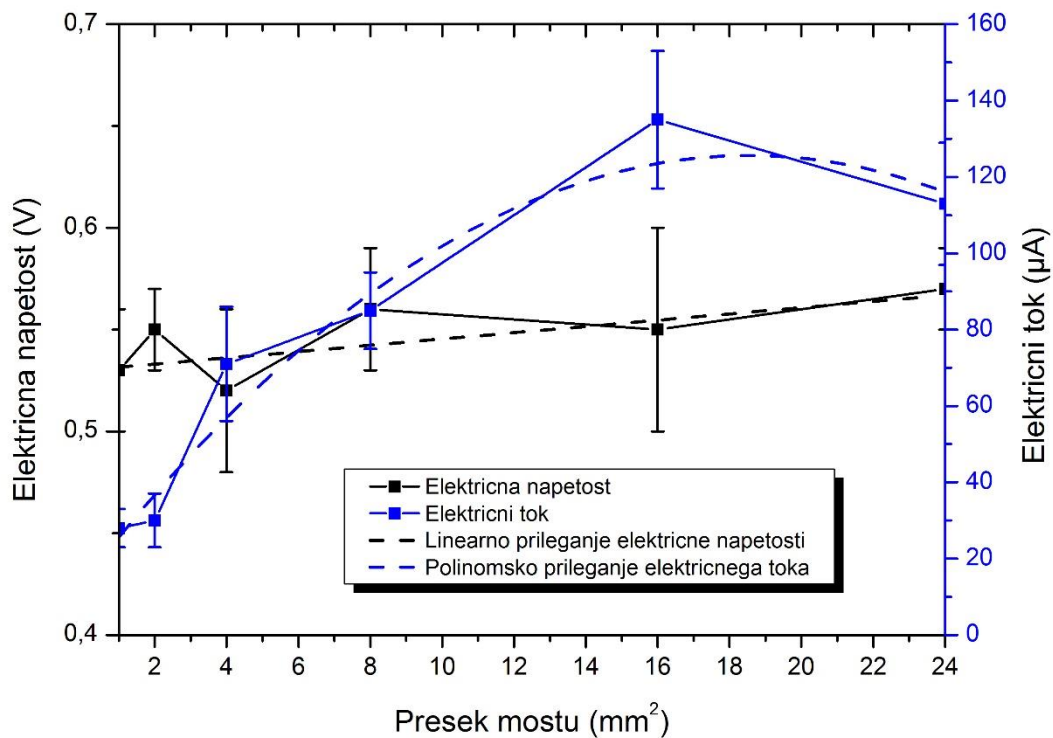


Graf 4: Vpliv količine kvasa na električno napetost in tok

Iz grafa 4 je razvidno, da je najboljša količina kvasa 10 g, saj večja količina kvasovk potrebuje več kisika in prostora, ki pa ju v čaši zmanjka, posledično kvasovke začnejo delovati anaerobno, torej poteče alkoholno vrenje. Produkt alkoholnega vrenja je etanol, ki ob večji koncentraciji uniči kvasovke, posledično je koncentracija aktivnih kvasovk manjša in ioni potrebujejo več časa za preskok na elektrodo oziroma solni most, posledično sta izmerjena električna napetost in tok prav tako manjša. Torej moramo za poskus uporabiti ravno pravšnjo količino kvasovk.

Eksperiment je bil izveden pri naslednjih pogojih:

- presek mostu je meril 4 mm^2 ,
- nasičena solna raztopina v mostu (2 g soli/ml vode),
- v vsako od čaš sva vlila 50 ml vodovodne vode,
- dolžina mostu je merila 25 cm,
- v eno od čaš sva dodala določeno količino kvasa (količina kvasa je bila spremenljivka) in 2 g sladkorja,
- uporabila sva bakreno katodo in cinkovo anodo,
- poskus sva izvedla pri sobni temperaturi ($22 \text{ }^\circ\text{C}$).

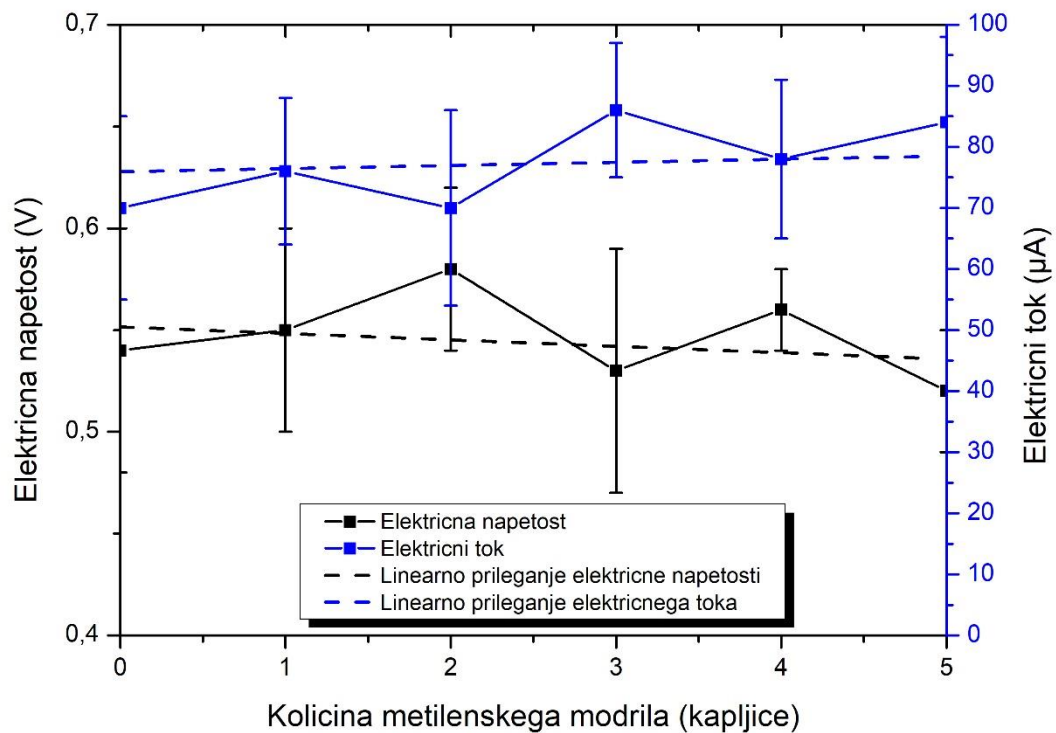


Graf 5: Vpliv preseka mostu na električno napetost in tok

Iz grafa 5 je razvidno, da se električna napetost ne spreminja veliko, električni tok pa s presekom narašča. Izjema na grafu je meritev s presekom 24 mm², za katero smo uporabili kar plezalno vrv, ki je močno stisnjena, zato je vpila manj solne raztopine kot naravna konopljna vrv. Posledično je bil izmerjeni električni tok manjši. V splošnem pa sva ugotovila, da se z večanjem preseka mostu poveča tudi električni tok.

Eksperiment je bil izveden pri naslednjih pogojih:

- nasičena solna raztopina v mostu (2 g soli/ml vode),
- v vsako od čaš sva vlila 50 ml vodovodne vode,
- dolžina mostu je merila 25 cm,
- v eno od čaš sva dodala 10 g kvasa in 2 g sladkorja,
- uporabila sva bakreno katodo in cinkovo anodo,
- poskus sva izvedla pri sobni temperaturi (22 °C).

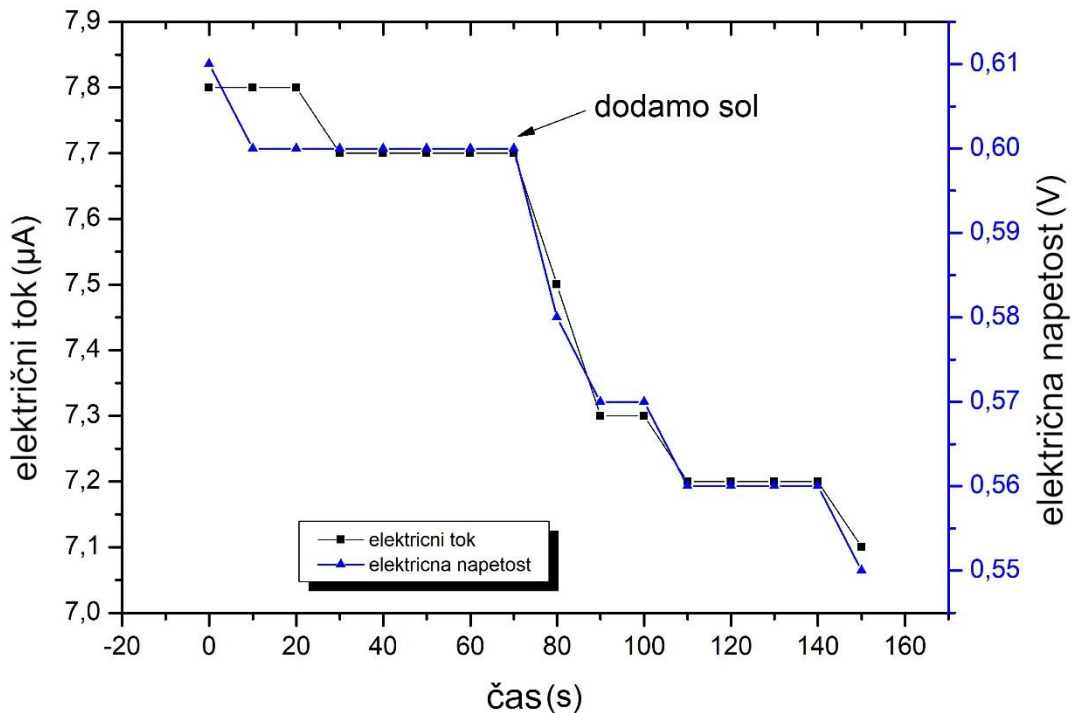


Graf 6: Vpliv količine metilenskega modrila na električno napetost in tok

Iz grafa 6 je razvidno, da količina metilenskega modrila ne vpliva na električno napetost in tok. Igra le vlogo redoks indikatorja, torej z njim lahko dokažemo, da je potekla redoks reakcija (metabolizem kvasovk), zaradi katere se barvilo razbarva.

Ekspiriment je bil izveden pri naslednjih pogojih:

- nasičena solna raztopina v mostu (2 g soli/ml vode),
- v čašo s kvasovkami sva postopoma kapala metilensko modrilo,
- v vsako od čaš sva vlila 50 ml vodovodne vode,
- presek mostu je meril 8 mm²,
- dolžina mostu je merila 25 cm,
- v eno od čaš sva dodala 10 g kvasa in 2 g sladkorja,
- uporabila sva bakreno katodo in cinkovo anodo,
- poskus sva izvedla pri sobni temperaturi (22 °C).



Graf 7: Vpliv soli v čaši z vodo na električno napetost in tok s časom

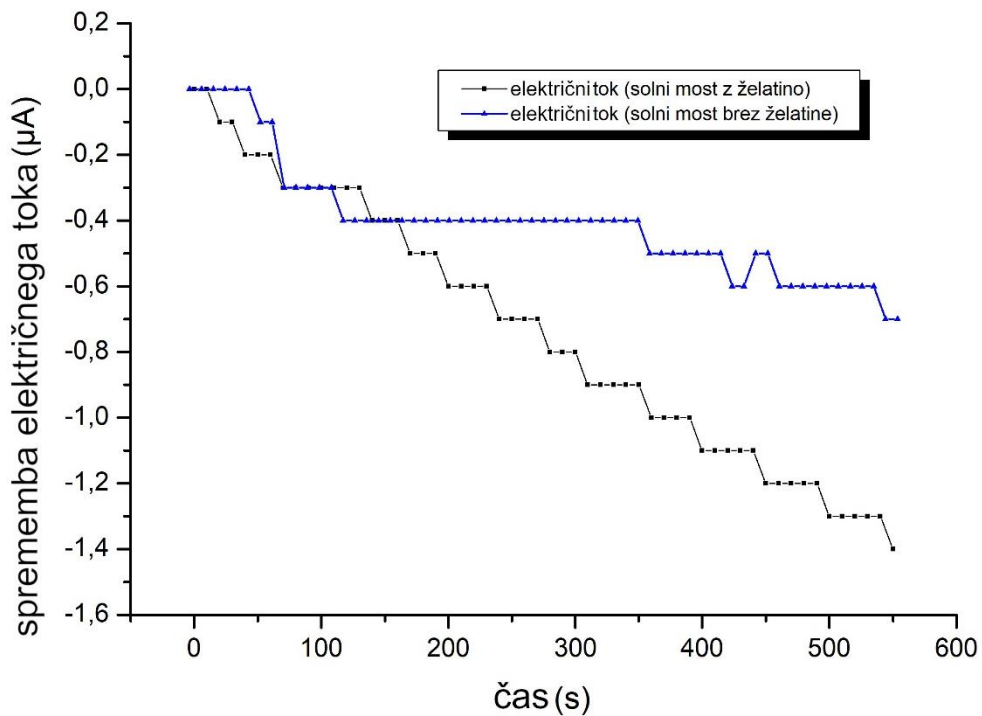
Iz grafa 7 je razvidno spreminjanje koncentracije soli v čaši, v kateri je voda vplivala na električni tok in napetost. Te podatke sva merila na podlagi suma, da se električni tok in napetost zmanjšata glede na raztapljanje soli v vodi, kar sva z meritvami tudi potrdila. Iz grafa se vidi tudi, da je na začetku sprememba električnega toka in napetosti skoraj nezaznavna, ko pa dodamo sol, opazimo strm padec električnega toka in napetosti.

Eksperiment je bil izveden pri naslednjih pogojih:

- nasičena solna raztopina v mostu (2 g soli/ml vode),
- v čašo z vodo sva dodala sol,
- v vsako od čaš sva vlila 50 ml vodovodne vode,
- presek mostu je meril 8 mm²,
- dolžina mostu je merila 25 cm,
- v eno od čaš sva dodala 10 g kvasa in 2 g sladkorja,
- uporabila sva bakreno katodo in cinkovo anodo,
- poskus sva izvedla pri sobni temperaturi (22 °C).

Poskus sva izvedla tudi s solnim mostom, obdanim z želatino, in spreminjanje električnega toka primerjala s solnim mostom iz prejšnjih poskusov. Most z želatino sva naredila tako, da sva konopljino vrv pomočila v slano želatino. Za to sva se odločila, ker sva na podlagi predhodno dobljenih rezultatov in ugotovitev, da se sol raztaplja v vodi, poskus ponovila z mostom, iz katerega sol ne bi prehajala v vodo, in ker se s tem ne bi zmanjšal tok.

Ugotovila sva, da se pri solnem mostu, ki je obdan z želatino električni tok in napetost zmanjšujeta hitreje kot pri solnem mostu, ki želatine nima, kar se najverjetneje zgodi zaradi slabše prevodnosti mostu, obdanega z želatino. Pri izvedbi tega poskusa sva opazovala le spremembo električnega toka ne glede na njegovo izmerjeno vrednost na začetku poskusa.



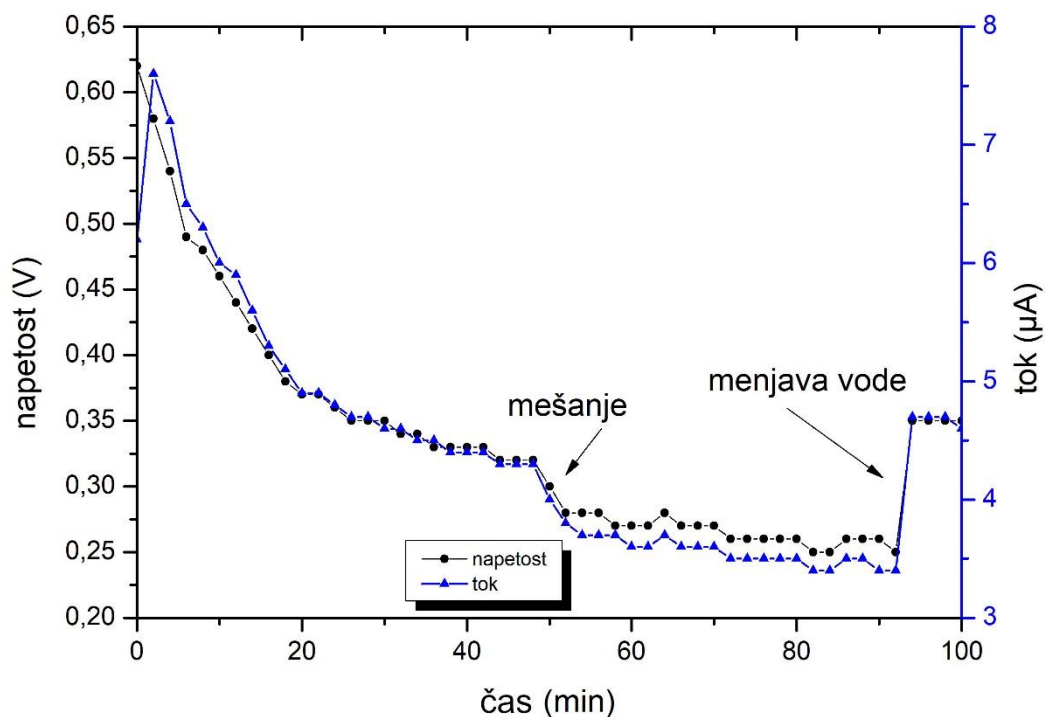
Graf 8: Sprememba električnega toka s časom pri različnih solnih mostovih

3.6 IZVEDBA POSKUSA Z OPTIMALNIMI PARAMETRI

Na osnovi vseh izvedenih poskusov in preučene literature sva ugotovila, da so idealni parametri, ki omogočajo največji tok in napetost ter so hkrati še izvedljivi, naslednji:

- 10 g svežega kvasa (v 50 ml vode),
- čim krajša dolžina mostu,
- 2 g sladkorja (za 10 g kvasa),
- nasičena solna raztopina v mostu (2 g soli/ml vode),
- cinkova anoda in bakrova katoda,
- 50 ml vode na posamezno čašo,
- čim večji presek mostu.

Poskus sva nato ponovila še enkrat, tokrat sva testirala spreminjanje električnega toka in napetosti v odvisnosti od časa. Meritve sva nato prikazala z grafom.



Graf 9: Sprememba električne napetosti in toka v odvisnosti od časa

Iz grafa je razvidno, da napetost pada eksponentno. Z mešanjem ustvarimo neugodne pogoje za preskok elektronov na elektrodo. Vidna pa je tudi sprememba ob menjavi vode, saj sta takrat tok in napetost drastično narasla. To se je zgodilo zato, ker sva z menjavo vode odstranila raztopljene ione soli, ki so se z izhajanjem iz solnega mostu nabrali v posodi in upočasnili proces pretoka ionov.

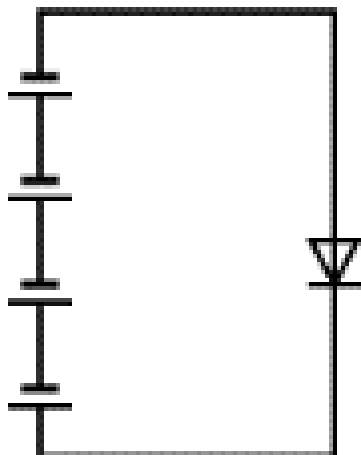


*Slika 11: Voda, nasičena s soljo iz solnega mostu (levo), in čista voda (desno)
Foto: Lucija Dolžan*

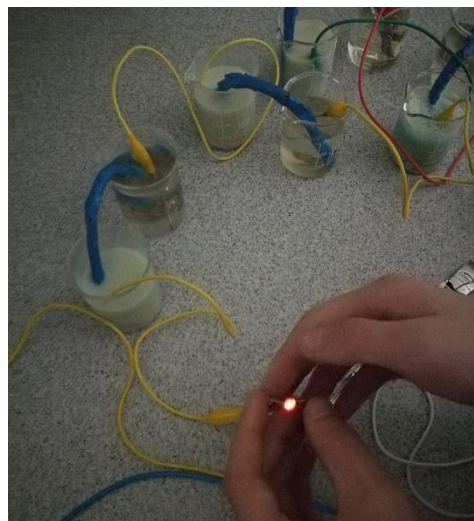
3.7 POGON RAZLIČNIH ELEKTRONSKIH KOMPONENT

Ko sva raziskala optimalne pogoje za izvedbo poskusa, sva s pomočjo le-teh poskusila pognati različne naprave. Pri tem sva imela težavo najti napravo, ki bi delovala pri tako nizkem toku in napetosti, saj nama je z eno gorivno celico uspelo pridobiti električni tok največ $75 \mu\text{A}$, največja dobljena električna napetost pa je znašala $0,6 \text{ V}$.

Najprej sva pognala LED, ki je za svoje delovanje potrebovala napetost $1,5 \text{ V}$ in tok nekaj μA . Da nama je uspelo zagotoviti tako veliko električno napetost, sva več celic vezala zaporedno, saj se tako električna napetost sešteva, električni tok pa ohranja.



Slika 13: Shema vezave gorivnih celic in LED

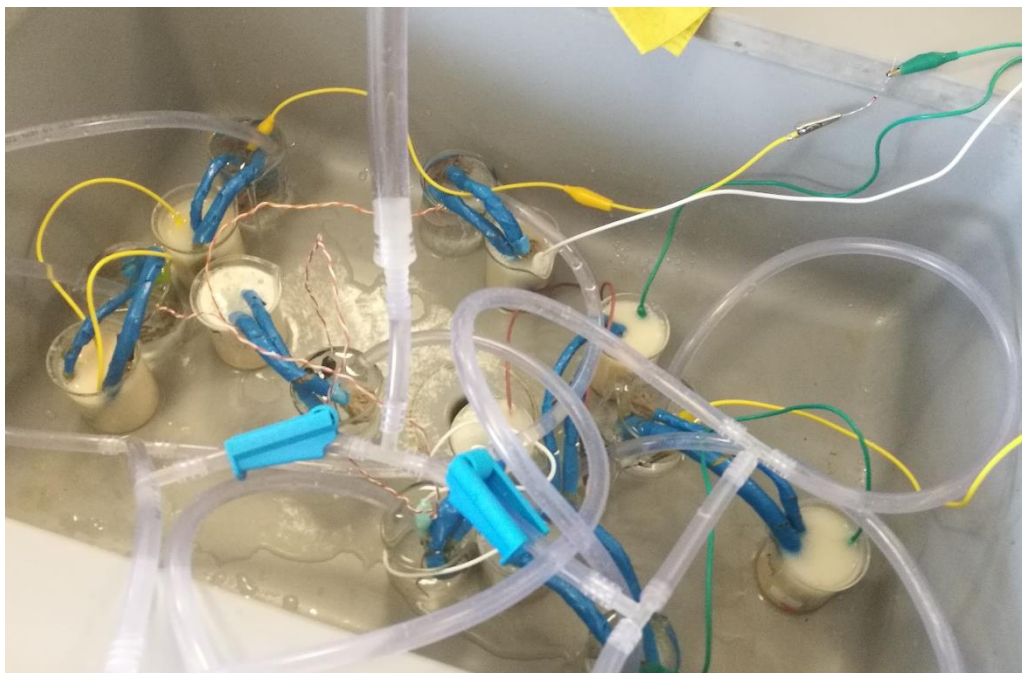


Slika 12: Svetenje LED
Foto: Lucija Dolžan

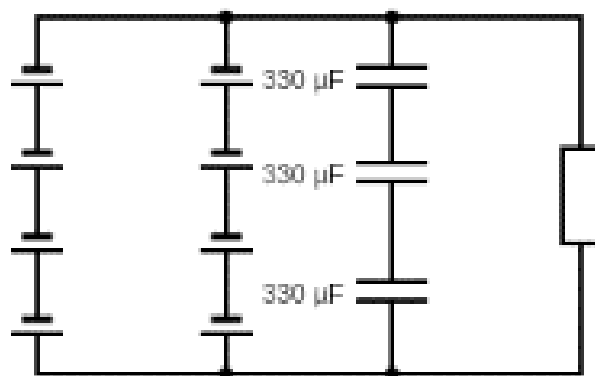
Nato sva s pomočjo več gorivnih celic poskušala pognati še stensko uro. Najprej sva izmerila, kolikšen električni tok in napetost sploh potrebuje za svoje delovanje, kar sva naredila s pomočjo vira napetosti. Imela sva kar nekaj težav, saj sva morala zagotoviti napetost 1,5 V in tok 0,1 mA. Da sva zagotovila večji električni tok, sva gorivne celice vezala vzporedno, za zagotovitev višje električne napetosti pa sva jih morala vezati zaporedno.

Najprej sva uro vezala neposredno na gorivne celice, ker pa nisva zagotovila dovolj energije, ura ni delovala. Kazalec je le utripal, zaradi česar sva ugotovila, da ura sicer šteje čas, vendar ne zagotovi dovolj velike energije za premik kazalca. Težavo sva rešila tako, da sva poleg gorivnih celic vezala še kondenzatorje, s katerimi nama je uspelo shraniti dovolj naboja med posameznimi premiki kazalca, da se je sekundni kazalec na uri premaknil enkrat na sekundo, saj ob premiku potrebuje večji električni tok kot v mirovanju, ko presežek toka lahko polni kondenzatorje. Morala pa sva izbrati kondenzatorje z ravno prav veliko kapaciteto, saj jim, če je bila premajhna, ni uspelo zagotoviti dovolj velikega toka, če pa je bila kapaciteta določenega kondenzatorja prevelika, se ni uspel polniti dovolj hitro in ura zaradi tega ni delovala. S tem dodatkom je ura delovala, vendar le okoli 25 sekund.

Ko sva imela dokaz, da z gorivnimi celicami res lahko poganjamo uro, sva poskusila podaljšati njen čas delovanja. Ugotovila sva, da menjavanje vode zviša električni tok in napetost, zato sva vse gorivne celice povezala s cevkami, s čimer sva omogočila neprestano menjavo vode. S tem je ura delovala 45 minut, kar pa bi lahko podaljšala z menjavo solnih mostov, saj se zaradi neprestane menjave vode sol iz le-teh izpira, s čimer se zmanjša prenos ionov preko mostu, kar je vzrok za zmanjšanje električnega toka in napetosti.



Slika 14: Vezava več gorivnih celic z dodanimi cevkami za pretok vode
Foto: Lucija Dolžan

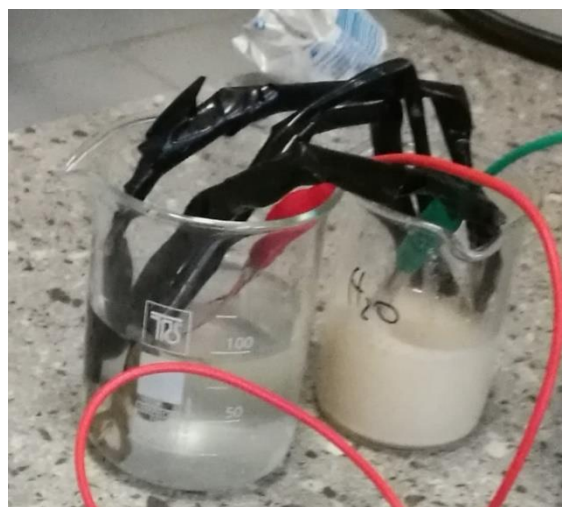
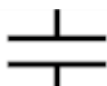


Slika 15: Shema vezave gorivnih celic, kondenzatorjev in stenske ure

Vsaka baterija na shemi (slika 15) predstavlja eno gorivno celico, upor na shemi pa predstavlja uro, ki smo jo poganjali.



Slika 17: Kondenzator
Na shemi prikazan kot:
Foto: Lucija Dolžan



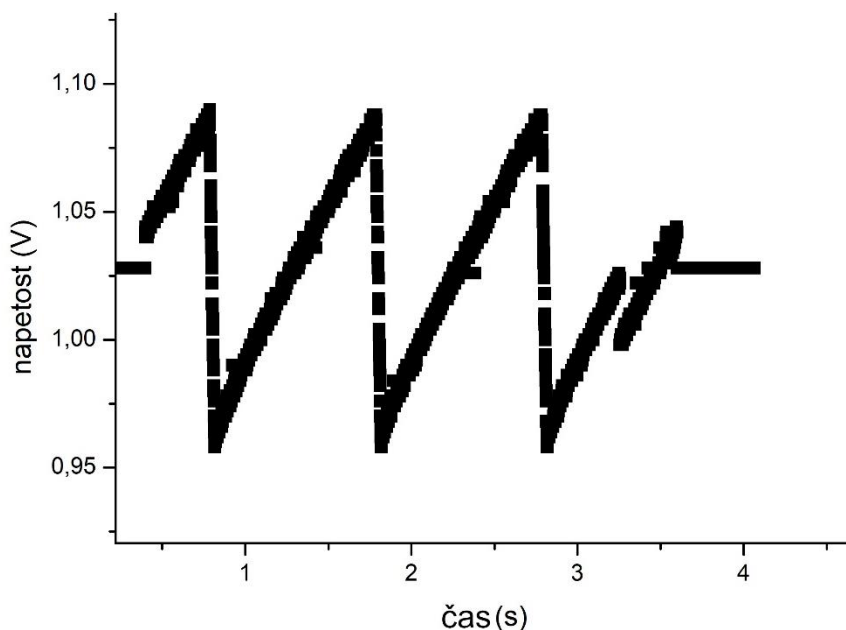
Slika 16: Gorivna celica
Na shemi prikazana kot:
Foto: Lucija Dolžan



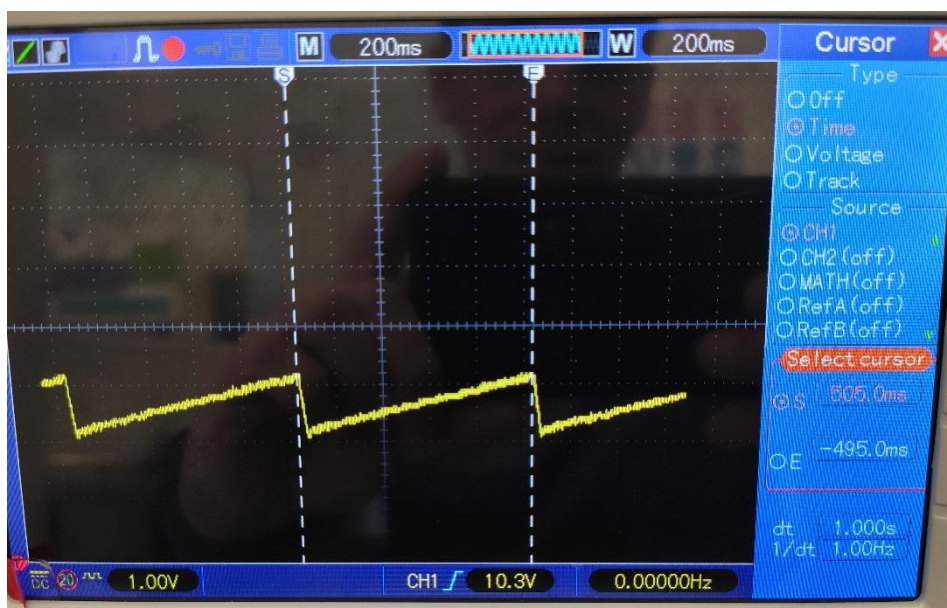
Slika 18: Stenska ura
Na shemi prikazana kot:
Foto: Lucija Dolžan



Ob poganjanju ure sva z osciloskopom merila tudi spreminjanje napetosti na kondenzatorju. Iz grafa 10 je razvidno, kako napetost pade, ko se kazalec na uri premakne in iz kondenzatorjev steče velik tok, nato pa se napetost spet dvigne med mirovanjem urnega kazalca, ko odvečni tok polni kondenzatorje. Treba je izbrati ustrezne kondenzatorje s primerno kapaciteto, da lahko shranijo dovolj energije in da se kondenzatorji polni dovolj hitro. Z osciloskopom sva izmerila tudi frekvenco polnjenja kondenzatorja, ki je znašala točno 1,00 Hz, kar pomeni, da se padci električne napetosti zgodijo točno na 1 sekundo, zaradi česar je ura normalno delovala, saj je iz kondenzatorja prejemala dovolj električne energije.



Graf 10: Sprememba napetosti na kondenzatorju v odvisnosti od časa



Slika 19: Sprememba napetosti na kondenzatorju, izmerjena z osciloskopom
Foto: Matej Zupan

3.8 FINANČNI IZRAČUN

Preračunala sva enkratni začetni vložek in strošek goriva, s katerim poganjamo gorivne celice. Začetni vložek prikazuje spodnja tabela.

Tabela 5: Začetni stroški

	Količina	Prodajalec	Strošek (€)
konopljna vrv	32 m	Hobby Art	2,12
kvas	80 g	Spar	0,25
izolirni trak	4 m	Merkur	0,60
krokodilčki	20 kosov	eBay	1,50
cevka	2 m	Gumiz	0,90
razdelilniki za cevke	8 kosov	eBay	1,60
kondenzatorji	3 kosi	eBay	1,38
Sol	100 g	Mercator	0,04
SKUPEN STROŠEK:			8,39

Čaše in elektrode sva si izposodila iz šolskega laboratorija.

Drugi strošek predstavljata voda in sladkor, ki smo ju redno dovajali v gorivno celico. Količina je preračunana za 45 minut delovanja.

Tabela 6: Stroški poganjanja celic za 45 minut

	Količina	Prodajalec	Stroški (€)
sladkor	2 g	Spar	0,0016
voda*	51 l	Komunala Ljubljana	0,03
SKUPEN STROŠEK:			0,0316

* strošek ob rednem menjavanju vode (količina vode za osem gorivnih celic, kolikor smo jih potrebovali za napajanje ure)

3.8.1 Izračun cene kilovatne ure za baterijo

Izračunala sva vrednost energije iz ene baterije AA, ki jo lahko primerjamo z vrednostjo ene gorivne celice. Podatke sva našla na spletni strani www.mimovrste.com.

Podatki:

$$\text{Cena baterije AA} = 1 \text{ €}$$

$$e = 2400 \text{ mAh}$$

$$U = 1,5 \text{ V}$$

Račun:

$$W_e = e \cdot U$$

$$W_e = 0,0036 \text{ kWh}$$

$$\text{cena 1 kWh} = \frac{\text{cena baterije AA}}{W_e}$$

$$\text{cena 1 kWh} = 277,77 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

3.8.2 Izračun pridobljene električne energije iz ene gorivne celice

Iz že izmerjenega povprečnega električnega toka in napetosti sva najprej izračunala moč, s pomočjo katere sva nato izračunala električno energijo in ceno kilovatne ure. Celici sva dodala le sladkor.

Podatki:

$$I = 4,92 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$U = 0,37 \text{ V}$$

$$t = 1 \text{ h}$$

$$\text{Cena goriva (sladkorja)} = 0,0016 \text{ €}$$

Računi:

$$P = U \cdot I$$

$$P = 1,77 \cdot 10^{-6} \text{ W}$$

$$W_e = P \cdot t$$

$$W_e = 1,82 \cdot 10^{-6} \text{ Wh} = 1,82 \cdot 10^{-9} \text{ kWh}$$

$$\text{cena kWh} = \frac{\text{cena goriva}}{W_e}$$

$$\text{cena kWh} = 879\,120,88 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Cena kilovatne ure iz ene gorivne celice brez menjavanja vode je mnogo višja od cene kilovatne ure iz baterije AA, torej za komercialno uporabo to ni priporočljivo.

3.8.3 Izračun pridobljene električne energije za osem gorivnih celic

Za pogon električnih komponent sva uporabila zaporedne in vzporedne vezave celic, da sva dosegla večji električni tok in napetost. Vezave so prikazane na Sliki 15. Iz že izmerjenega povprečnega električnega toka in napetosti sva nato izračunala električno energijo in ceno kilovatne ure za 8 vezanih gorivnih celic, ki sva jim stalno menjavala vodo.

Podatki:

$$U = 0,9 \text{ V}$$

$$I = 120 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$t = 1,5 \text{ h}$$

$$\text{Cena goriva} = 0,0856 \text{ €}$$

Računi:

$$P = U \cdot I$$

$$P = 1,08 \cdot 10^{-4} \text{ W}$$

$$W_e = P \cdot t$$

$$W_e = 1,62 \cdot 10^{-4} \text{ Wh} = 1,62 \cdot 10^{-7} \text{ kWh}$$

$$\text{cena kWh} = \frac{\text{cena goriva}}{W_e}$$

$$\text{cena kWh} = 528\,395,06 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Cena kilovatne ure z rednim menjavanjem vode je skoraj še enkrat nižja, kot če vode ne menjamo. Je pa cena kilovatne ure nižja tudi zaradi vezav, s katerimi smo dosegli večjo električno napetost ter tok in posledično večjo moč. Je pa ta cena še vedno mnogo višja kot izračunana cena za kilovatno uro energije iz baterije AA.

4 ZAKLJUČEK

Po opravljenem eksperimentalnem delu sva se vrnila k na začetku zastavljenim hipotezam in jih analizirala.

- *S pomočjo mikroorganizmov je mogoče pridobivati električno energijo.*

Prvo hipotezo sva potrdila, saj nama je uspelo s pomočjo biokulture (*S. cerevisiae*) pridobivati električno napetost in tok.

- *S pridobljeno energijo je mogoče poganjati manjše elektronske naprave.*

Hipoteza je potrjena, saj nama je uspelo pognati LED-diodo in stensko uro s sekundnim kazalcem.

- *Z optimalnimi pogoji lahko vplivamo na delovanje biokulture in posledično na količino pridobljene električne energije.*

Hipoteza je potrjena, saj sva spremembe opazovala s sistematičnim merjenjem, ki sva ga prikazala v obliki grafov, iz katerih je očitno, da nekateri pogoji pozitivno oziroma negativno vplivajo na delovanje biokulture, ki je v najinem eksperimentu ključna.

- *Stroški pridobivanja električne energije na tak način so nižji od cene električne energije na trgu.*

Hipoteza je ovržena, saj sva s primerjavo finančnih izračunov za gorivno celico in baterijo ugotovila, da takšno pridobivanje električne energije za komercialno uporabo ni rentabilno.

Čeprav je bilo raziskovanje zanimivo, je bilo tudi zahtevno. Nujno je bilo sistematično delo, saj sva le tako lahko stvari postavila na svoje mesto in uspešno izvedla eksperiment, kot je bilo načrtovano. Ko nama je prvič uspelo pognati stensko uro in LED-diodo sva vedela, da sva na pravi poti, čeprav je ura delovala le nekaj sekund. Kasneje nama je z optimizacijo parametrov, dodatnimi meritvami, predvsem pa z vztrajnostjo uspelo, da je ura delovala kar 40 minut brez najinega dodatnega posredovanja.

Največji izziv nama še vedno predstavlja pogon večje električne naprave, poleg tega pa sva razmišljala tudi o ponovni uporabi vode v vrtnarske namene. S tem bi se stroški za pogon gorivne celice znižali. Drugi izziv pa je tudi, kako bi lahko neprestano napajala mostove s solno raztopino, da bi ura lahko delovala neomejeno brez menjave mostov. Z uresničitvijo omenjenih izzivov se bova spopadla na najini nadaljnji raziskovalni poti.

5 VIRI IN LITERATURA

- Adeib Idris, S., Nasyitah Esat, F., Abd Rahim, A. A., Zahin Rizzqi, W. A., Ruzlee, W. in Zyaid Razali, W. M. (2016). Electricity generation from the mud by using microbial fuel cell. Pridobljeno s https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2016/32/matecconf_iccpe2016_02001.pdf.
- Davison, A. (2019). What are microbial fuel cells. Pridobljeno 16. december 2019 s <http://www.altenergy.org/renewables/what-are-microbial-fuel-cells.html>.
- Kastelic Švab, M. (2019). Kvalitativne in kvantitativne metode mikrobiološkega dela. Strahinj: Biotehniški center Naklo.
- Methylene blue. (b. d.). Na [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue). Pridobljeno 17. december 2019 s https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue.
- Microbial fuel cell. (b. d.). Na [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Microbial_fuel_cell). Pridobljeno 16. december 2019 s https://en.wikipedia.org/wiki/Microbial_fuel_cell.
- Mohorič, A. in Babič, V. (2017). Fizika 3. Učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol. Ljubljana: Mladinska knjiga.
- Orožen Adamič, A. in Sernec K. (2015). Mikrobiologija. Učbenik za farmacevtske in kozmetične tehnike. Ljubljana: DZS.
- Silveira, G., Masaharu Ikegaki, M., in Schneedorf, J. M. (2017). A low-cost yeast-based biofuel cell: an educational green approach, *Green Chemistry Letters and Reviews*, 10(1), 32–41.
- Stušek, P. in Vilhar, B. (2011). Biologija celice in genetika. Ljubljana: DZS
- Yeast. (b. d.). Na [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Yeast). Pridobljeno 17. december 2019 s <https://en.wikipedia.org/wiki/Yeast>.