

# Projekt sunčane vodikove punionice za potrebe bicikala na vodik

---

**Paranos, Matej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:817543>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Matej Paranos**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Student:

Matej Paranos

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Ankici Kovač MEng. AE. što mi je omogućila da napišem ovaj rad, te na stručnim savjetima prilikom izrade.

Matej Paranos



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matej Paranos**

Mat. br.: 0035188473

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt sunčane vodikove punionice za potrebe bicikala na vodik**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of a solar hydrogen refuelling station for hydrogen powered bicycles**

Opis zadatka:

Vodikove punionice važne su za postizanje održivog gospodarstva zasnovanog na vodik u području niskouglijčnog transporta i električnih vozila na pogon vodikom. Rješenje koje će biti predstavljeno u ovom diplomskom radu donijet će tehnologiju proizvodnje vodika bez popratnih štetnih emisija ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>), a što je pristup koji nadilazi postojeću masovnu proizvodnju vodika reformiranjem fosilnih goriva.

U radu je potrebno:

1. Izraditi izvedbenu projektnu dokumentaciju kućišta punionice. S obzirom da će punionica biti instalirana na otvorenom, izvedeno kućište tijekom eksploatacije treba osigurati optimalne radne uvjete opreme unutar kućišta s obzirom na zaštitu od prokišnjavanja, pregrijavanja i smrzavanja, te zaštitu od groma, zaštitu od vjetrova i snijega, te kukaca.
2. Izraditi projekt povezivanja radnih komponenti sustava u funkcionalnu cjelinu i prostornog smještaja unutar i izvan kućišta. Radne komponente su podsustav za elektrolizu vode, podsustav za proizvodnju električne energije iz sunčeve energije pomoću fotonaponskih modula, spremnici za vodik i drugo. Svi potrebni podaci za projektiranje su raspoloživi budući su sve komponente i pripadna tehnička dokumentacija raspoloživi u Laboratoriju za energetska postrojenja.
3. Na temelju raspoloživih podataka o putnom doseg bicikla koji su dobiveni testnim vožnjama na terenu, okvirno proračunati ukupni mogući putni doseg bicikla tijekom godine dana s obzirom na prosječno raspoloživu sunčevu energiju na koordinatama punionice (FSB - Zagreb). Također je potrebno proračunati i proizvodne kapacitete korištenih komponenti sunčane vodikove punionice.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

15. studenog 2018.

Datum predaje rada:

17. siječnja 2019.

Predviđeni datum obrane:

23., 24. i 25. siječnja 2019.

Zadatak zadao: Doc. dr. sc.

Ankica Kovač, MEng. AE.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

|  |      |
|--|------|
| SADRŽAJ .....  | I    |
| POPIS SLIKA .....  | IV   |
| POPIS TABLICA.....   | VII  |
| POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....                         | VIII |
| POPIS OZNAKA .....   | X    |
| SAŽETAK.....   | XIII |
| SUMMARY .....  | XIV  |
| 1. UVOD.....   | 1    |
| 1.1. Povijest razvoja tehnologija vodika .....             | 1    |
| 1.2. Tehnologije vodika .....                              | 3    |
| 1.2.1. Proizvodnja vodika .....                            | 3    |
| 1.2.1.1. Proizvodnja vodika iz fosilnih goriva .....       | 3    |
| 1.2.1.2. Proizvodnja vodika korištenjem OIE.....           | 4    |
| 1.2.2. Pohrana vodika.....                                 | 4    |
| 1.2.3. Distribucija vodika.....                            | 5    |
| 1.2.4. Primjena vodika .....                               | 5    |
| 1.2.4.1. Primjena vodika na biciklima .....                | 6    |
| 1.2.4.2. Primjena vodika u automobilima .....              | 8    |
| 1.3. Gospodarstvo zasnovano na vodiku.....                 | 9    |
| 1.4. Projekt prve hrvatske punionice vodika.....           | 10   |
| 2. PUNIONICA VODIKA.....                                   | 12   |
| 2.1. Infrastruktura vodikovih punionica u svijetu .....    | 12   |
| 2.1.1. Vodikove autoceste .....                            | 12   |
| 2.2. Autonomna sunčana punionica vodika .....              | 14   |
| 2.3. Konstrukcija kućišta autonomne punionice vodika ..... | 15   |
| 2.3.1. Lokacija.....                                       | 15   |
| 2.3.2. Vremenski uvjeti .....                              | 17   |
| 2.3.3. Zahtjevi s obzirom na sigurnost opreme .....        | 17   |
| 2.3.3.1. Zaštita od vremenskih nepogoda .....              | 17   |
| 2.3.3.2. Zaštita od temperaturnih ekstrema.....            | 18   |
| 2.3.3.2.1. Toplinska izolacija .....                       | 18   |

---

|  |    |
|--|----|
| 2.3.3.2.2. Grijanje i hlađenje.....  | 18 |
| 2.3.3.3. Zaštita od udara groma.....   | 19 |
| 2.3.3.4. Zaštita od poplave.....   | 19 |
| 2.3.4. Zahtjevi s obzirom na sigurnost korištenja.....                             | 19 |
| 2.4. Temelji.....  | 19 |
| 2.5. Dizajn kućišta punionice.....   | 20 |
| 2.6. Izrada prijedloga projektne dokumentacije Prve hrvatske punionice vodika..... | 21 |
| 3. INSTALACIJA OPREME PUNIONICE VODIKA.....  | 23 |
| 3.1. Oprema.....   | 23 |
| 3.1.1. FN moduli.....  | 23 |
| 3.1.2. Regulator punjenja.....   | 26 |
| 3.1.3. Baterija.....   | 27 |
| 3.1.4. Naponski djelitelj.....   | 28 |
| 3.1.5. Kutija s osiguračima.....   | 29 |
| 3.1.6. Električni vodovi.....  | 29 |
| 3.1.7. Uzemljenje.....   | 29 |
| 3.1.8. Sakupljač kišnice.....  | 29 |
| 3.1.9. Vanjski spremnik vode.....  | 29 |
| 3.1.10. Prečistač.....   | 29 |
| 3.1.11. Unutarnji spremnik vode sa sustavom finog pročišćivanja.....               | 29 |
| 3.1.12. Elektrolizator.....  | 30 |
| 3.1.13. Punjač.....  | 33 |
| 3.1.14. Unutarnji spremnik vodika.....   | 35 |
| 3.1.15. Cijevi za vodu.....  | 36 |
| 3.1.16. Cijevi za vodik.....   | 36 |
| 3.1.17. Laboratorijski alkalni elektrolizator.....                                 | 37 |
| 3.1.18. LED rasvjeta.....  | 37 |
| 3.1.19. Ventilokonvektor.....  | 37 |
| 3.1.20. Mjerna oprema.....   | 37 |
| 3.2. Funkcionalna shema spajanja komponenti sustava.....                           | 37 |
| 3.2.1. Dijelovi opreme unutar kućišta.....   | 39 |
| 3.2.2. Dijelovi opreme izvan kućišta.....  | 41 |
| 4. PRVI HRVATSKI BICIKL NA VODIK.....  | 42 |
| 4.1. Projekt prvog hrvatskog bicikla na vodik.....                                 | 42 |

---

|  |    |
|--|----|
| 4.2. Testiranje kapaciteta spremnika bicikla na vodik .....                          | 43 |
| 4.2.1. Ciljevi testiranja .....  | 43 |
| 4.2.2. Lokacija.....   | 43 |
| 4.2.2.1. Lokacija Jarun.....   | 44 |
| 4.2.2.2. Lokacija FSB .....  | 44 |
| 4.2.3. Provedba testiranja.....  | 46 |
| 4.2.3.1. Prvo testiranje .....   | 46 |
| 4.2.3.2. Drugo testiranje.....   | 46 |
| 4.2.3.3. Treće testiranje.....   | 48 |
| 4.2.3.3.1. Prvi dan testiranja .....   | 48 |
| 4.2.3.3.2. Drugi dan testiranja.....   | 49 |
| 4.2.3.3.3. Treći dan testiranja.....   | 49 |
| 4.3. Rezultati testiranja.....   | 49 |
| 5. PRORAČUNI U AUTONOMNOJ PUNIONICI VODIKA .....                                     | 53 |
| 5.1. Proračun proizvodnje električne energije i proizvodnje vodika u punionici ..... | 53 |
| 5.1.1. Ulazni podaci .....   | 53 |
| 5.1.2. Model proračuna .....   | 54 |
| 5.1.3. Proračun punjenja spremnika vodika na biciklu na vodik .....                  | 58 |
| 5.1.4. Maksimalan potencijal proizvodnja vodika .....                                | 61 |
| 5.1.4.1. Proizvodni potencijal vodika prema testiranom režimu rada .....             | 61 |
| 5.1.4.2. Proizvodni potencijal vodika u maksimalnom režimu rada.....                 | 61 |
| 6. ZAKLJUČAK.....  | 63 |
| LITERATURA.....  | 64 |
| PRILOZI.....   | 67 |



## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Prvi svežanj gorivnih članaka Williama Grovea [2] .....  | 1  |
| Slika 2.  | Baconov svežanj gorivnih članaka, (1960.) [3].....   | 2  |
| Slika 3.  | Laboratorij Francisa Bacona na Zavodu za kemijsko inženjerstvo, Cambridge University (1955.) [2].....                          | 2  |
| Slika 4.  | PEM gorivni članak [7] .....   | 6  |
| Slika 5.  | Električni bicikl na pogon vodikovim gorivnim člancima, Sveučilište Malaya [8] 7   |    |
| Slika 6.  | Električni bicikl na pogon vodikovim gorivnim člancima, Sveučilište Mingdao [9] .....  | 7  |
| Slika 7.  | Električni bicikl na pogon vodikovim gorivnim člancima, Talijanska agencija za nove tehnologije, energetiku i okoliš [10]..... | 8  |
| Slika 8.  | Toyota Mirai [12] .....  | 9  |
| Slika 9.  | Hyundai NEXO [14] .....  | 9  |
| Slika 10. | Vodikova autocesta u Kaliforniji [20].....   | 13 |
| Slika 11. | Izgrađene i planirane punionice vodika u Europi (2018.) [21] .....   | 14 |
| Slika 12. | Lokacija punionice u Zagrebu [22] .....  | 16 |
| Slika 13. | Lokacija punionice na FSB-a [24].....  | 16 |
| Slika 14. | Javna punionica vodika u Grazu [25].....   | 17 |
| Slika 15. | Zaštita od kiše na vratima punionice .....   | 18 |
| Slika 16. | Temelji punionice vodika .....   | 19 |
| Slika 17. | Idejni dizajn punionice vodika .....   | 20 |
| Slika 18. | Kućište punionice vodika instalirano na lokaciji .....   | 20 |
| Slika 19. | Model punionice - pogled sa stražnje strane .....  | 22 |
| Slika 20. | Izometrijski prikaz konstrukcije punionice .....   | 22 |
| Slika 21. | Sunčani moduli.....  | 23 |
| Slika 22. | Izlazna snaga FN modula SV60-270 u periodu od 25 godina [29] .....   | 25 |
| Slika 23. | Regulator punjenja MPPT 150/70 [30] .....  | 27 |
| Slika 24. | Baterija [31].....   | 27 |
| Slika 25. | Unutarnji spremnik vode sa sustavom finog pročišćivanja.....   | 30 |
| Slika 26. | PEM elektrolizator .....   | 30 |
| Slika 27. | Komponente elektrolizatora [32].....   | 32 |
| Slika 28. | Punjač .....   | 33 |
| Slika 29. | Komponente punjača [33] .....  | 34 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 30. | Spremnik vodika.....   | 35 |
| Slika 31. | PCT krivulja spremnika [34].....   | 35 |
| Slika 32. | Priključak cijevi za vodik.....  | 36 |
| Slika 33. | LED rasvjetna tijela u punionici.....  | 37 |
| Slika 34. | Shema spajanja sustava.....  | 38 |
| Slika 35. | Pogled na poziciju opreme u kućištu s prednje strane.....  | 40 |
| Slika 36. | Pogled na opremu u kućištu sa stražnje strane.....   | 40 |
| Slika 37. | Dijelovi opreme izvan kućišta.....   | 41 |
| Slika 38. | Prvi hrvatski bicikl na vodik.....   | 42 |
| Slika 39. | Lokacija Jarun [38].....   | 44 |
| Slika 40. | Staza Jarun [39].....  | 44 |
| Slika 41. | Lokacija FSB [40].....   | 45 |
| Slika 42. | Staza FSB [41].....  | 45 |
| Slika 43. | Regulator tlaka.....   | 47 |
| Slika 44. | Baterija sustava od 13 V.....  | 47 |
| Slika 45. | Pad tlaka - prvi dan.....  | 50 |
| Slika 46. | Pad tlaka - drugi dan.....   | 50 |
| Slika 47. | Pad tlaka - treći dan.....   | 51 |
| Slika 48. | Godišnje kretanje globalnog sunčevog ozračenja $H_t$ za nagnute plohe $30^\circ$ za Zagreb.....            | 53 |
| Slika 49. | Godišnje kretanje temperature okoline T za Zagreb.....   | 54 |
| Slika 50. | Dnevna proizvodnja energije na FN modulima.....  | 55 |
| Slika 51. | Dnevne potrebe energije za grijanje.....   | 55 |
| Slika 52. | Dnevne potrebe energije za hlađenje.....   | 56 |
| Slika 53. | Dnevne potrebe energije za LED rasvjetu.....   | 56 |
| Slika 54. | Ukupne dnevne potrebe potrošača.....   | 57 |
| Slika 55. | Udjeli pojedinih potrošača u ukupnoj potrošnji.....  | 57 |
| Slika 56. | Dnevna razlika između proizvedene energije na FN modulima i potrošnje na pomoćnim sustavima punionice..... | 58 |
| Slika 57. | Ispitna linija punjenja spremnika.....   | 59 |
| Slika 58. | Zaslon elektrolizatora u radu.....   | 59 |
| Slika 59. | Promjena tlaka u odnosu na vrijeme.....  | 59 |
| Slika 60. | Proizvodnja vodika u vremenu.....  | 60 |
| Slika 61. | Promjena jačine struje na izvoru u vremenu.....  | 60 |

---

Slika 62. Promjena napona na izvoru u vremenu ..... 60

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Predviđanja kretanja broja vozila s pogonom na gorivne članke (FCEVs) [20]..          | 13 |
| Tablica 2. Vrijednosti parametara FN modula pri standardnim testnim uvjetima (STC) [29]<br>..... | 24 |
| Tablica 3. Vrijednosti parametara FN modula u točki NOCT [29].....                               | 24 |
| Tablica 4. Radni uvjeti FN modula SV60-270 [29] .....  | 25 |
| Tablica 5. Mehanički podaci FN modula [29] .....   | 25 |
| Tablica 6. Parametri regulatora punjenja MPPT 150/70 [30] .....                                  | 26 |
| Tablica 7. Parametri baterije [31].....  | 28 |
| Tablica 8. Tehničke specifikacije elektrolizatora [32] .....                                     | 31 |
| Tablica 9. Parametri napojne vode za elektrolizator [32] .....                                   | 32 |
| Tablica 10. Opis komponenata elektrolizatora [32] .....  | 32 |
| Tablica 11. Tehničke specifikacije punjača [33].....   | 33 |
| Tablica 12. Opis komponenata punjača [33].....   | 34 |
| Tablica 13. Parametri spremnika vodika [34] .....  | 36 |
| Tablica 14. Prikaz rezultata testiranja bicikla .....  | 52 |
| Tablica 15. Prikaz godišnjih iznosa energija.....  | 58 |

**POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

| BROJ CRTEŽA | Naziv iz sastavnice                |
|-------------|------------------------------------|
| -           | Kućište punionice vodika           |
| A           | Kućište - segment 'H'              |
| B           | Kućište - segment 'H'              |
| A1          | Ormarić 'H'                        |
| A2          | Vrata ormarića 'H' - desna         |
| A3          | Vrata ormarića 'H' - lijeva        |
| B1          | Ormarić '2'                        |
| 1           | Okvir kućišta 'H'                  |
| 2           | Ojačanje za kućište 'H'            |
| 2.1         | Glavni okvir 'H'                   |
| 2.2         | Pomoćni okvir 'H'                  |
| 2.3         | Ploča 'H'                          |
| 2.4         | Nosač polica 'H'                   |
| 3           | Prednja ploha 'H'                  |
| 4           | Vanjski obrub za prednju plohu 'H' |
| 5           | Brtva za vrata                     |
| 6           | Fiksna polica                      |
| 7           | Montažna polica                    |
| 8           | Desna vrata                        |
| 9           | Lijeve vrata                       |
| 10          | Zaštita od kiše                    |
| 11          | Ojačanje za vrata                  |
| 12          | Okvir kućišta '2'                  |
| 13          | Ojačanje kućišta '2'               |
| 13.1        | Okvir                              |
| 13.2        | Nosač polica - tupi kut            |
| 13.3        | Nosač polica - oštri kut           |
| 14          | Prednja ploha '2'                  |
| 15          | Vanjski obrub za prednju plohu '2' |
| 16          | Utor za poklopac ormarića '2'      |

|    |                     |
|----|---------------------|
| 17 | Brtva za poklopac   |
| 18 | Utor za punjenje    |
| 19 | Polica ormarića '2' |
| 20 | Poklopac            |
| 21 | Čep                 |
| 22 | Kutni oslonac       |
| 23 | Ravni oslonac       |
| 24 | Brtva               |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka             | Jedinica   | Opis   |
|--------------------|------------|--|
| $\beta$            | $^{\circ}$ | Upadni kut sunčevog ozračenja                                      |
| $\gamma$           | -          | Korekcijski faktor za polikristalni Si                             |
| $\Delta I_{MPP}$   | %          | Dozvoljeno odstupanje od nazivne struje FN modula                  |
| $\Delta P_{MPP}$   | W          | Dozvoljeno odstupanje od nazivne snage FN modula                   |
| $\Delta U_{MPP}$   | %          | Dozvoljeno odstupanje od nazivnog napona FN modula                 |
| $\eta_{FN}$        | %          | Učinkovitost FN modula   |
| $\eta_{GČ}$        | %          | Učinkovitost gorivnog članka                                       |
| $\eta_{MPPT}$      | %          | Učinkovitost regulatora punjenja                                   |
| $\eta_P$           | %          | Učinkovitost proizvodnje električne energije punionice vodika      |
| $A_p$              | $m^2$      | Površina presjeka  |
| B                  | $\mu S/m$  | Električna vodljivost  |
| $B_A$              | g/km       | Prosječna potrošnja goriva   |
| $D_{h,max}$        | l/kWh      | Testirana proizvodnja vodika                                       |
| $D_{h,test}$       | l/kWh      | Maksimalna proizvodnja vodika                                      |
| E                  | kWh        | Energija   |
| $E_C$              | kWh/god    | Potrebna energija za hlađenje u punionici                          |
| $E_E$              | kWh        | Energija na elektrolizatoru  |
| $E_{FN}$           | kWh/god    | Proizvedena energija na FN-u punionice                             |
| $E_H$              | kWh/god    | Potrebna energija za grijanje u punionici                          |
| $E_L$              | kWh/god    | Potrebna energija za LED rasvjetu u punionici                      |
| $E_P$              | kWh/god    | Dostupna energija za proizvodnju vodika                            |
| $H_t$              | $W/m^2$    | Globalno sunčevo ozračenje za nagnute plohe $30^{\circ}$ za Zagreb |
| $H_{ref}$          | $W/m^2$    | Referentno ozračenje za STC  |
| I                  | A          | Jakost struje  |
| $I_E$              | A          | Jakost struje na elektrolizatoru                                   |
| $I_{max,PS(FN)}$   | A          | Najveća dopuštena prekidna struja osigurača u nizu FN modula       |
| $I_{MPP}$          | A          | Nazivna snaga FN modula  |
| $I_{MPPT(nom)}$    | A          | Nazivna struja regulatora punjenja                                 |
| $I_{SC}$           | A          | Struja kratkog spoja FN modula                                     |
| $I_{SC,B}$         | A          | Struja kratkog spoja baterije                                      |
| $I_{SC,MPPT(nom)}$ | A          | Struja kratkog spoja regulatora punjenja                           |
| l                  | m          | Udaljenost   |
| $L_{max,E}$        | dB         | Maksimalna buka elektrolizatora                                    |
| $l_{max,BC}$       | m          | Maksimalan domet bicikla na vodik                                  |

|                               |         |  |
|-------------------------------|---------|--|
| $l_{\max,\max}$               | km      | Maksimalni godišnji domet bicikla za maksimalni režim rada |
| $l_{\max,\text{test}}$        | km      | Maksimalni godišnji domet bicikla za testirani režim rada  |
| $m_B$                         | kg      | Masa baterije  |
| $m_{BC}$                      | kg      | Masa bicikla na vodik                                      |
| $m_E$                         | kg      | Masa elektrolizatora                                       |
| $m_{FN}$                      | kg      | Masa FN modula   |
| $m_{HS}$                      | kg      | Masa spremnika vodika                                      |
| $m_{HS(\text{nom})}$          | g; l    | Nazivni kapacitet spremnika vodika                         |
| $m_{\text{hy},BC}$            | g       | Masa potrošenog vodika na biciklu                          |
| $m_{\text{MPPT}}$             | kg      | Masa regulatora punjenja                                   |
| $m_R$                         | kg      | Masa punjača   |
| $M$                           | Nm      | Moment   |
| $n_{S,\max}$                  | kom     | Maksimalna broj spremnika vodika za maksimalni režim rada  |
| $n_{S,\text{test}}$           | kom     | Maksimalni broj spremnika vodika za testirani režim rada   |
| $p$                           | bar; Pa | Tlak   |
| $p_A$                         | hPa     | Atmosferski tlak   |
| $p_{\text{dp},\max,HS}$       | bar     | Maksimalni tlak dopune spremnika vodika                    |
| $p_{\max,BC}$                 | bar     | Maksimalni tlak u spremniku bicikla na vodik               |
| $p_{\max,\text{hy},E}$        | bar     | Maksimalni izlazni tlak vodika iz elektrolizatora          |
| $p_{\max,HS}$                 | bar     | Maksimalni tlak spremnika vodika                           |
| $p_{\max,R}$                  | bar     | Maksimalni izlazni tlak iz punjača                         |
| $p_{\max,W}$                  | bar     | Maksimalni tlak dobavne vode                               |
| $p_{\min,BC}$                 | bar     | Minimalni očitani tlak u spremniku bicikla na vodik        |
| $p_{\min,W}$                  | bar     | Minimalni tlak dobavne vode                                |
| $p_{\text{test},\max,HS}$     | bar     | Maksimalni ispitani tlak spremnika vodika                  |
| $p_{\text{tr},BC}$            | bar     | Tlak u gumama bicikla na vodik                             |
| $P$                           | W       | Snaga  |
| $P_E$                         | W       | Snaga elektrolizatora                                      |
| $P_{E,\text{eol}}$            | W       | Snaga elektrolizatora na kraju rada                        |
| $P_{E,\text{sol}}$            | W       | Snaga elektrolizatora na početku rada                      |
| $P_{\max,R}$                  | W       | Maksimalna snaga punjača                                   |
| $P_{\text{MPPT}(\text{nom})}$ | W       | Nazivna snaga regulatora punjenja                          |
| $P_{\text{MPP}}$              | W       | Nazivna snaga FN modula                                    |
| $P_N$                         | W       | nazivna snaga FN modula                                    |
| $P_{R(\text{stby})}$          | W       | Snaga punjača u mirovanju                                  |
| $r_A$                         | %       | Relativna vlažnost zraka                                   |
| $r_{\text{dop},E}$            | %       | Dopuštena relativna vlažnost elektrolizatora               |
| $r_{\text{dop},\text{MPPT}}$  | %       | Dopuštena relativna vlažnost regulatora punjenja           |
| $r_{\text{dop},R}$            | %       | Dopuštena relativna vlažnost punjača                       |



|                    |                        |  |
|--------------------|------------------------|--|
| $R_{i,B}$          | $m\Omega$              | Unutarnji otpor baterije                       |
| $q_{max,hy,E}$     | cc/min                 | Maksimalni protok vodika iz elektrolizatora    |
| $q_w$              | l/min                  | Protok dobavne vode                            |
| $t$                | s                      | Vrijeme  |
| $t_{e,B}$          | h                      | Efektivno vrijeme vožnje bicikla               |
| $t_{u,B}$          | h                      | Ukupno vrijeme vožnje bicikla                  |
| $T$                | $^{\circ}C; ^{\circ}K$ | Temperatura                                    |
| $T_A$              | $^{\circ}C$            | Temperatura zraka                              |
| $T_{B(nom)}$       | $^{\circ}C$            | Nazivna radna temperatura baterije             |
| $T_{dp,min,HS}$    | $^{\circ}C$            | Minimalna temperatura dopune spremnika vodika  |
| $T_{max,dop,HS}$   | $^{\circ}C$            | Maksimalna temperatura spremnika vodika        |
| $T_{ref}$          | $^{\circ}C$            | Referentna temperatura                         |
| $U$                | V                      | Napon  |
| $U_{B(nom)}$       | V                      | Nazivni napon baterije                         |
| $U_E$              | V                      | Napon elektrolizatora                          |
| $U_{E(nom)}$       | V                      | Nazivni napon elektrolizatora                  |
| $U_{max,FN}$       | V                      | Maksimalan napon sustava FN modula             |
| $U_{MPP}$          | V                      | Nazivni napon FN modula                        |
| $U_{MPPT(nom)}$    | V                      | Nazivni napon regulatora punjenja              |
| $U_{OC}$           | V                      | Napon otvorenog kruga FN modula                |
| $U_{OC,MPPT(nom)}$ | V                      | Napon otvorenog kruga regulatora punjenja      |
| $U_{R(nom)}$       | V                      | Nazivni napon punjača                          |
| $v$                | m/s                    | Brzina   |
| $v_{a,BC}$         | km/h                   | Prosječna brzina vožnje bicikla na vodik       |
| $v_{max,BC}$       | km/h                   | Maksimalna brzina bicikla na vodik             |
| $V_{es,W}$         | l                      | Volumen vanjskog spremnika vode                |
| $V_{is,W}$         | l                      | Volumen unutarnjeg spremnika vode              |
| $V_{HS}$           | l                      | Volumen spremnika vodika                       |
| $V_{h,max}$        | l/god                  | Godišnji kapacitet vodika za testirane uvjete  |
| $V_{h,test}$       | l/god                  | Godišnji kapacitet vodika za maksimalne uvjete |

## **SAŽETAK**

Nakon izrade prvog hrvatskog bicikla na vodik logičan slijed događaja bila je izgradnja prve hrvatske punionice vodika kako bi se pokrile potrebe bicikla. U ovom je radu predstavljen prijedlog izvedbene projektne dokumentacije samog kućišta punionice koji svojim jedinstvenim izgledom kemijsku formulu vodikove molekule.

Ponuđen je i prijedlog povezivanja radnih komponenti sustava u funkcionalnu cjelinu s pozicijama u kućištu. Opisani su načini rada podsustava za proizvodnju električne energije preko fotonaponskih (FN) modula, te podsustava za proizvodnju vodika elektrolizom vode na samoj lokaciji. Punionica tako ispunjava zahtjeve za autonomnim radom.

U radu je dan opis testiranja bicikla na vodik s pripadajućim rezultatima koji će se puniti na novoinstaliranoj punionici. Pomoću proračuna FN modula i podataka o potrošnji bicikla predstavljeni su podaci o potencijalu proizvodnje vodika u punionici.

Ključne riječi: Vodik, Obnovljivi izvori energije, Gospodarstvo zasnovano na vodik, Punionica vodika, Bicikl na vodik, Gorivni članci, Elektrolizator

## **SUMMARY**

After making of the first Croatian hydrogen bicycle, a logical step was the construction of the first Croatian hydrogen refuelling station to meet the needs of the bicycle consumption. This work presents the proposal of the project design documentation of the hydrogen refueling station, with its unique appearance inspired by a molecular scripture of the hydrogen molecule itself.

Paper also presents the functional scheme of system components to a functional unit with the positions suggestions of every part in the housing. The subsystem for the production of electricity through the photovoltaic modules and the subsystem for the production of hydrogen by electrolysis of water at the location were described. Hydrogen refueling station thus fulfills the requirements for autonomous work.

Finally, there was description of the hydrogen bicycle testing with the corresponding results to be replenished in the newly installed hydrogen refuelling station. The calculation of photovoltaic module power production projections and bicycle consumption data were used to calculate full potential of hydrogen production in the HRS.

**Key words:** Hydrogen, Renewable energy sources, Hydrogen economy, Hydrogen refuelling station, Hydrogen bicycle, Fuel cells, Electrolyzer

## 1. UVOD

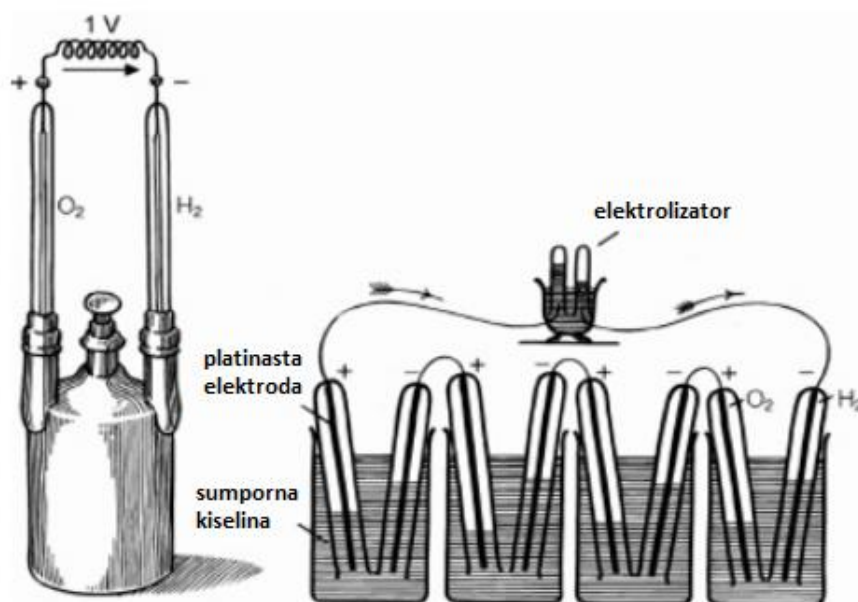
### 1.1. Povijest razvoja tehnologija vodika

Povijest razvoja vodikovih tehnologija započinje krajem 18. stoljeća, otkrićem načina proizvodnje vodika. Proces elektrolize vode otkriven je 1800. godine, kada su britanski znanstvenici William Nicholson i Anthony Carlisle opisali proces dobivanja kisika i vodika iz vode uz pomoć električne struje.

U otprilike isto vrijeme, godine 1839. velški fizičar Sir William Robert Grove, te njemačko-švicarski kemičar Christian Friedrich Schönbein dolaze do otkrića da proces elektrolize vode može biti reverzibilan, odnosno postavljaju temelje za izradu prvog gorivnog članka. Po definiciji, gorivni članak je:

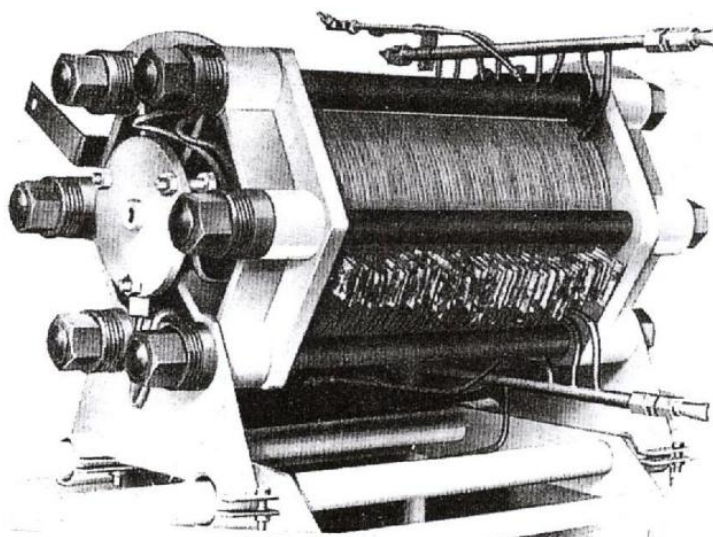
*Elektrokemijski uređaj za izravnu pretvorbu kemijske energije u električnu, bez prethodne pretvorbe u toplinsku energiju. [1]*

William Grove je tri godine kasnije i patentirao prvi funkcionalni gorivni svežanj koji se sastojao od četiri gorivna članka. Dvije elektrode od platine je stavio u epruvete te ih uronio u sumpornu kiselinu ( $H_2SO_4$ ) (Slika 1). U jednoj epruveti se nalazio kisik, a u drugoj vodik, te je tako dobio gorivni članak. Takva četiri članka je serijski spojio u svežanj koji je mogao generirati napon od oko 1 V. Svoj uređaj nazvao je 'gas battery'.



**Slika 1.** Prvi svežanj gorivnih članaka Williama Grovea [2]

Patentiranjem prvog gorivnog članka tako je nastavljen razvoj vodikovih tehnologija, jer je tako omogućena i tehnološka primjena vodika. Ipak, do primjene tehnologija u konkretnim sustavima je prošlo neko vrijeme.



**Slika 2.** Baconov svežanj gorivnih članaka, (1960.) [3]

Krajem 19. stoljeća, Friedrich Wilhelm Ostwald, njemački kemičar, koji se smatra jednim od osnivača moderne fizikalne kemije, razvio je teoriju o načinu rada gorivnih članaka. Na temelju tih istraživanja, napravljen je i prvi uspješan gorivni članak koji razvijen je 1939. godine (Slika 2). Razvio ga je britanski inženjer Francis Thomas Bacon u svome laboratoriju na Cambridgeu (Slika 3). Kao materijal za elektrode je koristio nikal, a kao gorivo čisti kisik i vodik, te otopinu kalijevog hidroksida (KOH) kao elektrolit.



**Slika 3.** Laboratorij Francisa Bacona na Zavodu za kemijsko inženjerstvo, Cambridge University (1955.) [2]

Bacon je tako postavio temelje za uporabu gorivnih članaka u praktičnoj primjeni. U prvim godinama nakon 2. svjetskog rata, tehnologija je bila dostupna samo u nekomercijalnim aktivnostima, poput svemirskih istraživanja. Tako je tijekom 60-tih godina 20. stoljeća, NASA koristila alkalne gorivne članke u svojim *Appolo* programima. Daljnjim razvojem tehnologije poboljšala se učinkovitost sustava, te su se snizili troškovi proizvodnje, tako da su se vodikove tehnologije počele koristiti i u komercijalne svrhe. To je dodatno ubrzalo razvoj gorivnih članaka koji su zbog svojih zanimljivih značajki, poput učinkovitog rada na nižim temperaturama, te niskih troškova izrade i održavanja, primamljivi tržištu.

## 1.2. Tehnologije vodika

Razlikuju se četiri bitna područja istraživanja tehnologija vodika. To su:

- proizvodnja vodika,
- pohrana vodika,
- distribucija vodika,
- primjena vodika.

Svaka od njih susreće se s vlastitim izazovima, ponajprije zbog činjenice da je vodik najmanja molekula, sastavljena od jednog protona i jednog neutrona. Zbog svojih fizikalnih parametara je *nespretna* za svakodnevnu primjenu. Stoga se tek razvojem odgovarajuće tehnologije moglo pristupiti učinkovitom iskorištavanju ove ekološki poželjne tehnologije.

### 1.2.1. Proizvodnja vodika

Vodik se danas uglavnom proizvodi korištenjem dva različita izvora:

- proizvodnja vodika iz fosilnih goriva,
- proizvodnja vodika korištenjem obnovljivih izvora energije (OIE).

Iako postoje i druge razvijene metode proizvodnje vodika, poput bio inspiriranih procesa u kojima se koriste bakterije i alge, one nisu zastupljene u većoj mjeri [4].

#### 1.2.1.1. Proizvodnja vodika iz fosilnih goriva

Vodik se iz fosilnih goriva dobiva procesom reformiranja ugljikovodika. Većina procesa bazira se na zagrijavanju ugljikovodika, te njegovom miješanju s vodenom parom i ponekad zrakom u reaktorima. Pri takvim procesima dolazi do razdvajanja molekula vode i ugljikovodika, te nastaju, vodik, ugljikov monoksid (CO) i ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) te drugi kemijski spojevi.

U takvim procesima javljaju se dva glavna problema. Prvi problem je što proizvedeni vodik nije dovoljno čist za direktno korištenje u niskotemperaturnim gorivnim člancima za primjenu u transportu. Posljednja faza reformiranja ostavlja previše CO u dobivenom vodik koji ima štetan utjecaj na anodu gorivnog članka. Iz tog razloga u ovim procesima se često primjenjuju dodatni prečistači vodika što dodatno poskupljuje proces [5].

Drugi problem je ekološke prirode. Proizvodnja vodika reformiranjem ugljikovodika uz vodik, stvara i neželjene štetne emisije CO<sub>2</sub>. To je štetan staklenički plin koji ispuštanjem u atmosferu vrši negativan utjecaj na cjelokupni okoliš, dokazano pospješuje proces globalnog zagrijavanja, te se nikako ne uklapa u ekološki prihvatljiv model ekonomije vodika. Uz CO<sub>2</sub>, u procesu nastaju i drugi štetni plinovi poput vrlo otrovnog CO, koji ipak imaju svoju primjenu u industriji [4].

Najpoznatiji proces reformiranja ugljikovodika je katalitičko reformiranje vodenom parom. Trenutno se u svijetu više od polovice vodika proizvodi isključivo tom metodom reformiranja. Najčešće se u procesima koristi prirodni plin, čiji najveći udio čini metan. Prirodni plin se najčešće zagrijava na temperaturu između 700 °C i 1 000 °C, te se pri povišenom tlaku od 3 do 25 bara miješa s vodenom parom. Kako se procesi odvijaju pri visokim temperaturama, konstrukcije reaktora su obično većih dimenzija i mase kako bi zadovoljili uvijete zadanih opterećenja [5].

U prvom dijelu procesa ugljikovodični lanci se razbijaju na atome, te vežu s molekulom kisika iz vode. Vodik iz ugljikovodika i vode se veže u zasebne molekule.



U drugom dijelu odvija se proces pretvorbe CO u CO<sub>2</sub>.



Samom procesu u pravilu se dodaju razni dodaci koji vrše funkciju katalizatora. Budući da je riječ o spojevima koji nepovoljno reagiraju sa sumporom, prije procesa katalitičkog reformiranja provodi se odsumporavanje ugljikovodika [5].

### 1.2.1.2. *Proizvodnja vodika korištenjem OIE*

Korištenjem OIE, vodik najčešće proizvodimo iskorištavanjem sunčeve energije na fotonaponskim (FN) modulima, na kojima proizvodimo električnu energiju s kojom vršimo proces elektrolize vode. Energiju potrebnu za proces elektrolize vode možemo proizvoditi i iskorištavanjem drugih oblika OIE, poput vjetra ili vode, no u stvarnosti se takvi sustavi puno rjeđe koriste [5].

Vodik proizveden na ovaj način predstavlja poželjan način proizvodnje jer se ne stvaraju štetne emisije stakleničkih plinova i drugih zagađivača. U čistom procesu proizvodnje električne energije na sunčanim modulima, nema stvaranja štetnih emisija, kao ni u procesu elektrolize vode. Molekula vode se elektrolizom rastavlja na vodik i kisik, koji također ima široku primjenu u industriji i medicini. Ovakav model se, za razliku od proizvodnje vodika iz ugljikovodika, idealno uklapa u ekološki prihvatljiv model gospodarstva zasnovanog na vodik [4].

Također, vodik se korištenjem sunčeve energije može proizvoditi i sljedećim metodama:

- direktnim fotokatalitičkim dijeljenjem vode,
- fotobiološkim dijeljenjem vode,
- te sunčanim toplinskim procesima uz prisutnost katalizatora [5].

### 1.2.2. *Pohrana vodika*

Pohrana vodika jedan je od ključnih izazova koji predstavlja glavnu prepreku šireg korištenja tehnologija vodika u svijetu industrije. Može se podijeliti na dva tipa. Prvi je masovna pohrana koja se koristi u stacionarnim sustavima, te mobilna pohrana koja se koristi u automobilima [6].

Druga podjela je s obzirom na fiziku pohrane vodika, te se tako razlikuju dva tipa pohrane:

- *atomska* pohrana vodika,
- *molekularna* pohrana vodika.

Kod atomske pohrane vodika materijal zahtjeva povrativo razlaganje molekula vodika u atome vodika i vezivanje istih atoma s rešetkom medija za pohranu.

S druge strane, postoji molekularna pohrana vodika u površinu materijala koji ima značajku mikroporoznosti. Pohrana se ostvaruje pomoću površinskih sila. Takvi materijali uključuju strukture poput nano cjevčica i roščića koji mogu imati različite oblike, dimenzije i modifikacije površine [4].

### 1.2.3. Distribucija vodika

Vodik se može transportirati na više načina:

- kao nisko komprimirani vodik (cjevovodi),
- kao visoko komprimirani vodik,
- kao ukapljeni vodik,
- u spremnicima s metalnim hidridom.

Nisko komprimirani vodik se uglavnom distribuira pomoću cjevovoda. U Europi i SAD-u postoje izgrađene stotine kilometara cjevovoda za vodik. Ovakvi sustavi pokazali su u SAD-u duplo veću učinkovitost u transportu energije od prijenosa električne energije njihovom električnom mrežom.

Visoko komprimirani i ukapljeni vodik se distribuiraju u bocama. Glavna prednost ovakvog oblika transporta je veća mobilnost i cijena investicije, s obzirom na to da za razliku od sustava cjevovoda nema potreba za razvijenom infrastrukturom. Također, na taj se način transportiraju i spremnici s metalnim hidridom.

### 1.2.4. Primjena vodika

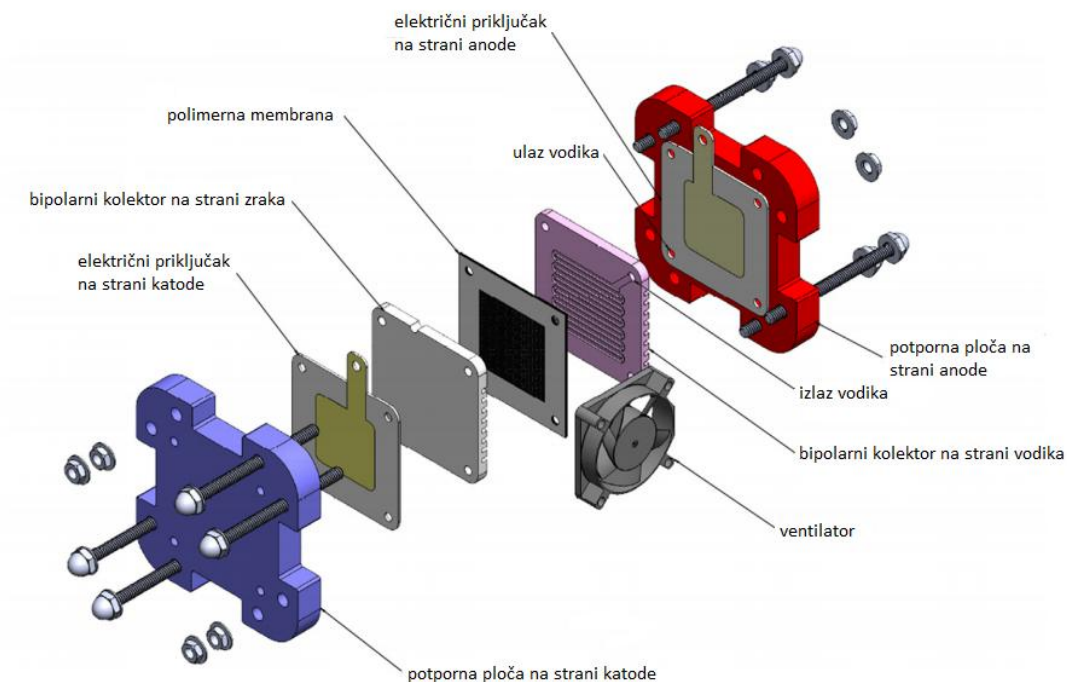
Vodik se kao gorivo može koristiti u motorima s unutarnjim izgaranjem kao i plinskim turbinama, a može se i miješati s prirodnim plinom te spaljivati u generatorima pare. Primjenjuje se i u kemijskoj industriji te kućanstvima, ali s aspekta vodikove ekonomije posebno je zanimljiva njegova primjena u gorivnim člancima [4]. Vodik se u gorivnim člancima koristi u tri različita oblika:

- primjena u stacionarnim sustavima,
- primjena u prijenosnim sustavima,
- primjena za pogon vozila.

Primjenom vodika u gorivnim člancima stacionarnih sustava ostvaruje se visoka učinkovitost, te mogućnost decentraliziranog generiranja električne i toplinske energije. Mogu se koristiti niskotemperaturni ili visokotemperaturni gorivni članci. Prednost niskotemperaturnih gorivnih članaka je njihovo relativno brzo uključivanje u sustav, dok visokotemperaturni gorivni članci ostvaruju kvalitetnu toplinsku energiju pogodnu za iskorištavanje u daljnjim toplinskim procesima, poput primjerice kogeneracije ili za pokrivanje toplinskih potreba nekog drugog segmenta u postrojenju [5].

Kod primjene u napajanju mobilne elektronike poput prijenosnih računala, video kamera i mobilnih telefona, zahtjevi na gorivne članke postaju složeniji. Za rad je potrebna niska temperatura, te se stoga koriste gorivni članci s protonski izmjenjivom membranom (PEM; Engl. Proton exchange membrane) (Slika 4), dok ostali tipovi nisu pogodni za korištenje. Kao spremnici vodika, koriste se spremnici s komprimiranim vodikom ili metalni hidridi [5].





**Slika 4.** PEM gorivni članak [7]

Glavni problem gorivnih članaka u vozilima predstavlja ograničeni prostor vozila u kojemu oni moraju biti sklopljeni. Zbog toga se pretežito koriste PEM gorivni članci, dok se alkalni koriste rjeđe. Zbog vode u sustavu, javlja se problem s pokretanjem sustava pri temperaturama nižim od 0 °C, no komercijalni PEM sustavi u pravilu su operabilni do -30 °C. Gorivni članci su se pokazali kao vrlo spretno rješenje u primjeni u električnim vozilima. Njihova najznačajnija primjena je u osobnim automobilima, ali se razvijaju i drugi oblici prijevoznih sredstava s pogonom na gorivne članke poput kamiona, autobusa, radnih strojeva, vlakova, brodova, pa čak i podmornica [5].

#### 1.2.4.1. Primjena vodika na biciklima

Električni bicikli su čest izbor prilikom znanstvenih istraživanja na području vodikovih tehnologija. Znanstvenici koji se bave proučavanjem ove tehnologije često su suočeni s neadekvatnim financijskim sredstvima potrebnim za provedbu kvalitetnih istraživanja. Upravo iz tog razloga, se često okreću električnim biciklima kao relativno jeftinom tipu vozila, na kojemu je moguće instalirati sustav gorivnih članaka sa spremnikom vodika, koji se suštinski ne razlikuje previše od većeg sustava na automobilu.

Posebno se to odnosi na zemlje u kojima je razvoj tehnologija vodika tek u povojima. Visoko industrijalizirane i razvijene zemlje s bogatim gospodarstvima davno su prešle ovu fazu razvoja, te s tehnologijama vodika rade na industrijskim razinama, dok u manjim gospodarstvima, među kojima slobodno možemo smjestiti i Hrvatsku, sustavi vodika na električnim biciklima predstavljaju izvrstan način početka razvoja.



**Slika 5.** Električni bicikl na pogon vodikovim gorivnim člancima, Sveučilište Malaya [8]

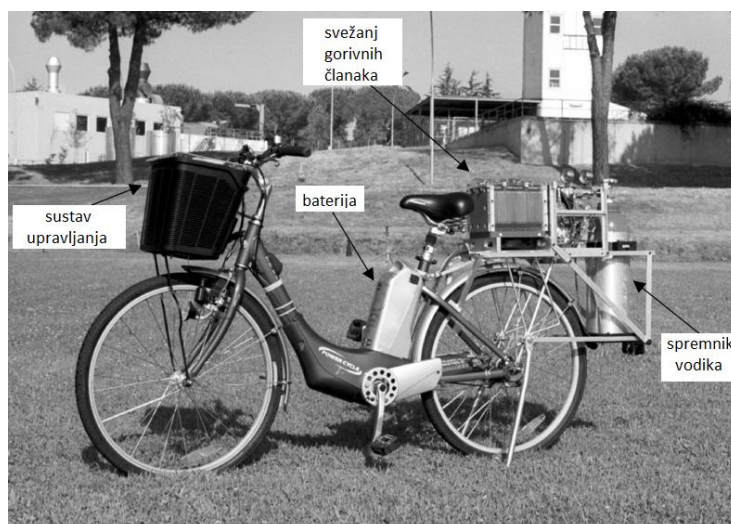
Jedan od takvih primjera je bicikl napravljen u sklopu projekta Prvi hrvatski bicikl na vodik o kojemu će biti detaljnije riječi u nastavku rada. Sličan primjer je i primjer bicikla s vodikovim sustavom s Fakulteta strojarstva iz Kuala Lumpura, na kojemu su rađena brojna testiranja (Slika 5). Kao primjer razvoja tehnologije u nekoj zemlji su zemlje koje su početkom 21. stoljeća radile testiranja na električnim biciklima, da bi danas, od 15 do 20 godina kasnije, imali vodikovu tehnologiju razvijanu na zavidnoj razini. U Razvojnom centru za napredne znanosti i tehnologiju, Sveučilišta Mingdao u Republici Kini (Tajvan) 2004. godine razvijen je električni bicikl sa svežnjem gorivnih članaka od 300 W (Slika 6).



**Slika 6.** Električni bicikl na pogon vodikovim gorivnim člancima, Sveučilište Mingdao [9]

Učinkovitost svežnja gorivnih članaka električnog bicikla iznosila je 35%, te je bicikl ostvarivao takvu potrošnju da je za jedan gram vodika mogao preći udaljenost od 1,34 km [9].

Drugi takav primjer je električni bicikl razvijen u Italiji 2002. godine sa svežnjem gorivnih članaka od također 300 W (Slika 7). Razvila ga je talijanska agencija za nove tehnologije, energiju i ekologiju te su primjenom tehnologije gorivnih članaka kasličnom električnom biciklu dometa 25 km, uspjeti povećati domet na impresivnih 120 km [10].



**Slika 7.** Električni bicikl na pogon vodikovim gorivnim člancima, Talijanska agencija za nove tehnologije, energetiku i okoliš [10]

Ovakvi primjeri iz Tajvana i Italije, pokazuju sav potencijal ispitivanja gorivnih članaka na biciklima, te moraju biti ohrabrenje za daljnja ulaganja zemljama poput Hrvatske.

#### 1.2.4.2. Primjena vodika u automobilima

U svijetu autoindustrije vodikove tehnologije počele su se razvijati u devedesetim godinama 20. stoljeća. Prvi produkti toga rada postali su vidljivi početkom 21. stoljeća kada su počeli izlaziti prvi automobili s gorivnim člancima, tzv. FCEV (eng. Fuel Cell Electric Vehicle) automobili. Već 2015. predstavljeni su i prvi serijski FCEV automobili. Riječ je o Toyoti Mirai (Slika 8), automobilu koji je revolucionizirao tržište automobila s pogonom na gorivne članke. Do danas je prodano preko nekoliko tisuća primjeraka ovog vozila. Zahvaljujući predanom radu i razvoju novih tehnologija, inženjeri i stručnjaci u Toyoti uspjeli su postići impresivne značajke za električni tip vozila koji su omogućili veliku popularnost Toyote Mirai. Elektromotor od 114 kW ne proizvodi štetne emisije CO<sub>2</sub>, dok dva spremnika vodika omogućavaju ukupan domet od preko 500 km. I po pitanju same brzine punjenja spremnika ovaj automobil konkurira automobilima s dizel i benzinskim motorima, dok je ispred klasičnih električnih automobila s litij ionskom baterijom daleko ispred [11].

Njegov glavni nedostatak u odnosu na konkurenciju, kako u odnosu na električne automobile s baterijama, tako i u odnosu na vozila koja koriste fosilna goriva, je nedostatak svih automobila na vodik, a to je nedostatak izgrađene vodikove infrastrukture. Drugim riječima, glavni problem vodikovih vozila je što ih se komotno može voziti samo u određenim dijelovima svijeta, koji podržavaju ovakav način pohrane energije.



**Slika 8.** Toyota Mirai [12]

Nakon Toyote Mirai i druge automobilske kompanije su počele predstavljati svoje automobile sa sličnim značkama. No trebalo je dočekati 2018. godinu kada je Hyundai, kompanija, koja je predstavila i prvi funkcionalni automobil na vodik, predstavila Hyundai Nexo (Slika 9). Riječ je o automobilu čiji domet prelazi 600 km, a maksimalna brzina iznosi 179 km/h, čime je napravljen značajan iskorak i u ovom segmentu [13].



**Slika 9.** Hyundai NEXO [14]

Uz motor maksimalne snage od 120 kW i okretnog momenta od 395 Nm, Nexo pokriva široki spektar potencijalnog tržišta odgovarajući na različite zahtjeve korisnika [13].

### 1.3. Gospodarstvo zasnovano na vodik

Gospodarstvo zasnovano na vodik (engl. Hydrogen Economy) i vodikovim tehnologijama, sinonim je za održivi energetska sustav u kojemu čisti vodik zamjenjuje fosilna goriva na bazi ugljikovodika. Vodik je čist, koliko je čista i energija pomoću koje se proizvodi. Upravo zato, gospodarstvo zasnovano na vodik ima smisla jedino u slučaju kada vodik proizvodimo na ekološki prihvatljiv način, bez stvaranja popratnih štetnih emisija CO<sub>2</sub> i drugih zagađivača, a to je proizvodnja vodika elektrolizom vode korištenjem OIE. Prvenstveno, kao idealan izvor energije nametnula se sunčeva energija, koja se preko FN modula može adekvatno iskoristiti za proces elektrolize vode.

U kontekstu intermitentne sunčeve energije, važna značajka vodika je da je pogodan spremnik, odnosno nosilac energije. Zbog toga bi vodik i vodikove tehnologije, zajedno s svim ostalim oblicima ekološki prihvatljive tehnologije, mogao uspješno zamijeniti fosilna goriva. Takav razvoj i planiranje gospodarstva ima uporište u poznatom cilju Europske Unije (EU) u pogledu dugoročne energetske politike kada su u pitanju OIE. Cilj poznat kao plan 20-20-20, predstavlja ideju smanjenja emisija stakleničkih plinova za 20%, povećanje udjela proizvodnje energije iz OIE na 20%, te ostvarivanje ušteda u primarnoj energiji u usporedbi s planiranom proizvodnjom u iznosu od 20%, do 2020. godine. Ovakav stav i plan razvoja dodatno je potvrđen Pariškim sporazumom iz 2015. godine, kojim se, između ostaloga i korištenjem novih tehnologija poput vodikovih, želi smanjiti rast globalne prosječne temperature. Energetski sustav temeljen na fosilnim gorivima je neodrživ s ekološkog aspekta, tako da je prijelaz na održivi energetski sustav izgledan u desetljećima koja slijede.

Gospodarstvo zasnovano na vodiku u tom kontekstu ima važnu ulogu. No, tek s punom integracijom distributivnih mreža OIE sa sustavima za proizvodnju i pohranu vodika, te trošilima. Pritom se treba voditi činjenicom da se proizvodi čisti vodik. Glavna prepreka u tom segmentu je cijena proizvodnja vodika reformiranjem koja je tri puta niža od cijene proizvodnje vodika elektrolizom vode. No usporedno s razvojem tehnologije, padat će i cijena proizvodnje vodika elektrolizom vode [4].

Razvoj tehnologija vodika, zajedno s razvojem drugih alternativnih goriva i vozila poput hibridnih, plug-in i potpuno električnih vozila, pozicionira gorivne članke i vodik kao jednu od opcija koje stoje na raspolaganju u širem napretku prema niskougljičnim energetskim sustavima. Gledano s tog aspekta, gospodarstvo zasnovano na vodiku ne predstavlja samo neku bolju budućnost, već i prihvatljiviju sadašnjost. Jasno je da vodik i gorivni članci neće riješiti sve ekološke i energetske probleme današnjice, ali ima potencijala postati važan dio u cjelokupnoj slici održive energetike. Gospodarstvo zasnovano na vodiku tako predstavlja idealan primjer zdravog i ekološkog razmišljanja u smjeru održivog razvoja, kojega prihvaća sve veći broj ljudi širom svijeta, te utječe na njihovu svakodnevnicu [15].

#### **1.4. Projekt prve hrvatske punionice vodika**

Projekt prve hrvatske punionice vodika zamišljen je kao nastavak razvoja tehnologije vodika u Hrvatskoj, nakon uspješnog projekta prvog hrvatskog bicikla na vodik. Proglašen je najboljim projektom u kategoriji *Inovacije* donacijskog natječaja Hrvatskog Telekoma, koji je omogućio realizaciju projekta. Voditeljica projekta je docentica dr. sc. Ankica Kovač, ujedno i voditeljica Laboratorija za energetska postrojenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB) u Zagrebu na kojemu se projekt i realizira [16].

Projekt ima za cilj iskorištenje potencijala u nekoliko različitih područja djelovanja:

- istraživačko-znanstveni potencijal,
- edukacijski potencijal,
- marketinški potencijal,
- gospodarski potencijal.

Prije svega, ovaj projekt zamišljen je kao autonomna sunčeva punionica vodika, te stoga on predstavlja prvi infrastrukturni iskorak vodikovih tehnologija u Hrvatskoj. Sama mogućnost razvoja i primjene novih tehnologija u kompleksnim sustavima omogućava daljnji napredak u pogledu prihvaćanja i korištenja takve tehnologije. Svakako, punionica će omogućiti i sigurniji izvor goriva za bicikl na vodik, te će se na njemu moći provesti veći broj testiranja i

istraživanja. Također, sam projekt predstavlja iduću fazu razvoja koja se neposredno naslanja na razvoj bicikla na vodik, te je jedan značajan korak prema krajnjem cilju - prvom hrvatskom automobilu za vodik.

Značajnu vrijednost samom projektu daje činjenica da će generacije budućih studenata energetike imati priliku raditi i učiti na konkretnom primjeru tehnologija vodika, te se tako pokušava stati na kraj dosadašnjoj praksi teorijskog učenja bez prilike konkretnog doživljaja same tehnologije. Također, sam projekt idejno je zamišljen kao generator drugih manjih projekata koji će doći u budućnosti te omogućava izradu brojnih završnih i diplomskih radova, kao i mogućnost brojnih drugih istraživanja.

Da projekt ima ogroman promidžbeni potencijal, potvrđuje sam interes sponzora koji potpomažu realizaciju projekta, te ako je suditi prema marketinškom rezultatu koji je ostvario projekt prvog hrvatskog bicikla na vodik, punionica zaista ima ogroman potencijal. Budući da projekti povezani s novim tehnologijama, čistim okolišem i zdravijim životom privlače veliki interes javnosti i medija, ideje zaštite okoliša i održivog energetskeg sustava lakše pronadu put do krajnjeg korisnika te tako podižu svijest o opasnostima sadašnjeg neodrživog energetskeg sustava. A upravo su te ideje glavni razlog razvoja tehnologija u sprezi s OIE.

Isto tako, valja napomenuti kako sam projekt može ostvariti pozitivan utjecaj na razvoj vodikovih tehnologija u Hrvatskoj i u proizvodnom sektoru. Upravo zbog velikog interesa javnosti, može doći i do interesa poduzetnika koji će prepoznati potencijal proizvodnje nekih određenih segmenata iz sektora koji će upravo zbog punionice biti ohrabreni krenuti s radom u tom smjeru.

## 2. PUNIONICA VODIKA

### 2.1. Infrastruktura vodikovih punionica u svijetu

Infrastruktura vodikovih punionica počela se razvijati krajem 20. stoljeća, da bi pravi razvoj počeo početkom 21. stoljeća. Kako je korištenje vozila s gorivnim člancima vodika bilo ograničeno na pojedine industrijske pogone, stvarne potrebe za javnim punionicama nije bilo. Tek povećanjem svijesti o ekološkim problemima te razvojem ekološki prihvatljivijih tehnologija poput, vodikovih tehnologija, dolazi do razvoja i automobila s gorivnim člancima, te se pojavljuje potreba za većim brojem punionica vodika.

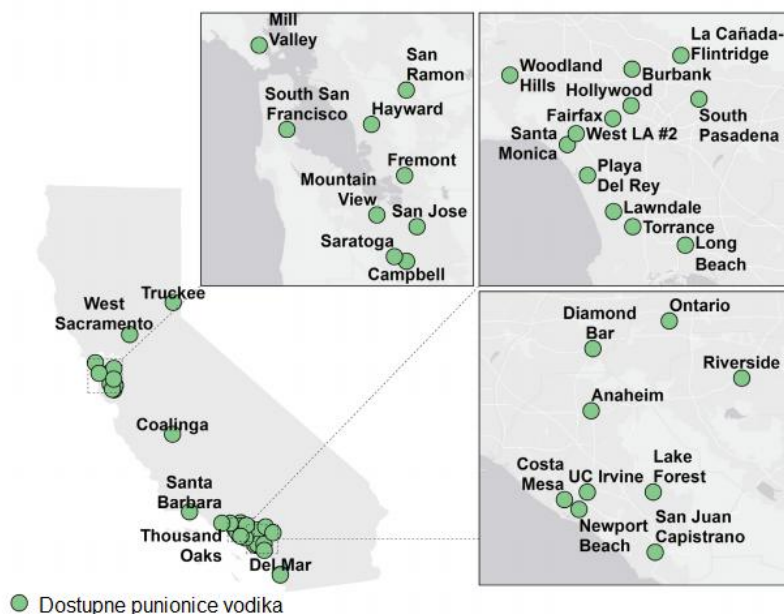
Prema podacima iz veljače 2017. godine, u svijetu je bilo instalirano preko 270 punionica vodika, a uočljiv je bio i ubrzani trend rasta broja otvorenih punionica iz godine u godinu. Tako je prema prikupljenim podacima rekordna bila 2016. godina s preko 90 instaliranih punionica diljem svijeta. Kako broj punionica raste iz tjedna u tjedan teško je točno odrediti koliko je trenutno aktivnih punionica, no ukoliko bi se vodili podacima koji govore o rastu broja instaliranih punionica iz godine u godinu, može se pretpostaviti da je u svijetu trenutno aktivno više od 300 punionica vodika, te s velikim brojem novih projekata u izgradnji. Svakako valja napomenuti da se određene regije svijeta ističu većim brojem instaliranih punionica na svojem području, dok se u pojedinim dijelovima svijeta tehnologija niti ne koristi. Na taj su način stvorene zone kretanja u kojima korisnici mogu komforno koristiti svoja električna vozila s pogonom na gorivne članke koje se popularno nazivaju i vodikovim autocestama (engl. Hydrogen Highways). U tim dijelovima svijeta, automobilima na vodik omogućena je izravna konkurencija s ostalim oblicima električnih vozila, te vozilima s pogonom na fosilna goriva. Najznačajniji dijelovi svijeta, po pitanju izgrađenosti vodikove infrastrukture su Japan, Europa i Zapadna obala SAD-a [17].

#### 2.1.1. Vodikove autoceste

Vodikova autocesta predstavlja lanac vodikovih punionica i druge popratne vodikove infrastrukture izgrađene uz prometnice i autoceste. Punionice nisu striktno vezane za jednu određenu autocestu, već se mogu nalaziti i u gradovima, instalirane na više lokacija. Bitno je da su međusobno prometno povezane i da tvore određenu zonu kretanja u kojoj se s vozilom na vodik može komotno kretati na udaljenosti većoj od dometa jednog prosječnog spremnika vodika u automobilu. Izgrađenost vodikove infrastrukture donekle prati broj registriranih vozila na vodik u svijetu. Prema istraživanjima iz 2017. godine, u svijetu se trenutno nalazi oko 6 500 automobila na vodik, od čega 53% u SAD-u, 38% u Japanu, te 9% u Europi. Upravo su te tri regije glavne predvodnice u izgrađenosti vodikovih autocesta [18].

Predvodnik primjene vodikovih tehnologija svakako je Japan. Dvije vodeće svjetske automobilske kompanije u kategoriji vodikovih vozila, uz južnokorejski Hyundai, upravo su japanske Toyota i Honda. Trenutno u Japanu postoji oko 90 instaliranih punionica koje tvore vjerojatno najkvalitetniju vodikovu autocestu na svijetu, s obzirom na provjerenu tehnologiju, poticaje na gorivo te komfor korisnika. U planovima razvoja Japana želja je da do 2021. godine osiguraju infrastrukturu od 160 vodikovih punionica koje bi trebale opskrbljivati predviđenih 40 000 vozila na njihovim cestama. Uz ovaj kratkoročan plan, postavljeni su i ciljevi za 2030. godinu kada Japan planira izgraditi infrastrukturu od 900 punionica vodika dostatnih za 800 000 vozila [19].

Uz Japan, druga najznačajnija lokacija nalazi se u SAD-u, točnije na njenoj zapadnoj obali u državi Kalifornija (Slika 10). Kalifornija je već u drugoj polovici 20. stoljeća postala vodeća svjetska lokacija za OIE, a svoju tradiciju ekološke osviještenosti prenijela je ina vodikove tehnologije. Trenutno je u Kaliforniji razvijena mreža od 36 punionica vodika, zaključno s 2018. godinom, a u izradi je još njih 25, koje bi većinom trebale biti završene 2019. godine ili koji mjesec kasnije [20].



**Slika 10.** Vodikova autocesta u Kaliforniji [20]

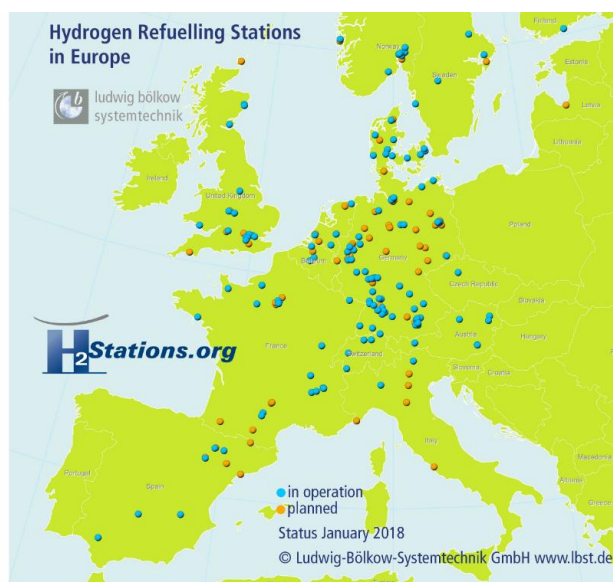
U Sjevernoj Americi, osim u Kaliforniji, razvijaju se vodikove autoceste na istočnoj obali, te u Britanskoj Kolumbiji u Kanadi, no riječ je o dosta skromnijem broju punionica. Ipak, u SAD-u žele značajno ubrzati razvoj vodikove infrastrukture. Već do kraja 2020. godine u Kaliforniji bi mreža punionica trebala dostići brojku od 64 punionice. Također, prema istraživanjima simulacijama kretanja broja vozila na vodik u SAD-u, koje je Locations Roadmap Working Group napravila u studenome 2017. godine, očekuje se ogroman porast vozila na vodik u godinama koja slijede (Tablica 1). Iako rezultate takvih simulacija uvijek valja uzeti s rezervom, ona zasigurno ukazuju na tendenciju ogromnog rasta broja vozila u idućih dvadesetak godina. Kako bi odgovorili na takve izazove, SAD razvijaju ozbiljne planove proširenja uspješne kalifornijske vodikove autoceste na prostor čitave države koristeći stečena znanja i iskustva proteklih godina [20].

**Tablica 1.** Predviđanja kretanja broja vozila s pogonom na gorivne članke (FCEVs) [20]

| Godina | Predviđeni broj FCEV na cestama u SAD-u | Predviđeni broj punionica vodika za pokrivanje potreba vozila na vodik |
|--------|---|--|
| 2025   | 200 000                                 | 570  |
| 2035   | 4 500 000                               | 3 300  |
| 2050   | 61 000 000                              | 21 000   |



Kada je u pitanju Europa, lako se može uočiti kako pojam vodikove autoceste ne odgovara nekom klasičnom poimanju postavljanja vodikovih punionica uzduž nekog prometnog pravca, kao što je to bio slučaj u Japanu i Kaliforniji. Vidljivo je da se u Europi radi o isprepletenoj mreži vodikovih autocesta koje tvore jednu disperziranu mrežu punionica (Slika 11). Kako svaka zemlja razvija svoju infrastrukturu, može se kazati da je europska mreža punionica spoj više vodikovih autocesta. Jedna od najpoznatijih je Skandinavska vodikova autocesta, dok je najviše punionica instalirano u Njemačkoj. Sam razvoj vodikove infrastrukture prelazi granice EU, no to se prvenstveno odnosi na zapadni dio Europe.



**Slika 11.** Izgrađene i planirane punionice vodika u Europi (2018.) [21]

U drugim dijelovima svijeta, tehnologija vodika još dostigla takvu razinu razvoja da bi mogli razmatrati vodikove autoceste, no postoje razvijene punionice vodika. Po pitanju Hrvatske, posebno je interesantna primjena tehnologije na otocima, gdje se uz OIE, dovodi čisto gorivo za vozila koje ne treba popratnu infrastrukturu, ako se vodik proizvodi na licu mjesta. Tako se omogućava komotnije korištenje vozila stanovništvu, koje je za potrebe korištenja vozila na fosilne gorive moralo transportirati gorivo iz drugih dijelova zemlje, jer punionice na takvim otocima ne postoje.

## 2.2. Autonomna sunčana punionica vodika

Projekt prve hrvatske punionice vodika idejno je osmišljen kako bi se napravio prototip potpuno autonomne sunčane punionice vodika, s krajnjim ciljem omogućavanja izrade takvih ili sličnih punionica u većem broju, te njihovog korištenja u Hrvatskoj. Dakako, put od prototipa do konačnog proizvoda nije jednostavan i jasno je da će nakon predstavljanja prototipa biti potrebno puno rada, razvoja i unaprjeđivanja modela kako bi se stvorio zadovoljavajući konačan proizvod.

Da bi prototip ispunio svoju svrhu, on mora zadovoljiti kriterij autonomnosti, odnosno punionica mora omogućiti normalno korištenje svima, neovisno od stanja elektroenergetskog sustava, vremenskih prilika, doba dana ili godine, stanja gradskih instalacija i slično. Također, punionica mora omogućiti korisniku jednostavno i sigurno korištenje. Zbog toga je ova punionica zamišljena kao punionica gdje se vodik, kao gorivo, proizvodi na licu mjesta pomoću vlastitog izvora energije, i bez dovoda sirovine za proizvodnju putem gradskih instalacija.

Budući da je punionica rađena u skladu s principima održivog gospodarstva, i dio je gospodarstva zasnovanog na vodiku koje uvjetuje korištenje OIE u proizvodnji vodika, kao izvor energije za rad punionice izabrano je Sunce. Putem FN modula, sunčeva se energija direktnom pretvorbom preko FN modula pretvara u električnu energiju, te se putem baterijskog i regulacijskog sustava dostavlja svim komponentama sustava kojima je za rad potrebna električna energija. Voda koja se koristi u elektrolizatoru je pročišćena i deionizirana voda. Punionica je kao potpuno autonomni sustav zamišljena tako da sakuplja kišnicu, te putem filtera i katalizatora dovede vodu u potrebno stanje za korištenje u elektrolizatoru. Samo voda odgovarajuće kvalitete je pogodna za proizvodnju vodika u dužem vremenskom periodu, s obzirom da u protivnom dolazi do onečišćenja i oštećenja opreme.

Ovakvom izvedbom, punionica neće ovisiti o stanju elektroenergetske mreže, niti o ispravnosti vodovodnih instalacija, te će ju biti moguće koristiti i na mjestima bez izgrađene adekvatne infrastrukture, poput naselja na manjim otocima, gdje tehnologija vodika ima veliki potencijal kako u gospodarskom, tako i u turističkom pogledu.

### **2.3. Konstrukcija kućišta autonomne punionice vodika**

Konstrukcija kućišta punionice vodika važan je dio izrade same punionice. Prije svega sam doticaj korisnika s punionicom vezan je upravo preko kućišta, budući da korisnik nema pristup ostalim dijelovima opreme koja se nalazi unutar kućišta, a komponente poput sunčanih panela su često na povišenim mjestima koja nisu vidljiva s pozicije samog unosa goriva. Stoga je nerijetko, percepcija kućišta u očima korisnika percepcija same punionice. S tom činjenicom na umu, potrebno je projektirati samo kućište, te pritom zadovoljiti sljedeće kriterije:

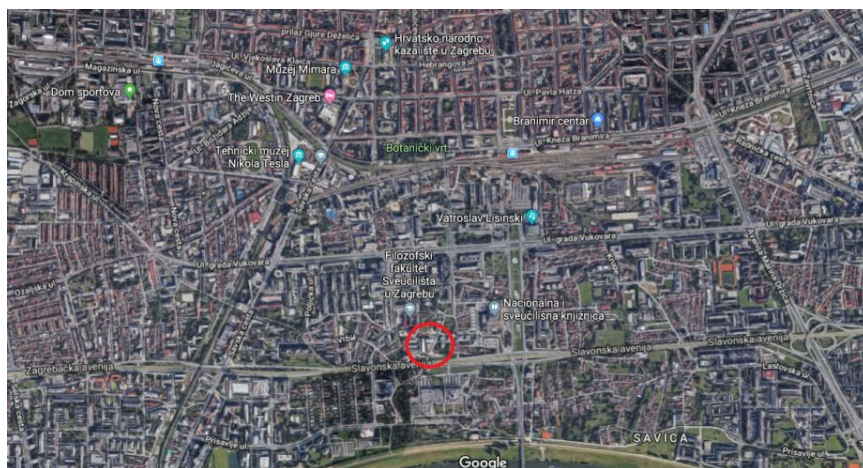
- kućište punionice mora zaštititi sve dijelove opreme,
- kućište mora biti izvedeno tako da osigura funkcionalnost punionice,
- kućište mora osigurati običnom korisniku što jednostavniju primjenu punionice,
- kućište mora biti estetski privlačnog dizajna i dobro izrađeno.

Vjerojatno najvažniji parametar je zaštita svih komponenti sustava koje se nalaze unutar kućišta punionice. Kako je riječ o financijski izdašnom projektu s vrijednom opremom, posebna se pažnja mora posvetiti sigurnosti opreme kako ne bi došlo do kvara. S jedne strane, unutar samog kućišta, komponente moraju biti kvalitetno posložene kako jedan element sustava ne bi štetno utjecao na drugi. Primjer za to je blokiranje prolaza zraka za hlađenje ukoliko se prepreka nalazi ispred ventilatora određenog elementa.

Druga opasnost koja prijete punionici su vremenski uvjeti. Kućište mora biti otporno na sve vrste vremenskih nepogoda koje mogu ugroziti opremu. Isto tako, niske temperature ispod ništice tijekom zime, kao i visoke tijekom vrućih ljetnih dana mogu prouzročiti ozbiljnu štetu na opremi. Kao i kod svakog sustava, mjere zaštite treba kvalitetno optimizirati, budući da svaka lokacija u svijetu ima svoje specifičnosti, te će se mjere prilagođavati određenoj lokaciji. Upravo zato, izbor same lokacije, te dobro poznavanje uobičajenih vremenskih prilika, temelj su pripreme svakog kvalitetnog projekta ovakve vrste.

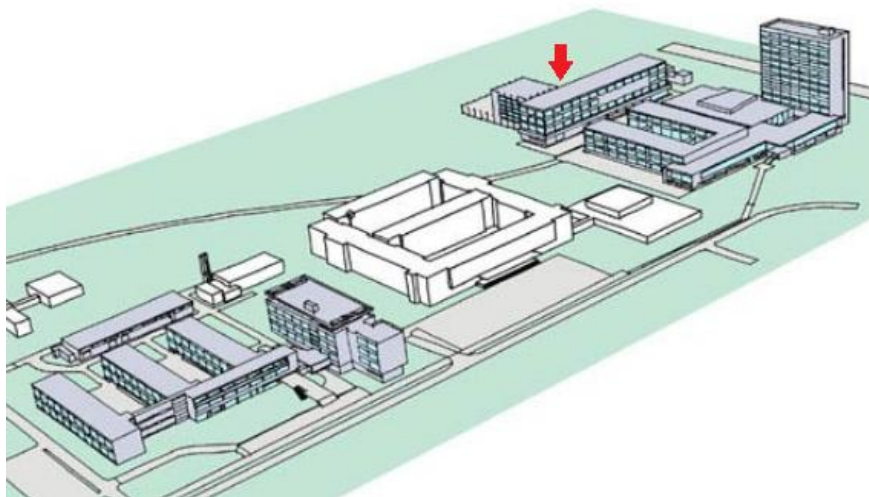
#### **2.3.1. Lokacija**

Punionica je postavljena u Zagrebu, u sklopu FSB-a (Slika 12), i to ispred zgrade Laboratorija za energetske postrojenja (Slika 13), u kojemu se i razvija pod okriljem Zavoda za energetska postrojenja, energetiku i okoliš.



**Slika 12.** Lokacija punionice u Zagrebu [22]

S obzirom na to da infrastruktura vodika u Hrvatskoj ne postoji, a niti nije detaljno predviđena strategijom energetskeg razvoja Republike Hrvatske, Zagreb kao glavni i najveći grad, postaje tako grad primjer i predvodnik u postavljanju temelja za daljnji razvoj vodikove infrastrukture na državnoj razini [23].



**Slika 13.** Lokacija punionice na FSB-a [24]

Kako je cjelokupni projekt osmišljen, među ostalim, i kao edukacijski i razvojni projekt na kojem će moći raditi sadašnji i budući studenti energetike, apsolutno je opravdano da punionica bude instalirana ispred zgrade Laboratorija za energetska postrojenja u kojemu se projekt razvija, a koji je i baza razvoja vodikovih tehnologija korištenjem OIE.

Kada se pogleda šira slika punionica u Europi (Slika 11) vidljivo je da u bližoj okolini nema niti jedne izgrađene punionice.



**Slika 14.** Javna punionica vodika u Grazu [25]

Najbliža javna punionica vodika nalazi se u Grazu (Slika 14), udaljenom 145 km zračne linije, odnosno 180 km cestovne linije od Zagreba. Također, gotovo sva infrastruktura se nalazi u zapadnijem dijelu Europe. Izgradnjom punionice, Zagreb tako otvara vrata prema jugoistoku Europe. Valja također napomenuti kako sama punionica neće svojim otvaranjem odmah biti primjenjiva punjenju komercijalnih automobila s pogonom na gorivne članke, no ostvario bi se značajan korak u tom smjeru.

### **2.3.2. Vremenski uvjeti**

Glavnu prepreku svakog projekta na otvorenom predstavljaju vremenski uvjeti. Kućište punionice u kojemu s pohranjeni najosjetljiviji dijelovi opreme, moraju biti adekvatno zaštićeni od svih vremenskih nepogoda. Najveći problem predstavljaju obilne oborine poput kiše, te ekstremno visoke i niske temperature. Klima u Gradu Zagrebu je umjereno kontinentalna, s vrućim i suhim ljetima te hladnim zimama. Padaline mogu biti obilne i dugotrajne tijekom jeseni, te nagle i snažne tijekom ljetnih nevremena. Najveće probleme pak predstavljaju visoke temperature ljeti koje nerijetko prelaze 30 °C, te niske zimi koje mogu pasti ispod -10 °C. Najveći temperaturni rekord izmjeren u Zagrebu iznosi 40,4 °C izmjeren 5. srpnja 1950. godine, a najveći negativni -27,3 °C izmjeren 17. veljače 1956. godine [26][27].

### **2.3.3. Zahtjevi s obzirom na sigurnost opreme**

#### **2.3.3.1. Zaštita od vremenskih nepogoda**

Glavni problemi uzrokovani vremenskim nepogodama su:

- kiša,
- vjetar,
- tuča.

Kiša je svakako najveći problem, upravo zbog učestalosti kojom se može pojaviti. Iako je kiša sama po sebi jedan od potrebnih elemenata koja osigurava sirovinu za proizvodnju vodika, voda izvan sustava nije poželjna. U sustavima s puno elektronike voda može predstavljati veliki problem ukoliko se nađe unutar kućišta i dođe u kontakt s vrijednom opremom. Zbog toga je punionica izrađena od zaštićenog čelika te kvalitetnog pleksiglasa, a svi kontakti spojevi su dobro zabrtvljeni kako bi spriječili prodor vode. Na mjestima koja osiguravaju prozračivanje postavljene su zaštitnice od kiše (Slika 15).



**Slika 15.** Zaštita od kiše na vratima punionice

Drugi veliki problem predstavlja vjetar, koji u svojim naletima može nositi krupnije krute komade otpada, te tako oštetiti samo kućište. Izborom kvalitetnih materijala, te kvalitetnom izradom i zaštitom, punionici se treba osigurati otpornost na ove probleme. Tuča, iako rjeđa od kiše, predstavlja specifičan problem jer kombinira opasnosti koje donose kiša i vjetar. Tvrde kuglice leda mogu uzrokovati štetu samim udaranjem u kućište, dok dodatna šteta dolazi nakon što se te kuglice leda otope te postanu voda.

#### *2.3.3.2. Zaštita od temperaturnih ekstrema*

Probleme s visokom i niskim temperaturama rješavamo na dva načina:

- postavljanjem toplinske izolacije s unutarnje strane stjenke kućišta,
- ugradnjom sustava za grijanje i hlađenje zraka u kućištu.

##### *2.3.3.2.1. Toplinska izolacija*

Velike temperaturne razlike između ljeta i zime predstavljaju najsloženiji problem za sigurnost opreme. Pogotovo su opasne niske temperature zimi budući da se određene komponente opreme ne smiju nalaziti u prostoru ispod ništice. Upravo je zato izolacija neizbježan segment sustava kako bi se smanjio koeficijent prolaska topline te se tako smanjile ukupne potrebe za grijanjem prostora.

##### *2.3.3.2.2. Grijanje i hlađenje*

Iako u sustavu postoje komponente koje svojim radom generiraju toplinu, čak ni s postavljenom izolacijom to nije dovoljno. Zbog opasnosti od niskih temperatura potrebno je postaviti odgovarajuće grijalice koje će predavati toplinu zraku u kućištu kako ne bi došlo do kvara opreme. Toplinski osjetnici javljaju regulacijskom sustavu informaciju da je temperatura pala ispod neke vrijednosti, blizu dozvoljene minimalne temperature, te sustav uključuje grijalice kako bi se podigla temperatura zraka u kućištu. Taj zrak potrebno je dodatno rasporediti po prostoru unutar cijelog kućišta, jer geometrija punionice ne dozvoljava jednostavno širenje. U tu svrhu u sustavu su potrebni i ventilatori koji bi razmjestili zrak više temperature po cijeloj unutrašnjosti punionice.

Suprotan problem može se dogoditi ljeti, kada temperatura u kućištu može prijeći neku postavljenu vrijednost. Tada se analogno zagrijavanju, aktivira sustav hlađenja koji zadržava vrijednosti temperature zraka u dozvoljenim okvirima. Kako bi se zadovoljile potrebe za grijanjem i hlađenjem, punionica je opremljena ventilokonvektorima.

#### 2.3.3.3. *Zaštita od udara groma*

Opasnost od udara groma u punionicu nije velika zbog njene lokacije na FSB-u gdje je zaštićena zbog okolnih viših zgrada s vlastitom zaštitom od udara groma, no svakako se mora voditi računa o zaštiti opreme. Zbog toga je kućište, kao i sve komponente koje se nalaze izvan kućišta poput FN modula ili kolektora za vodu, uzemljeno vlastitim uzemljenjem.

#### 2.3.3.4. *Zaštita od poplave*

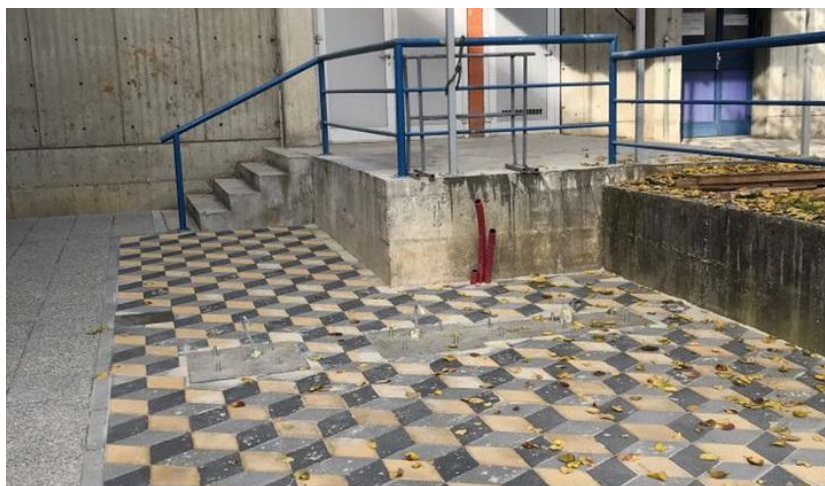
Opasnost od poplave nije velika, no svakako se mora voditi računa i o tom segmentu. Ne postoji realna opasnost od izlivanja Save u Zagrebu, ali puknuće vodovodnih instalacija ili sličan kvar u sustavu je realna opasnost. Zbog toga je cijela punionica izdignuta 20 cm iznad razine zemlje kako bi se izbjegao direktan kontakt s vodom, a svi kontaktni dijelovi s okolišem su kvalitetno brtvljeni.

#### 2.3.4. *Zahtjevi s obzirom na sigurnost korištenja*

Punionica mora osigurati jednostavno i široko korištenje svakom korisniku punionice, ali i zaštitu opreme unutar kućišta. Iako se punionica nalazi unutar FSB-a, te samim time u ograđenom i nadziranom prostoru, opasnost od provale uvijek postoji. Zbog toga je punionica i oprema u njoj zaštićena bravama s ključevima na vratima ormarića. Tako je onemogućen pristup neovlaštenim osobama, kako radi sigurnosti opreme od krađe, tako i radi sigurnosti samih osoba koje bi se mogle ozlijediti zbog nestručnog rukovanja opremom.

### 2.4. **Temelji**

Temelji su iskopani i napravljeni prije same konstrukcije kućišta. Kroz njih su provedeni kablovi i priključci pomoću kojih se dovodi električna struja u regulator punjenja baterije, kao i uzemljenja za gromobrane (Slika 16).



**Slika 16.** Temelji punionice vodika

## 2.5. Dizajn kućišta punionice

Dizajn punionice važna je estetska stavka, budući da krajnji korisnik sam izgled kućišta percipira kao samu punionicu, iako je sama oprema unutar kućišta važnija za proces punjenja. Zbog toga je bila želja stvoriti upečatljiv dizajn koji bi poslužio kao simbol prepoznatljivosti punionice, pa je tako odlučeno da se iskoristi sama molekula vodika kao inspiracija za dizajn. Pošto model atoma molekule vodika nije bio prikladan odlučeno je iskoristiti molekularni zapis,  $H_2$ . Dizajn je zaštićen kao intelektualno vlasništvo pod oznakom: Designed autonomous HRS, Original Registration under 1999 Act Bulletin No. 33/2018, International Registration Number of DM/102 305 (Slika 17) [28].



**Slika 17.** Idejni dizajn punionice vodika

Krajnji cilj je vizualno animirati korisnika da pomoću prepoznatljivog izgleda odmah prepozna o kakvoj je tehnologiji riječ i da ga zainteresira na daljnje razmišljanje o ekološkim problemima u svijetu, samom razlogu snažnijeg razvoja čišće tehnologije. Također, vizualno upečatljiv izgled podsjetit će korisnika na tehnologije vodika i nekom drugom prigodom kada se susretne s pojmom  $H_2$ . Isto tako, ovakvom se izvedbom konstrukcije prezentira ogroman marketinški potencijal punionica posjeduju (Slika 18).



**Slika 18.** Kućište punionice vodika instalirano na lokaciji

Konstrukcija kućišta, dakle, polazi iz dva glavna načela: Da se osigura adekvatan dizajn, i da se osigura funkcionalnost i sigurnost opreme unutar kućišta. Prvi zahtjev da kućište izgleda kao spoj slova H i brojke 2 ispunjen je oblikovanjem materijala. Punionica se stoga sastoji od dvije glavne cjeline, glavnog ormarića koji prezentira slovo H, te drugog u obliku brojke 2 na kojemu je sam izlaz cijevi za punjenje.

U ormariću H planiran je smještaj većine opreme uključujući baterije, spremnika vode, elektrolizatora te punjača. Ukupne dimenzije ormarića su 1 600 x 600 mm te visina od 1 850 mm. Svaki od dva vertikalna djela slova H ima dimenzije 600 x 600 mm s mostom dužine 400 mm koji spaja dva vertikalna ormarića. Ormarić je s unutarnjih bočnih strana obložen odabranim izolacijskim materijalom, dok se s prednje strane nalazi ploha od pleksiglasa koja je osvijetljena LED osvjetljenjem zbog dodatnog vizualnog efekta. Kablovi koji odlaze iz sunčanih modula se provode kroz zemlju te se iz temelja dovode u ormariće.

Spoj između izdignutog poda kućišta gdje prolaze kablovi dodatno je brtvljen silikonskim brtvilom, radi zaštite od vlage, vode i kukaca. Spoj između H djela i 2 djela je rastavljiv te se na donjem djelu nalazi prolaz zaštićen brtvom kako ne bi došlo do prodora vode. Element 2 punionice, služi kao spremnik crijeva za punjenje te spremište dodatnog spremnika vodika. Njegove ukupne dimenzije iznose 1 200 x 400 mm s visinom od također 1 850 mm. Svaki ormarić sa stražnje strane, ima jednostavan i lak pristup unutrašnjosti pomoću poklopaca, odnosno vrata. Također, zbog same funkcionalnosti, ali i činjenice da je projekt razvojnog karaktera te da će se raspored elemenata mijenjati s vremenom, a po mogućnosti ubacivati i neki novi elementi, u H dijelu postavljene su lako pomične police koje se ovisno o potrebama sustava mogu spuštati ili podizati na odgovarajuću razinu. Ovakav modularni pristup omogućava daljnji razvoj punionice bez potrebe mijenjanja kućišta.

## **2.6. Izrada prijedloga projektne dokumentacije Prve hrvatske punionice vodika**

Predložena tehnička dokumentacija je izrađena pomoću CAD (Engl. Computer-aided design) računarskog programa SolidWorks u Računskom centru FSB-a.

Prvi korak je bila izrada 3-D modela punionice (Slika 19). Dimenzije modela bile su uvjetovane zadanim parametrima krajnjih veličina punionice te dimenzijama dijelova opreme koje se smještaju u kućište. Osim što je trebalo voditi računa o stvarnim fizičkim veličinama komponenata opreme, moralo se osigurati i dodatan prostor za njihov rad propisan od strane proizvođača. Primjer toga je osiguravanje dovoljne udaljenosti jedne komponente opreme od stjenke kućišta ili druge komponente. Uz glavne dijelove opreme poput baterija i elektrolizatora, mora se osigurati i provođenje kablova i cijevi radi osiguravanja funkcionalnosti i jednostavnosti upravljanja sustavom. Također, uz smještaj opreme, potrebno je unutarnjom geometrijom punionice osigurati jednostavniju cirkulaciju strujanja zraka zbog potreba grijanja i hlađenja.

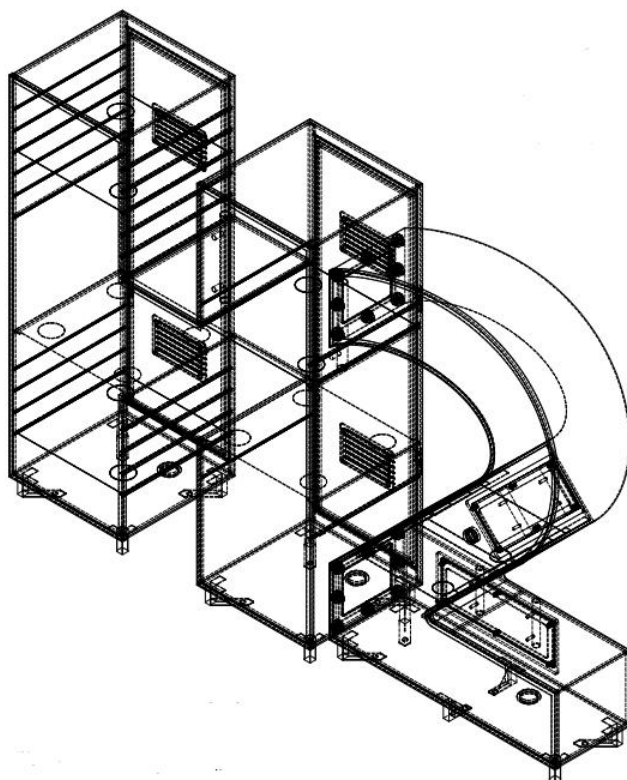
Nakon izrade početnog modela, uslijedilo je dodatno optimiranje modela kako bi krajnji prijedlog punionice bio što kvalitetniji. Uz osiguravanje funkcionalnosti, moralo se voditi računa o realnosti izvedbe konstrukcije, dostupnosti materijala za izradu te poštivanju ekonomskih zakona tržišta kako bi cijena realizacije projekta bila što niža.





**Slika 19.** Model punionice - pogled sa stražnje strane

Kao glavni materijal kućišta izabran je lako dostupan konstrukcijski čelik oznake S335 (EN 10027-1). Predviđeno je da se sve čelične komponente punionice izrade od ovog čelika kako bi se što kvalitetnije izveli zavareni spojevi. Prednje plohe punionice, pozicionirane prema korisniku, izrađene su od pleksiglasa (polimetil - metakrilat). Sve brtve izrađene su od klingerita, uobičajenog materijala za izradu brtvi. Također, za pojedine komponente koristi se EPDM guma. Po završetku modeliranja punionice, u istom programu je izrađena tehnička dokumentacija punionice, koja je dostupna u prilogu. Ona predstavlja predloženu tehničku izvedbu konstrukcije kućišta prototipa punionice (Slika 20) i podložna je promjenama ukoliko su one u cilju poboljšanja kvalitete i funkcionalnosti ili smanjenja cijene izrade.



**Slika 20.** Izometrijski prikaz konstrukcije punionice

### 3. INSTALACIJA OPREME PUNIONICE VODIKA

#### 3.1. Oprema

Punionica sadrži opremu koja se može podijeliti na sljedeće sustave::

- sustav za proizvodnju i distribuciju električne energije,
- sustav za proizvodnju vodika koji se sastoji od komercijalnog PEM elektrolizatora i laboratorijski izvedenog alkalnog elektrolizatora,
- ostale komponente.

Kod sustava za proizvodnju električne energije sve kreće od FN modula koji pretvaraju sunčevu energiju u električnu, preko regulatora punjenja, baterije, djelitelja napona do kutije s osiguračima te električnih vodova. Ovdje se također može pribrojiti i uzemljenje.

S druge strane sustav za proizvodnju vodika započinje sakupljačem kišnice, preko vanjskog spremnika vode i filtera, do unutarnjeg spremnika vode sa sustavom finog pročišćivanja. Ovi dijelovi sustava zahtijevaju održavanje sustava iz razloga što im je radni medij voda, iako ne koriste električnu energiju za rad. Na njih se nastavljaju elektrolizator i punjač, dva ključna i najvrjednija elementa u sustavu proizvodnje vodika. Oba elementa za svoj rad koriste električnu energiju te generiraju određenu toplinu u okoliš. Na kraju dolazi unutarnji spremnik vodika. Također, ovom sustavu mogu se pridodati i priključne cijevi za vodu i vodik. U ostale komponente ubrajaju se LED rasvjetna tijela, ventilokonvektori, te različiti mjerni sjetnici.

##### 3.1.1. FN moduli



**Slika 21.** Sunčani moduli

FN moduli predstavljaju ključni dio punionice i esencijalni segment njene autonomnosti, zajedno s pripadajućim regulatorom punjenja, te baterijom. Ovdje predstavljena punionica koristi sustav od 8 modula SV60-270 (Slika 21). Svaki modul ima snagu 270 W što znači da je ukupna nazivna snaga male sunčane elektrane 2,16 kW, što je i više nego dovoljno za pokrivanje svih opterećenja u punionici.

U sljedećim tablicama dane su vrijednosti parametara jednog FN modula i to za standardne testne uvjete (engl. Standard test conditions, STC) za vrijednosti nominalne radne temperature članka (engl. Nominal operating cell temperature, NOCT). U točki STC, modul se ispituje pri vrijednostima  $1\ 000\ \text{W/m}^2$  ozračivanja i  $25\ ^\circ\text{C}$  temperature članka prema normi EN 60904-3 (Tablica 2), dok točka NOCT predstavlja  $800\ \text{W/m}^2$  ozračivanja i  $20\ ^\circ\text{C}$  temperaturu članka uz brzinu vjetra od  $1\ \text{m/s}$  (Tablica 3) [29].

**Tablica 2.** Vrijednosti parametara FN modula pri standardnim testnim uvjetima (STC) [29]

|   |          |
|---|----------|
| Model   | SV60-270 |
| Nazivna snaga $P_{MPP}$ , W   | 270      |
| Dozvoljeno odstupanje $\Delta P_{MPP}$ , W                                  | -0/+4,9  |
| Struja kratkog spoja $I_{SC}$ , A   | 9,68     |
| Napon otvorenog kruga $U_{OC}$ , V  | 37,5     |
| Nazivna struja $I_{MPP}$ , A  | 8,93     |
| Nazivni napon $U_{MPP}$ , V   | 30,5     |
| Dozvoljeno odstupanje napona $\Delta U_{MPP}$ i struje $\Delta I_{MPP}$ , % | $\pm 3$  |
| Učinkovitost modula $\eta_{FN}$ / %   | 16,59    |

**Tablica 3.** Vrijednosti parametara FN modula u točki NOCT [29]

|  |          |
|--|----------|
| Model                                      | SV60-270 |
| Nazivna snaga $P_{MPP}$ , W                | 196,51   |
| Dozvoljeno odstupanje $\Delta P_{MPP}$ , W | -0/+4,9  |
| Struja kratkog spoja $I_{SC}$ , A          | 7,83     |
| Napon otvorenog kruga $U_{OC}$ , V         | 34,2     |
| Nazivna struja $I_{MPP}$ , A               | 7,22     |
| Nazivni napon $U_{MPP}$ , A                | 27,2     |

Podaci o radnim uvjetima FN modula (Tablica 4) i njegovim mehaničkim značajkama (Tablica 5) dani su u sljedećim tablicama [29].

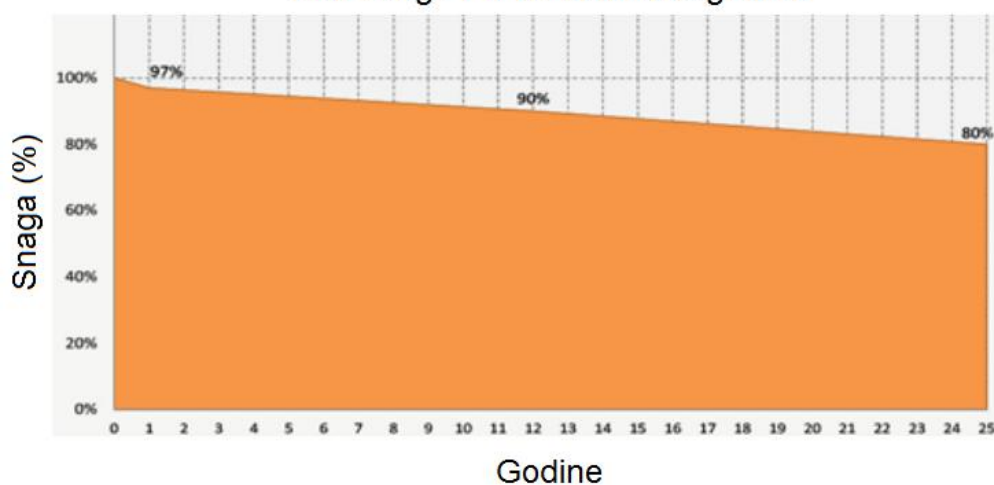
**Tablica 4.** Radni uvjeti FN modula SV60-270 [29]

|   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| Temperaturno područje, °C   | od -40 do +85                         |
| Maksimalni napon sustava $U_{\max, FN}$ , V   | 1 000                                 |
| Najveća dopuštena prekidna struja osigurača u nizu FN modula $I_{\max, PS(FN)}$ , A | 15                                    |
| Maksimalno opterećenje  | Ispitano do 5 400 Pa                  |
| Otpornost na udar   | Tuča promjera 25 mm pri brzini 23 m/s |

**Tablica 5.** Mehanički podaci FN modula [29]

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Dimenzije (V x Š x D), mm | 1 640 x 992 x 40 / 1 640 x 992 x 35  |
| Masa $m_{FN}$ , kg        | 18,3/18,0  |
| Broj i vrsta članaka      | 60 članaka, polikristalični Si, 156 x 156 mm +/-1 mm                         |
| Enkapsulacija članaka     | Etilen-vinil acetat (EVA)  |
| Staklo                    | 3,2 mm kaljeno sunčano staklo  |
| Pozadina                  | Višeslojna poliesterska folija   |
| Okvir                     | Okvir od anodiziranog aluminija s dvostrukom stijenkom i otvorima za drenažu |
| Priključna kutija         | IP67 s 3 Bypass diode  |
| Priključni kablovi        | Kabel 4 mm <sup>2</sup> , dužine 1 000 mm, GZX ili PV4 priključnice          |

Pad snage FN modula kroz godine

**Slika 22.** Izlazna snaga FN modula SV60-270 u periodu od 25 godina [29]

Garancija na rad FN modula iznosi 10 godina, a proizvođač jamči vrijednosti od 90% izlazne snage nakon 12 godina, odnosno od 80% izlazne snage nakon 25 godina (Slika 22).

### 3.1.2. Regulator punjenja

Regulator punjenja, regulira napunjenost baterije, odnosno akumulatora, i štiti ga od prepunjavanja i dubokog pražnjenja. Uz FN module i bateriju, neizostavan je dio bilo kakvog sunčanog sustava. Za potrebe punionice koristi se regulator punjenja MPPT 150/70 proizvođača Victron energy (**Error! Reference source not found.**), čije značajke dane u tablici (Tablica 6).

**Tablica 6.** Parametri regulatora punjenja MPPT 150/70 [30]

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Tip regulatora punjenja                                | MPPT 150/70                        |
| Napon baterije $U_{MPPT(nom)}$ , V                     | 12/24/36/48                        |
| Nazivna struja $I_{MPPT(nom)}$ , A                     | 70                                 |
| Nominalna snaga FN modula $P_{MPPT(nom)}$ (za 12 V), W | 1 000                              |
| Nominalna snaga FN modula $P_{MPPT(nom)}$ (za 24 V), W | 2 000                              |
| Nominalna snaga FN modula $P_{MPPT(nom)}$ (za 36 V), W | 3 000                              |
| Nominalna snaga FN modula $P_{MPPT(nom)}$ (za 48 V), W | 4 000                              |
| Struja kratkog spoja $I_{SC,MPPT(nom)}$ , A            | 50                                 |
| Napon otvorenog kruga $U_{OC,MPPT(nom)}$ , V           | 145 V                              |
| Maksimalna učinkovitost $\eta_{MPPT}$ / %              | 98                                 |
| Vlastita potrošnja                                     | < 35 mA za 12 V<br>< 20 mA za 48 V |
| Radna temperatura, °C                                  | od -30 do +60                      |
| Dozvoljena relativna vlažnost $r_{dop,MPPT}$ , %       | 95, nekondenzirajuća               |
| Dozvoljena nadmorska visina, m                         | 5 000                              |
| Dozvoljena razina onečišćenja                          | PD3                                |
| Komunikacija   | direktna/Bluetooth                 |
| Masa $m_{MPPT}$ , kg                                   | 3                                  |
| Dimenzije (V x Š x D), mm                              | 185 x 250 x 95                     |



**Slika 23.** Regulator punjenja MPPT 150/70 [30]

### 3.1.3. Baterija

Treći neizostavni dio svakog sunčanog kompleta je baterija, koja pohranjuje proizvedenu električnu energiju i distribuira je potrošačima prema potrebi. Mora biti u mogućnosti pohraniti dovoljnu količinu energije kako bi zadovoljila vršna opterećenja u danom trenutku kroz određeni vremenski period s jedne strane, a s druge strane ne smije biti predimenzionirana. Sustav punionice koristi dvije baterije LPS12-285 (Slika 24) čije su značajke dane u tablici (Tablica 7).



**Slika 24.** Baterija [31]

**Tablica 7.** Parametri baterije [31]

|   |   |
|---|---|
| Model baterije                                | LPS12-285 (12V287.5AH)  |
| Nominalni napon $U_{B(nom)}$ , V              | 12  |
| Nominalni kapacitet (100 HR), Ah              | 287,5   |
| Dimenzije (V x Š x D), mm                     | 226 x 268 x 522   |
| Masa $m_B$ , kg                               | ~77   |
| Materijal kućišta                             | ABS   |
| Radni kapacitet                               | 288,0 Ah/2,88 A (100 hr, 1,80 V/članak, 25 °C)<br>262,0 Ah/13,1 A (20 hr, 1,80 V/članak, 25 °C)<br>288,0 Ah/2,88 A (100 hr, 1,80 V/članak, 25 °C)<br>288,0 Ah/2,88 A (100 hr, 1,75 V/članak, 25 °C)<br>288,0 Ah/2,88 A (100 hr, 1,60 V/članak, 25 °C) |
| Struja kratkog spoja $I_{SC,B}$ , A           | 2 500   |
| Unutarnji otpor $R_{i,B}$ , mΩ                | ~2,5  |
| Radna temperatura, °C                         | od 0 do +40   |
| Nominalna radna temperatura $T_{B(nom)}$ , °C | 25±3  |
| Ovisnost kapaciteta o temperaturi             | za 40 °C je 103%<br>za 25 °C 100%<br>za 0 °C je 86%   |
| Samopražnjenje                                | Leoch baterije serije LPS mogu biti pohranjene do 6 mjeseci na temperaturi od 25 °C i tada je potrebno svježe punjenje. Za više temperature pohrane vremenski interval je kraći.  |

### 3.1.4. Naponski djelitelj

Naponski djelitelj jednostavan je elektronski element koji služi za smanjenje napona u daljnjem djelu kruga. U ovom slučaju, riječ je o jednostavnom sustavu otpornika standardiziranih za smanjenje napona s 24 V na 12 V. Ovakav sustav potreban je iz razloga što LED rasvjeta u punionici ne može raditi na naponu od 24 V koji odgovara ostalim komponentama sustava.

### **3.1.5. Kutija s osiguračima**

Kutija s osiguračima predstavlja segment opreme u kojoj su sadržani svi osigurači sustava. Svaka potrošač ima vlastiti osigurač, kao i sunčani moduli. Svi razvodi su tako provedeni, da se osigurači nalaze na jednoj lokaciji u punionici zbog jednostavnijeg i lakšeg nadzora sustava. Osigurači su izvedeni kao zaštitni prekidači tako da se mogu ponašati i kao sklopke.

### **3.1.6. Električni vodovi**

Električni vodovi služe za dovoz električne energije iz FN modula do baterije te za daljnju distribuciju električne energije iz baterije prema potrošačima. Presjek površine voda je 4 mm<sup>2</sup>.

### **3.1.7. Uzemljenje**

Da bi se osigurala adekvatna zaštita od udara groma, provedeno je uzemljenje komponenti sustava. Sunčani moduli imaju vlastito uzemljenje, dok kućište ima svoja dva. Budući da se između H djela i 2 djela punionice nalazi brtvljeni spoj, svaki dio je zasebno osiguran u slučaju udara munje. Također, sustav sakupljanja kišnice će imati vlastito uzemljenje.

### **3.1.8. Sakupljač kišnice**

Sakupljač kišnice je dio opreme koji, prikuplja kišu, te je prvi korak u liniji proizvodnje vodika u autonomnim punionicama vodika. Usprkos važnosti za autonomnost, sustav prikupljanja kišnice neće biti instaliran na punionicu po njenom otvorenju, već će se naknadno instalirati. Planirana je izvedba da se sakuplja kišnica s krova iznad same punionice, kako bi se iskoristila velika površina nadstrešnice. Potom bi se kroz rešetke, koje odvajaju krupniji otpad, dovela do vanjskog spremnika.

### **3.1.9. Vanjski spremnik vode**

Kako je navedeno u prethodnom poglavlju, ovaj segment punionice bit će izveden naknadno, nakon što se otvori punionica. Riječ je o većem vanjskom spremniku koji može pohraniti veće količine vode, dostatne za rad punionice u dužem sušnom periodu bez padalina, s obzirom na činjenicu da unutarnji spremnik nije dovoljno velikog kapaciteta. Jednom kada se voda sakupi, sam spremnik ne dopušta isparavanje vode u većim količinama nazad u atmosferu. Jednostavnim sustavom regulacije, ispušta dovoljne količine vode u manji unutarnji spremnik koji prvo mora proći kroz sustav prečistača.

### **3.1.10. Prečistač**

Sukladno spremniku vode, i sustav prečistača će se naknadno implementirati u sustav. Osnovna zadaća prečistača je osigurati pripremu vode na način da ona bude pogodna za korištenje u elektrolizatoru. To uključuje kvalitetnu fizikalno-kemijsku filtraciju kroz najmanje tri stupnja filtracije kako bi se od kišnice dobila voda razine kvalitete komercijalne demineralizirane vode, budući da se takva inače koristi u ispitivanjima elektrolizatora.

### **3.1.11. Unutarnji spremnik vode sa sustavom finog pročišćivanja**

Unutarnji spremnik vode dolazi s dodatnim sustavom filtracije vode prije samog dovođenja vode u elektrolizator. Spremnik koji se koristi u punionici veličine je 5 litara, i prilikom laboratorijskih ispitivanja koristi se demineralizirana voda električne vodljivost ispod 1 μS/m (Slika 25) [32].





**Slika 25.** Unutarnji spremnik vode sa sustavom finog pročišćivanja

### **3.1.12. Elektrolizator**

Elektrolizator je uređaj u kojem se procesom elektrolize vode, proizvodi vodik koji se koristi u gorivnim člancima, te kisik koji se također može pohraniti. Predstavlja glavnu komponentu u liniji proizvodnje vodika, kao i glavnog potrošača u električnoj shemi (Slika 26). Osim što je ključni dio cijele punionice, može se reći da je i najosjetljiviji, budući da elektrolizator ima najuži temperaturni raspon u kojem može optimalno raditi, a koji se kreće od +5 °C do +35 °C (Tablica 8) [32].



**Slika 26.** PEM elektrolizator

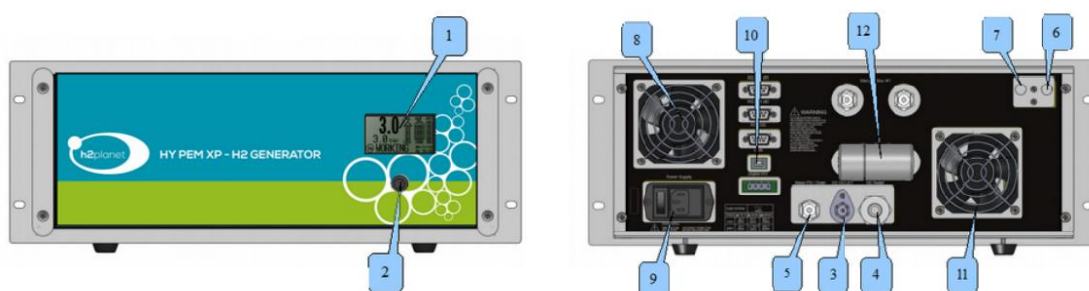
**Tablica 8.** Tehničke specifikacije elektrolizatora [32]

|   |  |
|---|--|
| Model   | Hy PEM XP Rack 2 000                   |
| Maksimalni protok vodika $q_{\max,hy,E}$ , cc/min | 2 000                                  |
| Maksimalni izlazni tlak, bar                      | 16                                     |
| Čistoća proizvedenog vodika $q_{\max,hy,E}$ , %   | > 99,99999 (rosište na -70 °C)         |
| Dimenzije (V x Š x D), mm                         | 177 x 485 x 433                        |
| Masa praznog uređaja $m_E$ , kg                   | 26,1                                   |
| Radna temperatura, °C                             | od +5 do +35                           |
| Temperatura pohrane, °C                           | od +1 do +40                           |
| Dozvoljena relativna vlažnost $r_{dop,E}$ , %     | 80 (za 25 °C)                          |
| Buka $L_{\max,E}$ , dB                            | < 39                                   |
| IP Code (engl. Ingress protection)                | IP20                                   |
| Razina onečišćenja                                | 2                                      |
| Dozvoljena nadmorska visina, m                    | 2 000                                  |
| Napon $U_{E(nom)}$ , V                            | 100-240 (za AC 50/60 Hz)<br>24 (za DC) |
| Snaga na početku rada $P_{E,sol}$ , W             | 448 (za AC)<br>381 (za DC)             |
| Snaga pred kraj rada $P_{E,col}$ , W              | 560 (za AC)<br>476 (za DC)             |
| Ulaz / izlaz vodika                               | kompresijski konektori 1/8"            |
| Komunikacija s elektrolizatorom                   | RS232                                  |

Bitan faktor za pravilan rad elektrolizatora je kvaliteta napojne vode. Parametri ulazne napojne vode dani su donjoj tablici (Tablica 9), dok je skicom sustava (Slika 27) objašnjen raspored svih funkcija i mogućnosti elektrolizatora (Tablica 10).

**Tablica 9.** Parametri napojne vode za elektrolizator [32]

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Kvaliteta vode                                | Deionizirana, ASTM II, < 0,1 $\mu$ S |
| Minimalni ulazni tlak $p_{\min,W}$ , bar      | 0,2                                  |
| Maksimalni ulazni tlak $p_{\max,W}$ , bar     | 1                                    |
| Protok dobavne vode $q_w$ , l/min             | od 0,2 do 1,5                        |
| Kapacitet unutarnjeg spremnika $V_{is,W}$ , l | 2,3                                  |
| Kapacitet vanjskog spremnika $V_{es,W}$ , l   | 5                                    |

**Slika 27.** Komponente elektrolizatora [32]**Tablica 10.** Opis komponenta elektrolizatora [32]

|    |  |
|----|--|
| 1  | LCD zaslon osjetljiv na dodir (128 x 64 piksela) |
| 2  | START / STOP tipka                               |
| 3  | Izlaz vodika                                     |
| 4  | Pročišćavanje vodika                             |
| 5  | Dovod vode                                       |
| 6  | Ispust vodika                                    |
| 7  | Ispust kisika                                    |
| 8  | Izlaz zraka za ventilaciju                       |
| 9  | Napajanje i glavni prekidač                      |
| 10 | Konektori za komunikaciju: RS485 / RS232 / USB   |
| 11 | Ulaz zraka za ventilaciju                        |
| 12 | Pročišćivač vode                                 |

### 3.1.13. Punjač

Glavna uloga punjača je da vodik proizveden u elektrolizatoru podigne na viši tlak i transportira u spremnik vodika. Punjač cijelo vrijeme kontrolira tlak vodika te preko RS232 veze komunicira s elektrolizatorom. Kada tlak u sustavu padne ispod neke zadane vrijednosti, punjač će automatski javiti elektrolizatoru da krene proizvoditi vodik. Na taj način sustav potpuno autonomno regulira periode proizvodnje vodika. Kada se dostigne neki zadani tlak u sustavu, odnosno unutarnjem spremniku vodika, punjač to prepoznaje i javlja elektrolizatoru da prekine s proizvodnjom. Tako se omogućava punjenje unutarnjeg spremnika kada nema korisnika na punionici.



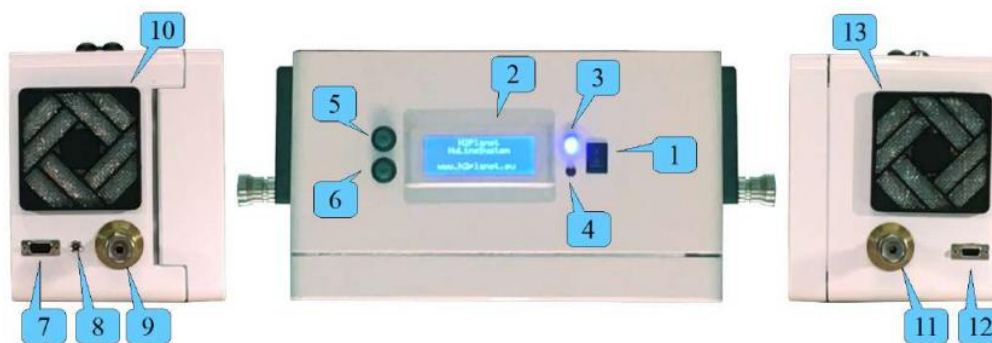
Slika 28. Punjač

U punionici se koristi kompatibilan za rad s elektrolizatorom (Slika 28). U donjoj je tablici dan pregled tehničkih specifikacija uređaja (Tablica 12) dok je skicom sustava (Slika 29) objašnjen raspored svih funkcija i mogućnosti punjača (Tablica 13) [33].

Tablica 11. Tehničke specifikacije punjača [33]

| Model  | HyRefill-BOX Mini |
|--|-------------------|
| Maksimalni izlazni tlak $p_{\max,R}$ , bar           | 30                |
| Dimenzije (V x Š x D), mm                            | 210 x 400 x 175   |
| Masa praznog uređaja $m_R$ , kg                      | 4,4               |
| Radna temperatura, °C                                | od -10 do +60     |
| Dozvoljena relativna vlažnost $r_{\text{dop},R}$ , % | 80 (za 25 °C)     |
| IP Code (eng. Ingress protection)                    | IP20              |
| Razina onečišćenja                                   | 2                 |
| Dozvoljena nadmorska visina, m                       | 2 000             |

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Napon $U_{R(nom)}$ , V                           | 100-240 (za AC 50/60 Hz); 24 (za DC) |
| Snaga tijekom stanja mirovanja $P_{R(stby)}$ , W | < 1                                  |
| Maksimalna snaga $P_{max,R}$ , W                 | 22                                   |
| Ulaz/izlaz vodika                                | brzi konektori 1/8" (ženski)         |
| Komunikacija s elektrolizatorom                  | RS232                                |



Slika 29. Komponente punjača [33]

Tablica 12. Opis komponenata punjača [33]

|    |   |
|----|---|
| 1  | Glavni prekidač                               |
| 2  | LCD zaslona                                   |
| 3  | Signalna LED lampica                          |
| 4  | LED lampica za dojavu greške                  |
| 5  | LPL tipka za povećanje                        |
| 6  | LP tipka za smanjivanje                       |
| 7  | RS232 utor za komunikaciju s elektrolizatorom |
| 8  | DC utor za napajanje                          |
| 9  | Dovod vodika                                  |
| 10 | Izlaz zraka za ventilaciju                    |
| 11 | Izlaz vodika                                  |
| 12 | RS232 utor za komunikaciju s gorivnim člankom |
| 13 | Ulaz zraka za ventilaciju                     |

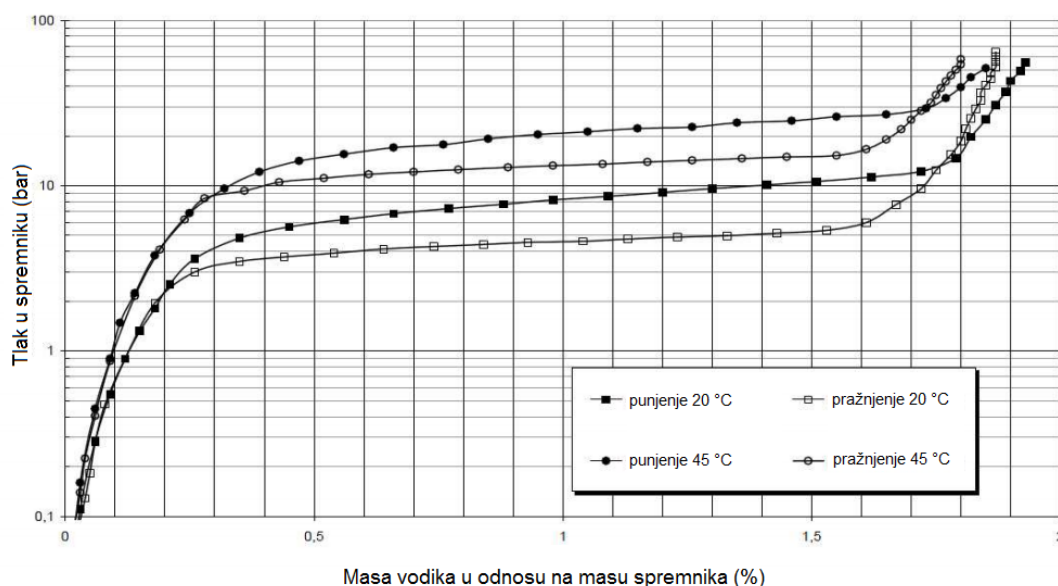
### 3.1.14. Unutarnji spremnik vodika



Slika 30. Spremnik vodika

Kako je punjenje metalnog hidrida relativno spor proces, te bi za direktno punjenje jednog spremnika na biciklu bilo potrebno nešto više od 2 h, korištenjem dodatnog spremnika u sustavu značajno se ubrzava proces punjenja, jer se prazan spremnik na biciklu može zamijeniti već napunjenim spremnikom. Punionica koristi spremnik tipa metalni hidrid, MyH2 SLIM 350 ukupnog kapaciteta 350 l (Slika 30).

Nakon otvaranja punionice, planirana je nadogradnja ukupnog kapaciteta pohrane vodika u punionici ugradnjom još jednog takvog spremnika. Glavna značajka svakog spremnika je njegova PCT krivulja (engl. Pressure-composition temperature cruve) (Slika 31), dok su ostali parametri spremnika My H2 SLIM 350 dani su u tablici (Tablica 14) [34].



Slika 31. PCT krivulja spremnika [34]

Prikazana krivulja opisuje ponašanje tlaka vodika u spremniku u ovisnosti o temperaturi punjenja, odnosno pražnjenja. Za iste temperature, pražnjenje spremnika se odvija pri nižim tlakovima. Također, za više temperature viši su i tlakovi punjenja za iste količine vodika.

**Tablica 13.** Parametri spremnika vodika [34]

|   |                     |
|---|---------------------|
| Model   | MyH2 SLIM 350       |
| Nazivni kapacitet $m_{HS(nom)}$                           | 32 g (350 l) vodika |
| Tip metalnog hidrida                                      | AB2                 |
| Dimenzije (V x Š x D), mm                                 | 325 x 120 x 30      |
| Unutarnji volumen spremnika $V_{HS}$ , l                  | 0,48                |
| Masa spremnika $m_{HS}$ , g                               | 3600                |
| Maksimalni radni tlak $p_{max,HS}$ , bar                  | 20                  |
| Najveći ispitni tlak $p_{test,max,HS}$ , bar              | 100                 |
| Najveći tlak dopune $p_{dp,max,HS}$ , bar                 | 30                  |
| Minimalna temperatura tijekom dopune $T_{dp,min,HS}$ , °C | +3                  |
| Najveća radna temperatura $T_{max,dop,HS}$ , °C           | +65                 |

### 3.1.15. Cijevi za vodu

Cijevi za vodu imaju jednostavnu funkciju spajanja različitih komponenti koji prenose vodu iz jednog u drugi. Cijevi u vanjskom spremniku su većeg promjera u odnosu na cijev koja dovodi vodu u elektrolizator. Važno je da se osigura kvalitetno spajanje kao ne bi došlo do curenja vode. Voda u kućištu može izazvati štetu na opremi, a i voda se može onečistiti prije ulaza u elektrolizator u slučaju oštećenja, što također nije poželjno i može uzrokovati štetu na elektrolizatoru.

### 3.1.16. Cijevi za vodik

**Slika 32.** Priključak cijevi za vodik

Slično kao i kod cijevi za vodu, njihova funkcija je transport vodika. Cijevi su kvalitetnije izrade i imaju složenije priključke s dodatnim osiguračima kako ne bi propuštali vodik u kućište (Slika 32).

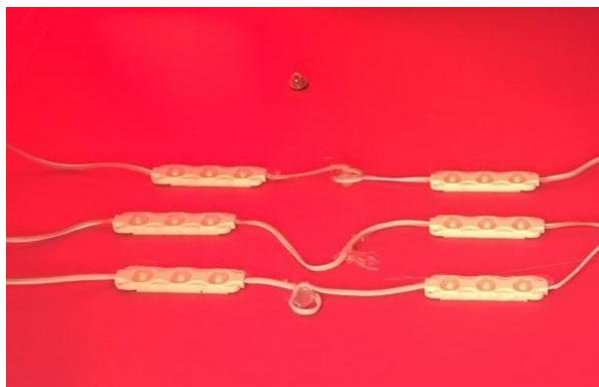
### 3.1.17. Laboratorijski alkalni elektrolizator

Laboratorijski alkalni elektrolizator, razvijen na FSB-u bit će naknadno postavljen u punionicu te će puniti vlastiti spremnik vodika. Proizvodnja vodika na laboratorijskom elektrolizatoru moći će se usporediti s proizvodnjom na komercijalnom PEM elektrolizatoru.

### 3.1.18. LED rasvjeta

LED rasvjeta dio je opreme koji pospješuje vizualni izgled punionice budući da je pleksiglas poluproziran materijal (Slika 33). Dodatni pogodan nusprodukt je i proizvodnja otpadne topline koja, iako nije velika jer se radi o LED tehnologiji rasvjete, potpomaže očuvanju pogodne temperature u kućištu.

Rasvjeta radi na naponu od 12 V, te su zbog toga neophodni djelitelji napona koji će omogućiti adekvatan napon za njihov rad. Postoje dva odvojena sustava, jedan od 150 W koji osvjetljava H dio kućišta, i drugi od 100 W koji osvjetljava 2 segment konstrukcije.



**Slika 33.** LED rasvjetna tijela u punionici

### 3.1.19. Ventilokonvektor

U punionici će biti instalirana dva ventilokonvektora s maksimalnom snagom od 500 W. Sustav regulacije rada ventilokonvektora je takav da ovisi o vanjskoj temperaturi. Kada se vanjska temperatura spusti, sustav automatski reagira i počne grijati zrak u kućištu. Ovisno o vanjskoj temperaturi mijenja se režim rada kako bi pokrio toplinske gubitke.

### 3.1.20. Mjerna oprema

Sustav je opremljen sljedećim mjernim uređajima:

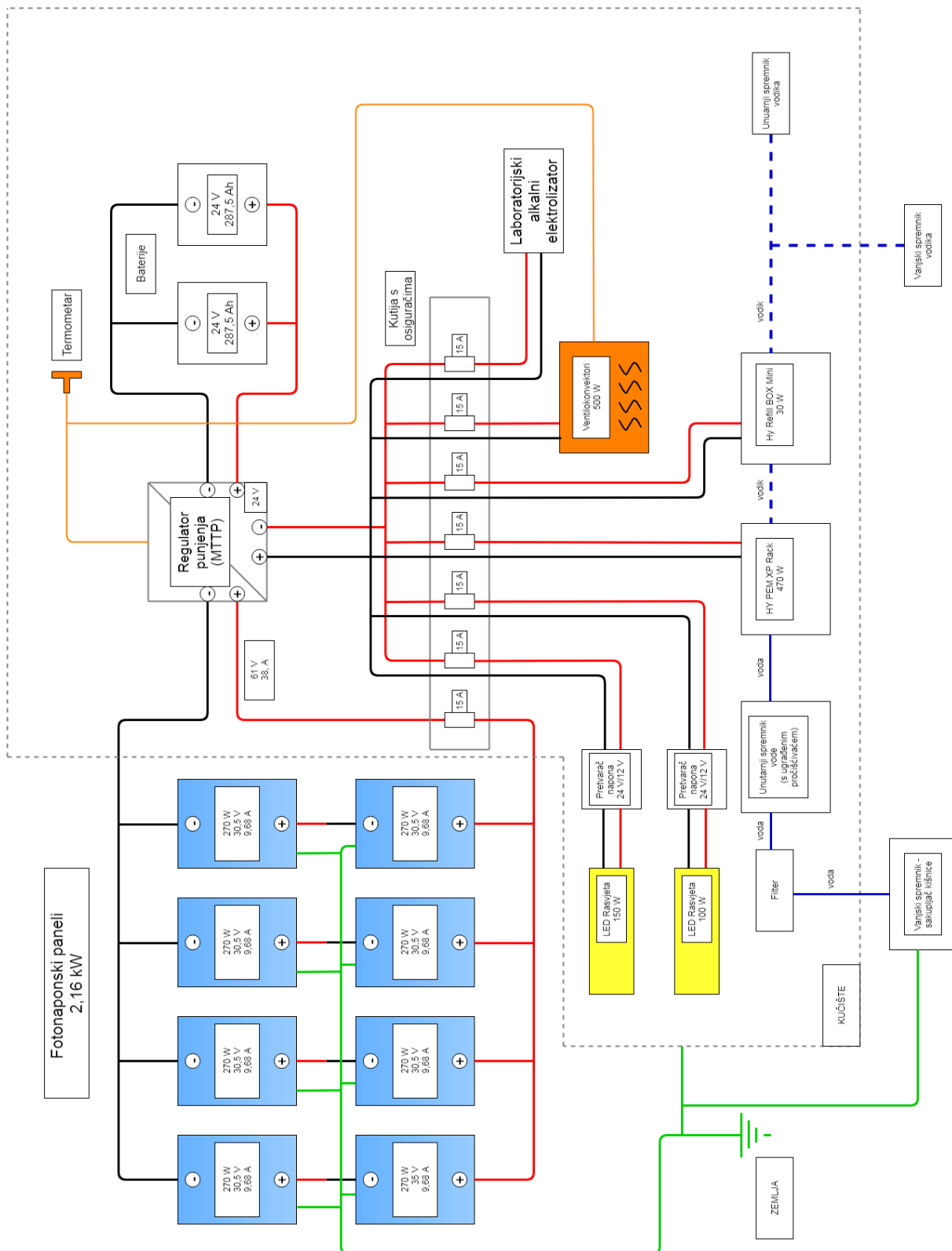
- termometrom,
- digitalnim multimetrom.

Rad termometra je u funkciji regulacije grijanja zraka u punionici, budući da je rad ventilokonvektora definiran temperaturom zraka. S druge strane, svrha digitalnog multimetra je u cilju kvalitetnijeg praćenja elektroničkih veličina jačine struje i napona u sustavu.

## 3.2. Funkcionalna shema spajanja komponenti sustava

Funkcionalna shema spajanja dijelova opreme punionice (Slika 34) sastoji se od dva glavna sustava. Prvi je sustav proizvodnje i distribucije električne energije od izvora do potrošača, a drugi je proizvodna linija vodika od prikupljana sirovine, do pohrane proizvoda u spremnike.





Slika 34. Shema spajanja sustava

Sustav proizvodnje i distribucije električne energije počinje na FN modulima. Osam modula posloženo je tako da postoje četiri paralelno spojene serije od po dva modula. Svaki modul ima provedeno vlastito uzemljenje. Električnim vodovima proizvedena energija se dovodi do regulatora punjenja. Ovaj vod zaštićen je vlastitim osiguračem od 15 A. Iz regulatora punjenja, električna energija se pohranjuje u baterije, te distribuira daljnjim potrošačima. Svaki potrošač na svojem električnomvodu ima vlastiti osigurač.

Potrošači električne energije u punionici su:

- komercijalni PEM elektrolizator,
- punjač,
- laboratorijski PEM elektrolizator,
- ventilokonvektor,
- LED rasvjeta za H dio kućišta,
- LED rasvjeta za 2 dio kućišta.

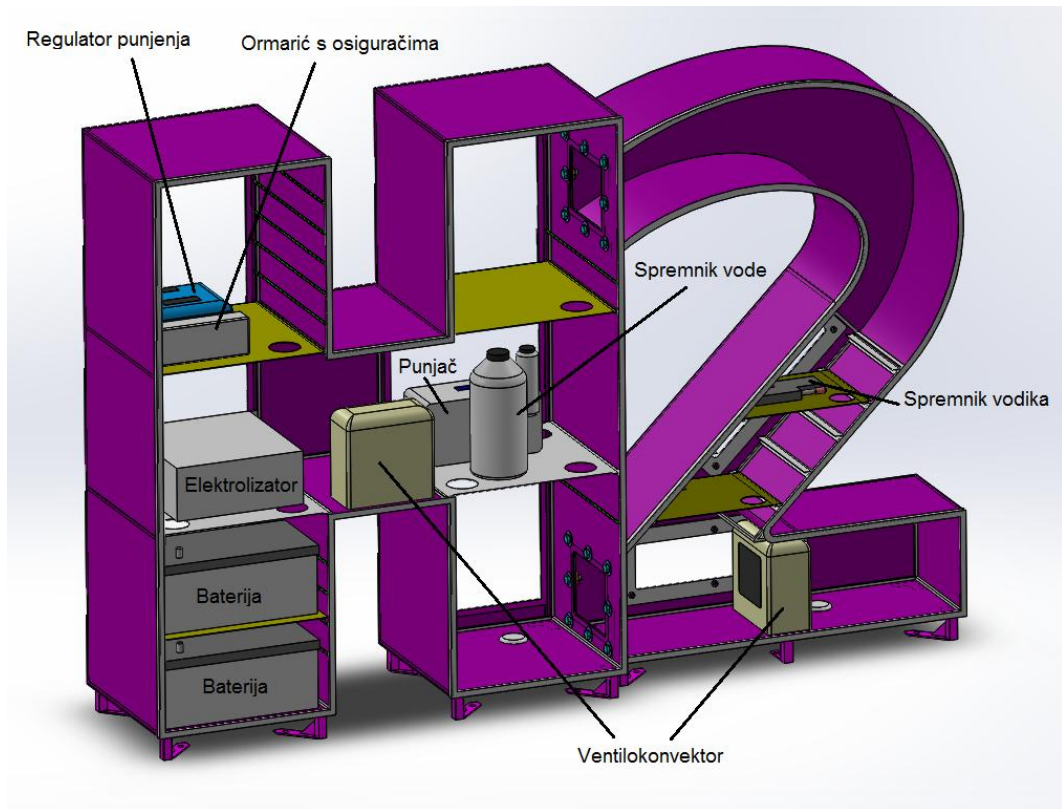
Drugi sustav je linija za proizvodnju vodika. Linija počinje sustavom za prikupljanje kišnice, te vanjskog spremnika za vodu. Nastavlja se vodovodnim cijevima do sustava pročišćavača u kojima se radni medij, voda, dovodi do optimalnog stanja u kojem može ući u unutarnji spremnik punionice. Potom deionizirana voda ulazi u elektrolizator u kojemu se elektrolizom vode proizvode na molekule vodika i kisika. Vodik se potom uz pomoć punjača cijevima za vodik dovodi u unutarnji spremnik punionice ili vanjski spremnik na biciklu.

Osim FN modula, sustava za prikupljanje vode i vanjskog spremnika vode, svi dijelovi opreme se nalaze zaštićeni unutar kućišta koje ima provedeno vlastito uzemljenje. FN moduli su instalirani u blizini punionice kod Laboratorija za energetska postrojenja FSB-a, ispred kojeg se nalazi i sama punionica. Sustav prikupljanja kišnice i vanjski spremnik planirani su dio projekta u kasnijoj fazi razvoja punionice, a do tada će se koristiti demineralizirana voda iz Laboratorija za vodu, gorivo i mazivo.

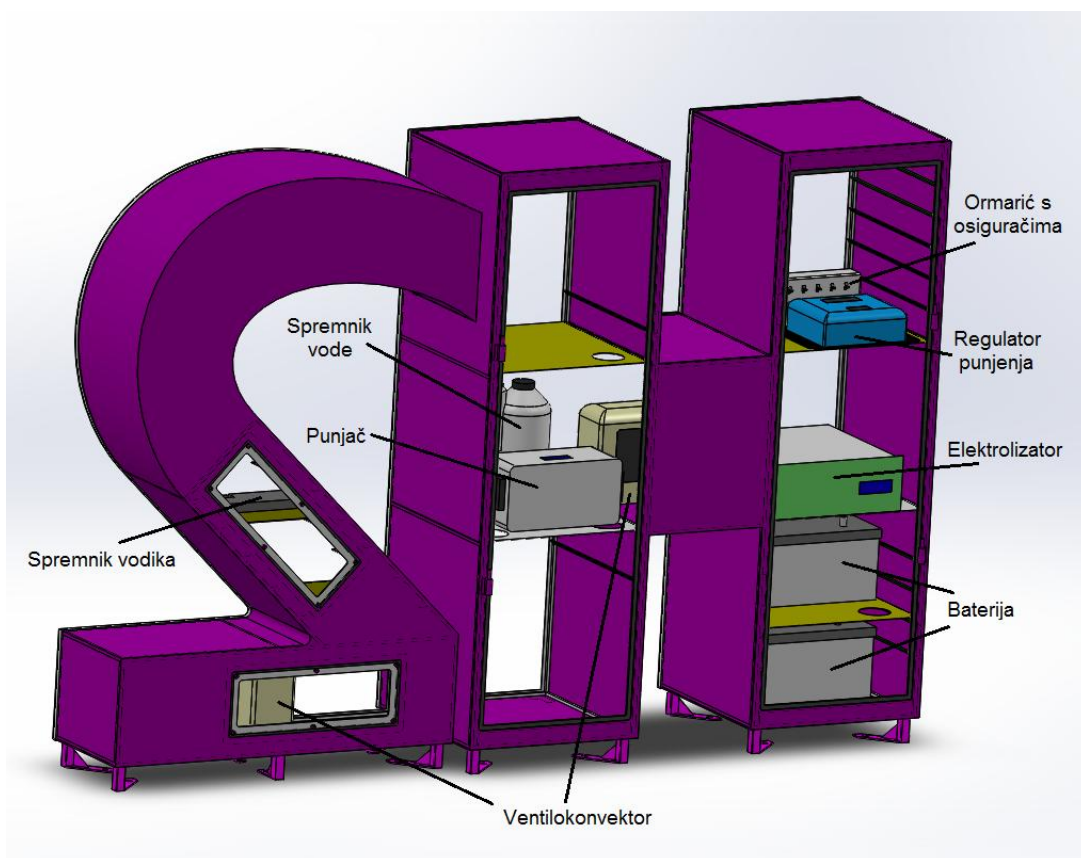
### **3.2.1. Dijelovi opreme unutar kućišta**

Dimenzijama najveći dijelovi opreme predstavljaju baterije (226 x 268 x 522) i elektrolizator (177 x 485 x 433) te kao takvi imaju prioritet pozicioniranja. Proizvodna linija vodika smještena je u istoj razini, koju tvore fiksne police zajedno sa mostom između dva ormarića, jer je tako uspješno testirana i u laboratoriju (Slika 35).

Pristup svim dijelovima opreme je lako dostupan preko otvora za vrata i poklopce, te se različiti segmenti mogu jednostavno premještati (Slika 36). Pomoću montažnih polica jednostavno se može promijeniti položaj oslonca i prilagoditi potrebama sustava. U slučaju uvođenja dodatnih elemenata u sustav, osiguran je dovoljan prostor za njihovo smještanje.



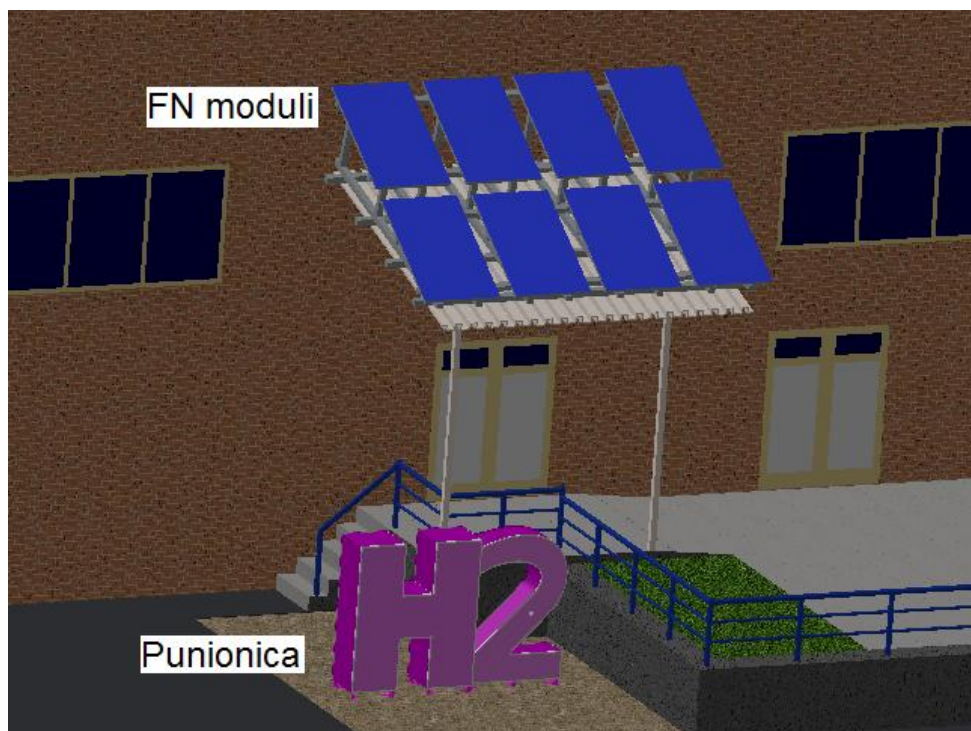
Slika 35. Pogled na poziciju opreme u kućištu s prednje strane



Slika 36. Pogled na opremu u kućištu sa stražnje strane

### 3.2.2. Dijelovi opreme izvan kućišta

Kako sustav za prikupljanje kišnice još nije instaliran, jedini dio opreme koji se nalazi izvan punionice su FN moduli. Ukupno osam FN modula instalirano je na nadstrešnici ispred zgrade Laboratorija za energetska postrojenja na zasebnoj konstrukciji (Slika 37). Paneli su okrenuti prema jugu, te postavljeni pod upadnim kutem  $\beta$  od  $24^\circ$ .



**Slika 37.** Dijelovi opreme izvan kućišta

Kablovi koji vode proizvedenu električnu energiju spuštaju se uz stup nadstrešnice u cijev pod zemlju, te iz temelja izlaze ispod kućišta. Kroz otvor na punionici ulaze u unutrašnjost kućišta i odvoje se do regulatora. Svi spojevi su dodatno zaštićeni kako ne bi došlo do prodora vode ili ulaska kukaca.

## 4. PRVI HRVATSKI BICIKL NA VODIK

### 4.1. Projekt prvog hrvatskog bicikla na vodik

Kako je već spomenuto u Uvodu, projekt prve hrvatske punionice vodika nastavak je razvoja tehnologije vodika u Hrvatskoj, te se naslanja na uspješan projekt Prvog hrvatskog bicikla na vodik iz 2016. godine. U tom projektu, doc. dr. sc. Ankica Kovač je na Zavodu za energetska postrojenja, energetiku i okoliš, FSB-a, Sveučilišta u Zagrebu, osmislila i napravila prvi hrvatski bicikl s pogonom na gorivne članke (Slika 38).



Slika 38. Prvi hrvatski bicikl na vodik

Temeljna ideja projekta bila je prilagodba postojećeg električnog bicikla na baterije na način da se umjesto baterije potrebne za pogon elektromotora postavi sustav vodika s gorivnim člancima. Kao osnova za izradu bicikla na vodik, nabavljen je električni bicikl s baterijom, klasičnog tipa pedelec. Za pogon pedeleca potrebna je snaga vozača koji okreće pedale na pedalecu, kojoj se potom pridodaje dodatna snaga iz elektromotora snage [36].

Iako postoje primjene gdje se energija potrebna za pogon elektromotora dobiva iz kombinacije baterije i sustava vodika, na ovom biciklu isključivo se električna energija dobiva iz vodika preko gorivnih članaka. Zbog same elektronike uređaja, izvorna baterija se nalazi na biciklu, kako bi *zavarala* sustav regulacije vožnje, odnosno određivanje koliko će elektromotor pomagati vozaču, koji ne može funkcionirati bez *komunikacije* s baterijom, no ista je potpuno odvojena iz sustava davanja energije elektromotoru.

Cijena pedeleca iznosila je 2 000 eura, dok je sustav vodika vrijedan oko 10 000 eura. Ukupna masa bicikla iznosi 33 kg, što je puno više u odnosu na komercijalne bicikle, ali i očekivano budući da je riječ o istraživačkom i razvojnom prototipu [37].

## 4.2. Testiranje kapaciteta spremnika bicikla na vodik

### 4.2.1. Ciljevi testiranja

Osnovni cilj testiranja bio je utvrđivanje maksimalnog kapaciteta jednog spremnika vodika u realnoj gradskoj vožnji.

Prvo, kako bi se dobili što ravnomjerniji rezultati, odlučeno je da će se cijela vožnja odvijati približno konstantom brzinom od oko 13 km/h. Kako to u realnoj vožnji nije moguće ostvariti, zadani kriteriji su bili da se cijelo vrijeme vozi u rasponu od 12 do 14 km/h, osim u slučajevima kretanja i stajanja, kada iz fizikalnih razloga to nije moguće. Cijela vožnja je odrađena u zadanim gabaritima uz par iznimaka zbog nepredviđenih situacija u prometu koje se svakodnevno događaju, ali koje nisu trajale duži vremenski period, te su stoga u statističkom smislu zanemarive.

Drugo, kako bi se što vjernije simulirala vožnja po gradu, često prekidana prometom i semaforima ili nekim drugim okolnostima, poput fotografiranja znamenitosti u turističkim prigodama, odlučeno je da će se svakih jedan kilometar zaustaviti vožnja. Prednosti ovakve strategije su sljedeće:

- puno se dosljednije oponaša stvarna gradska vožnja,
- stajanja su iskorištena za uzimanje podataka o stanju tlaka u spremniku kako bi se dobila detaljnija slika potrošnje vodika,
- stajanja pospješuju koncentraciju vozača da se drži u zadanim parametrima brzine vožnje, a i povećavaju sigurnost u prometu, štiteći kako vozača, tako i vrijednu opremu na biciklu.

S druge strane, glavni nedostatak ovakvog načina vožnje je dodatno kočenje. Tako se, zbog gubitka energije, povećava potrošnja vodika, jer se mora ponovno ubrzati od stanja mirovanja do zadane brzine vožnje. Drugim riječima, smanjuje se maksimalni kapacitet jednog spremnika, čije je utvrđivanje bio primarni cilj.

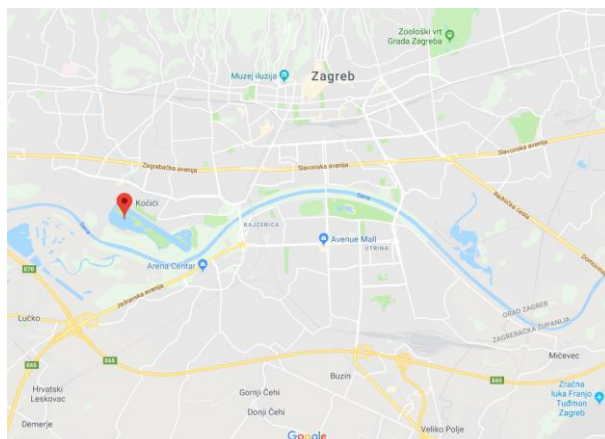
Treće, kako bi se dosegao maksimalni kapacitet spremnika, bicikl je vožen u ECO programu. To je program u kojem sustav najmanje pridonosi vozaču, te tako ima, uz naravno NO ASSIST program, najmanju potrošnju. Upravo je najmanja potrošnja vodika preduvjet utvrđivanja maksimalnog kapaciteta jednog spremnika, jer vožnja u bilo kojem drugom programu sama po svojoj definicije ne postiže željeni cilj.

Biciklu su tijekom vožnje konstantno okretane pedale, tako da je sustav gotovo cijelo vrijeme bio uključen. Iznimke su poneke blage kratke nizbrdice kada pomoć nije bila potrebna. No, kako je riječ o kružnim stazama, te su blage nizbrdice kompenzirane i blagim uzbrdicama, kada je potrošnja bila nešto veća. Sama visinska razlika između najniže i najviše točke na stazama nije prelazila dva metra, te se stoga smije reći da nije bilo većih visinskih razlika u samoj vožnji.

### 4.2.2. Lokacija

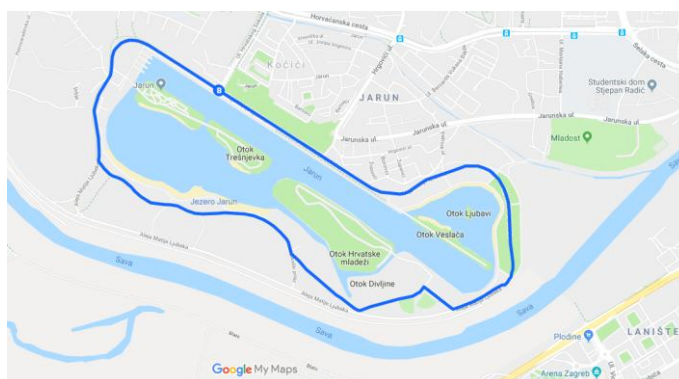
Bicikl je ispitivan na dvije lokacije. Prvotna ideja je bila ispitati ga na samo jednoj lokaciji, i to lokaciji jezero Jarun. No, zbog problema u tehničkoj provedbi samog eksperimenta, bilo je potrebno prilagoditi zahtjeve i mogućnosti, te je naknadno uvedena i druga lokacija za testiranje, u blizini FSB-a, odnosno Laboratorija za energetska postrojenja u kojemu se i nalazi garažno spremište bicikla na vodik.

#### 4.2.2.1. Lokacija Jarun



**Slika 39.** Lokacija Jarun [38]

Staza oko umjetnog jezera Jarun u jugoistočnom dijelu Zagreba (Slika 39) idealna je za provođenje eksperimenta ovakvog tipa. Riječ je o stazi kružnog oblika (Slika 40) bez većih i oštrih zavoja, ukupne dužine 6,4 km sa zanemarivim razlikama u nadmorskoj visini po čitavoj dužini. Jedina nepovoljna okolnost što stazu na sedam mjesta presijeca kolnik. Sami automobili i nisu veliki problem budući da nije riječ o prometnim cestama, no sam silazak s biciklističke staze na kolnik jest. Na tim mjestima je potrebno usporiti kako se uslijed vibracija nastalih prelazanjem preko rubnjaka ne bi oštetila oprema na biciklu.



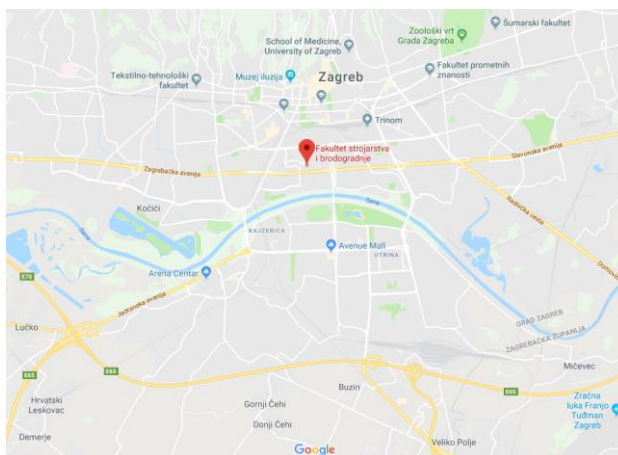
**Slika 40.** Staza Jarun [39]

Nominalno zahtijevana konstantna brzina vožnje na tim se dijelovima nije mogla osigurati, no u odnosu na druge dostupne lokacije, staza oko Jaruna je najbolji izbor, jer bi ovaj problem bio još i izraženiji negdje drugdje.

Sve vožnje na lokaciji Jarun vožene su u smjeru suprotnom od smjera kretanja kazaljki na satu u pretežito prijepodnevnom satima.

#### 4.2.2.2. Lokacija FSB

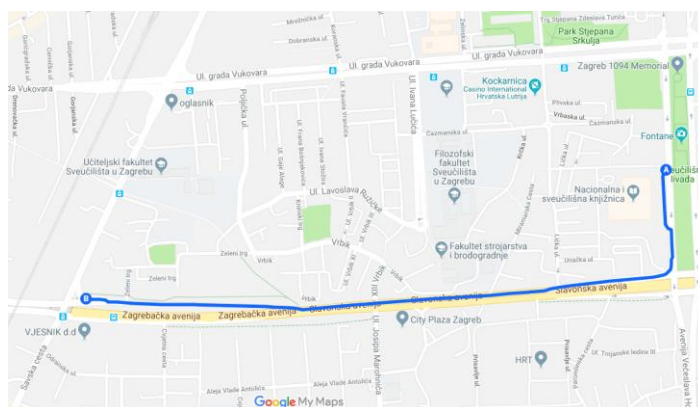
Iako nije bila u planu, tijekom održavanja trećeg eksperimenta, kada se pojavila potreba da se testiranje nastavi neki drugi dan, uvedena je i dodatna lokacija testiranja bicikla. Zbog udaljenosti jezera Jarun od FSB-a, transport i dolazak do same staze je otežan bez odgovarajućeg, unaprijed dogovorenog rasporeda i najave. Iz tog razloga uvedena je lokacija koja se nalazi u neposrednoj blizini FSB-a (Slika 41).



**Slika 41.** Lokacija FSB [40]

Staza zapravo prati biciklističku stazu sa sjeverne strane uz Slavonsku aveniju, od križanja sa Savskom ulicom do križanja s Ulicom Hrvatske bratske zajednice, te se nadovezuje na biciklističku stazu sa zapadne strane Ulice Hrvatske bratske zajednice, ispred Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Na zadanoj ruti se nalazi nekoliko manjih zavoja uz jedan oštar zavoj od  $90^\circ$ . Stazu isprespjeca pet kolničkih prijelaza od kojih su četiri pristupne ceste za parking koje nisu predstavljale veći problem, te jedna prometna ulica. Taj prijelaz označen je svjetlosnom signalizacijom.

Stazom je voženo od jednog kraja do drugog, pa potom natrag istim putem, te se stoga na nju može gledati kao na kružnu stazu (Slika 42). Na samoj stazi nema većih odstupanja u visinskoj razlici tijekom čitave njene duljine. Ukupna duljina jednog zamišljenog kruga na ovakvoj stazi iznosi 3,7 km.



**Slika 42.** Staza FSB [41]

Gotovo dvostruko manja duljina jednog kruga u odnosu na stazu Jarun, svjedoči činjenici koliko je lokacija Jarun pogodnija za ovakav tip testiranja. Na manjem krugu, kao što je ovaj na stazi FSB, postoji više prelazaka kolnika, njih 10, od čega dva puta promet zaustavlja svjetlosna signalizacija. S druge strane, kod staze Jarun postoji sedam kolničkih prijelaza na duplo dužoj stazi, te ni jedan ne zaustavlja vožnju osim u slučaju prolaza automobila. Upravo zbog tog semafora na stazi FSB, adaptirana je i strategija simulacije gradske vožnje, tako da stajanje više nije odrađeno točno svakih 1 km, već približno slično, kako bi se iskoristilo stajanje na semaforu za provjeru stanja tlaka spremnika. Na neki način, simulacija gradske vožnje sa staze Jarun, zamijenjena je stvarnom gradskom vožnjom po ulicama Zagreba.



### 4.2.3. Provedba testiranja

U svrhu projekta napravljena su tri testiranja. Nažalost, prva dva se mogu okarakterizirati kao neuspješna, zbog nepredviđenih okolnosti i problema koji su se ukazali na samom testiranju, a koji su opisani u potpoglavljima koja slijede. Zbog toga će se prva dva testiranja samo spomenuti i ukratko opisati, dok će se detaljno razmatrati isključivo rezultati trećeg testiranja. Ipak, na njima su stečena neka vrlo vrijedna znanja, koja su se kasnije pokazala izrazito korisna kod organizacije i pripreme trećeg testiranja.

#### 4.2.3.1. Prvo testiranje

Prvo je testiranje provedeno 10. travnja 2018. godine na lokaciji Jarun. Prije svega, valja napomenuti kako je samo testiranje zamišljeno kao probno, na kojemu bi se ustvrdile neke značajke potrošnje vodika, te kako bi se za sljedeće, pravo testiranje poduzele potrebne predradnje s ciljem bržeg i kvalitetnijeg obavljanja zadatka.

Vožnja je započela oko 9:00 h. No i prije kraja prvog kruga, vožnja je prekinuta zbog problema s baterijom od 13 V koja se nenadano ispraznila zbog greške na mjernom instrumentu kojom je provjeravana prije samog testiranja. Potom je vožnja prekinuta na otprilike 3 h, dok se nije donijela zamjenska. Bicikl je tada ponovno osposobljen za nastavak vožnje.

Odvoženo je otprilike 15 km kada se pojavio problem s nedostatkom vodika. Kasnijom analizom procijenjeno je da je do gubitka vodika došlo na procesnoj liniji. Moguće je da se dogodilo preveliko propuštanje na regulatoru tlaka ili je jednostavno došlo do puštanja vodika na nekom drugom spoju. Pravi razlog nije ustvrđen. Testiranje je nakon kvara prekinuto oko 13:00 h.

Prilikom vožnje održavana je brzina od otprilike 19 km/h, isprobavani su različiti programi vožnje (HIGH CONSUMPTION, NORMAL, ECO, NO ASSIST). Temperatura zraka se kretala od jutarnjih 12 °C do 19 °C poslijepodne. Prevladavalo je oblačno vrijeme i puhao je umjereno jak vjetar.

Nakon testiranja predložena su poboljšanja koja bi se primijenila na idućem testiranju:

- drugačija regulacija spremnika i češća kontrola regulatora tlaka,
- bolja dokumentacija podataka - snimanje zaslona na upravljaču tijekom vožnje,
- bolja obrada podataka - kako iskoristiti podatke i koje podatke bilježiti,
- smanjenje prosječne brzine vožnje,
- vožnja u istom programu cijelo vrijeme testiranja,
- vožnja u boljim vremenskim uvjetima - bez vjetra i na prikladnijoj temperaturi zraka za vozača.

Većina od tih stavki primijenjena je već na drugom testiranju dva tjedna kasnije.

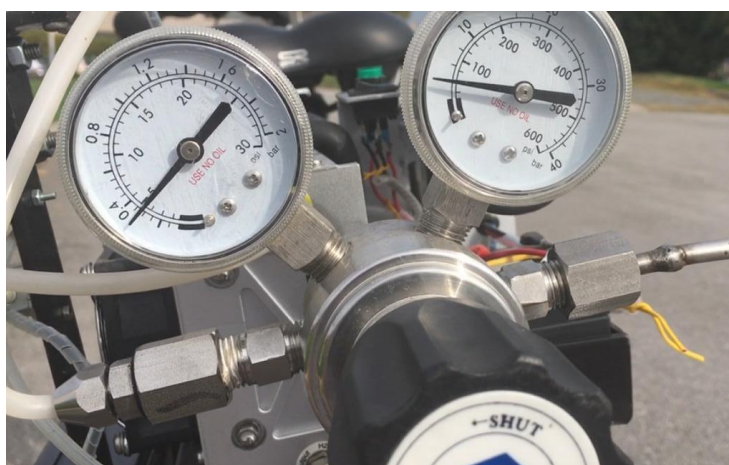
#### 4.2.3.2. Drugo testiranje

Drugo testiranje provedeno je 24. travnja 2018. godine, također na lokaciji Jarun. Vrijeme je bilo puno pogodnije za provedbu ovakvog tipa testiranja, sunčano s mjestimičnom naoblakom i bez vjetra. Testiranje je započelo u 9:00 h i trajalo je do 12:00 h. Temperatura se kretala od 15 °C na početku testiranja do 22 °C kada je završilo.

Napravljene su određene razlike u odnosu na prvo testiranje:

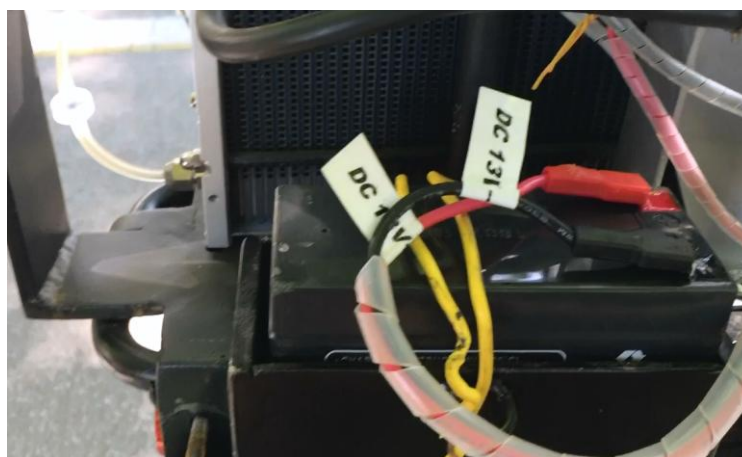
- cijela se vožnja dokumentirala,
- određena je prosječna brzina vožnje od 13 km/h
- kako bi se simulirala gradska vožnja, svakih 2 km je planirano stajanje kako bi se bilježilo stanje u spremniku.

Posebna je pažnja posvećena regulatoru tlaka (Slika 43), kako bi se pažljivije kontrolirao njegov rad. Naime, kako je to iskustveno zaključeno iz prethodnih vožnji, potrebna otvorenost ventila treba biti tolika da se na strani gorivnih članaka postigne pretlak u iznosu od 0,45 do 0,55 bara. Budući da se tijekom vožnje ta vrijednost mijenja ovisno o tlaku vodika u spremniku, regulator je potrebno povremeno podešavati kako bi bili u adekvatnim granicama. Regulacija se odvija ručno.



**Slika 43.** Regulator tlaka

Na testiranju je napravljeno svega 11,2 km. Testiranje je moralo biti ranije prekinuto zbog problema s neispravnom baterijom od 13 V (Slika 44).



**Slika 44.** Baterija sustava od 13 V

Ustanovljeno je kako su zbog brojnih ciklusa punjenja i pražnjenja baterije jednostavno promijenile svoje početne značajke, te više nisu adekvatne za kvalitetna testiranja. Problem upravljanja baterijama tako se nametnuo kao glavna prepreka nesmetanom testiranju.

S druge strane, u tih nekoliko kilometara koliko je napravljeno, potrošnja vodika se pokazala puno učinkovitijom nego na prvom testiranju, što je samo potvrdilo pretpostavku da je u prvom testiranju bilo ozbiljnih propusta u regulaciji vodika, te da je on istjecao u atmosferu. Manometar je pokazivao 9,2 bar tlaka u vrlo hladnom spremniku čija temperaturu nije izmjerena. Dan kasnije, kada se spremnik ugrijao na temperaturu okoline, tlak u spremniku porastao je na 12 bara.

S obzirom na točnije praćenje potrošnje vodika uočene su dodatne mogućnosti poboljšanja s kojima je napravljena pretpostavka da bi jedan spremnik mogao biti dostatan za 40 do 50 km. Ovu pretpostavku trebalo je potvrditi na trećem testiranju. Također, uočene su još neke promjene koje bi trebale biti izvedene kako bi se što kvalitetnije provelo istraživanje. Primjer je i smanjenje udaljenosti između dva stajanja, s dva na jedan kilometar.

#### 4.2.3.3. *Treće testiranje*

Treće testiranje napravljeno je u rujnu 2018. godine. Primarna ideja bila je obaviti testiranje 12. rujna. No, ubrzo se ispostavilo da jedan dan neće biti dovoljan. Zbog toga je treće testiranje produženo za dva dodatna dana.

Dakle, prvi dan testiranja bio je 12. rujna 2018. Testiranje je nastavljeno tri dana kasnije, 14. rujna, a završeno 17. rujna, pet dana nakon početka.

Glavni razlog produženja testiranja bio je već opisani problem s baterijama sustava od 13 V koje nisu mogle izdržati intenzivnu vožnju, već su se morale napuniti prije nastavka testiranja. Kako se spremnik vodika tijekom vožnje hladi, tlak u spremniku po završetku vožnje nije bio istovjetan onome s kojim bi se testiranje nastavilo drugi dan, jer se spremnik u dva dana ugrijao na temperaturu okoline, odnosno temperaturu u spremniku bicikla u zgradi laboratorija od 22 °C. To se jasno vidi u dijagramima pada tlaka u spremniku, u tekstu koji slijedi, s obzirom na prijeđene kilometre, čiji podaci su uzimani vizualno preko manometra na strani spremnika.

Postavljeni su sljedeći parametri vožnje:

- brzina vožnje se kretala između 12 i 14 km/h
- svakih 1 km napravljeno je stajanje u kojemu je vozač sišao s bicikla, očitao tlak i nastavio vožnju kako bi se simulirao gradski tip vožnje,
- program vožnje bio je ECO,
- gume na biciklu su bile napumpane na 3,5 bara, kroz sva tri dana testiranja,
- cijela vožnja je dokumentirana s mobilnom kamerom.

##### 4.2.3.3.1. *Prvi dan testiranja*

Prvi dan testiranja, 12. rujna, započeo je u 9:30 h, a završen u 12:45 h na stazi Jarun. Primarna ideja bila je iskoristiti cijeli dan kako bi se ostvarilo predviđenih 50 km. U tu svrhu osigurane su tri identične baterije koje su se pokazale problematičnima na prethodnim testiranjima. I ovoga puta su bile razlog što vožnja nije izvedena do kraja.

Ukupno je napravljeno 26 km, pri čemu su iskorištene sve tri baterije. Uvjeti na stazi bili su dobri. Vrijeme je bilo sunčano bez vjetera. Atmosferski tlak je iznosio 1023 hPa, a relativna vlažnost zraka se kretala od 84% ujutro do 56% popodne, dok je temperatura zraka porasla s 19 °C na 27 °C.

#### 4.2.3.3.2. Drugi dan testiranja

Testiranje je nastavljeno za dva dana, 14. rujna. Kako nije postojala objektivna mogućnost da se ponovno vozi na stazi Jarun, u međuvremenu je pripremljena alternativna dionica, staza FSB, koja se nalazi u neposrednoj blizini Laboratorija za energetska postrojenja.

Vožnja je započela u 8:30 h te je trajala do 11:50 h. Ponovno su uzrok prekida bile problematične baterije. Također su iskorištene sve tri baterije, a ukupno je prijeđena udaljenost od 22 km. Vremenski uvjeti nisu se previše razlikovali od prvog dana testiranja. Vrijeme je bilo sunčano sa slabim vjetrom. Temperatura zraka se kretala od početnih 17 °C do konačnih 25 °C, dok je relativna vlažnost zraka pala s vrijednosti od 89% na vrijednost od 72%. Atmosferski tlak je iznosio 1016 hPa.

Razlika u odnosu na prvi dan bila je što se očitavanje vrijednosti tlaka nije vršilo svakih 1 km budući da su prometni uvjeti diktirali tempo stajanja. Ukoliko svjetlosna signalizacija nije dozvoljavala prelazak, tada se ta pauza iskoristila kao stajanje. Također, ukoliko je bio dozvoljen prolaz, tada se stajanje obavilo na mjestu koje nije bilo toliko prometno izloženo. Dakle, ovisno o svjetlosnoj signalizaciji, ostala stajanja su se radila proizvoljno od strane vozača, kako bi se što kvalitetnije pokušao oponašati započeti ritam stajanja od svakih 1 km.

#### 4.2.3.3.3. Treći dan testiranja

Treći dan testiranja, i kako se pokazalo završni, napravljen je 17. rujna. Ponovno je korištena staza FSB. ovoga puta, iskorištene su samo dvije baterije, a prekid vožnje bio je uvjetovan manjkom vodika u spremniku. Tlak vodika u spremniku pao je ispod razine u kojoj bi se mogao pravilno očitati. S obzirom na relativno veliku masu bicikla od 33 kg, razumno je bilo ustvrditi da su količine vodika u spremniku nedostatne za kvalitetnu vožnju, iako spremnik nije bio potpuno prazan. Sama vožnja počela je u 9:40 h, a trajala je do 12:00 h. Vremenski uvjeti bili su slični kao i prethodnih dana: sunčano uz slab vjetar. Temperatura se kretala od jutarnjih 19°C do popodnevnih 23°C. Relativna vlažnost zraka pala je s početnih 74% na konačnih 65%, dok je atmosferski tlak iznosio 1023 hPa.

Ukupno je odvoženo 18 km, što sumarno s prethodna dva dana testiranja daje brojku od 66 km jednim punim spremnikom vodika. Samo testiranje pozitivno je opovrgnulo početnu hipotezu od pretpostavljenih 40 do 50 km, te je ponudilo stvarnu dokazanu vrijednost veću za otprilike 30%.

### 4.3. Rezultati testiranja

Kako je prethodno navedeno, u razmatranje će se uzeti rezultati samo trećeg testiranja, budući da su rezultati s prva dva testiranja okarakterizirani kao nepotpuni i nepouzdana. Zbog nedostatka vremena, nisu provedena dodatna istraživanja, iako su slična istraživanja planirana u skoroj budućnosti. Nakon provedenih dodatnih istraživanja bit će moguće provesti usporednu analizu te će se moći dati puno kvalitetnija slika potrošnje vodika u biciklu.

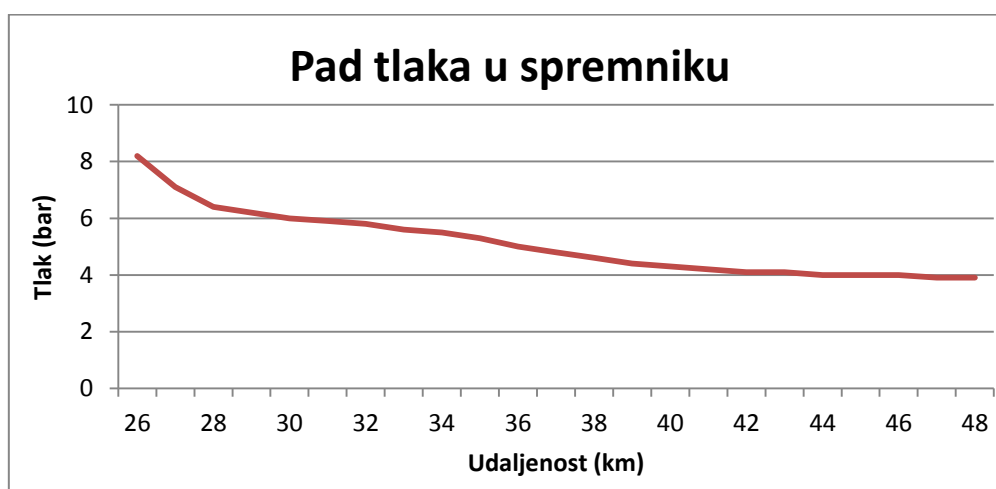
U ukupno tri dana vožnje bicikla, prijeđeno je 66 km, što je više od početne pretpostavke od 50 km s kojom je testiranje započeto. Glavni razlog pogrešne procjene bio je sam način praćenja potrošnje vodika preko pada tlaka u prethodnim vožnjama. Naime, pri višim tlakovima, pad tlaka je znatno veći za jedan prijeđen kilometar, u odnosu na niži tlak vodika u spremniku. Iako je takvo ponašanje vodika predviđeno i u ranijim analizama, testiranja su pokazala da je razlika značajnija nego što se predviđalo.

Bitan faktor u razmatranju pada tlaka u spremniku tijekom vožnje je i pad temperature. Zbog istjecanja plina iz spremnika konstantnog volumena dolazi do pada temperature jer je proces istjecanja *prebrz* za uravnoteživanje temperature u spremniku s temperaturom okoline. Taj pad temperature dodatno snižava tlak u spremniku u odnosu na neki referentni koji bi postojao u spremniku da se proces odvija pri približno konstantnoj temperaturi. Krivulje pada tlaka prikazane su dijagramima na slikama koje slijede. Kod prvog dana testiranja vidljivo je da se krivulja pada tlaka ne ponaša linearno (Slika 45). Na samom početku vožnje, krivulja ima strmi pad tlaka sa svakim prijeđenim kilometrom, da bi s vremenom, krivulja imala sve blaži i blaži pad.



Slika 45. Pad tlaka - prvi dan

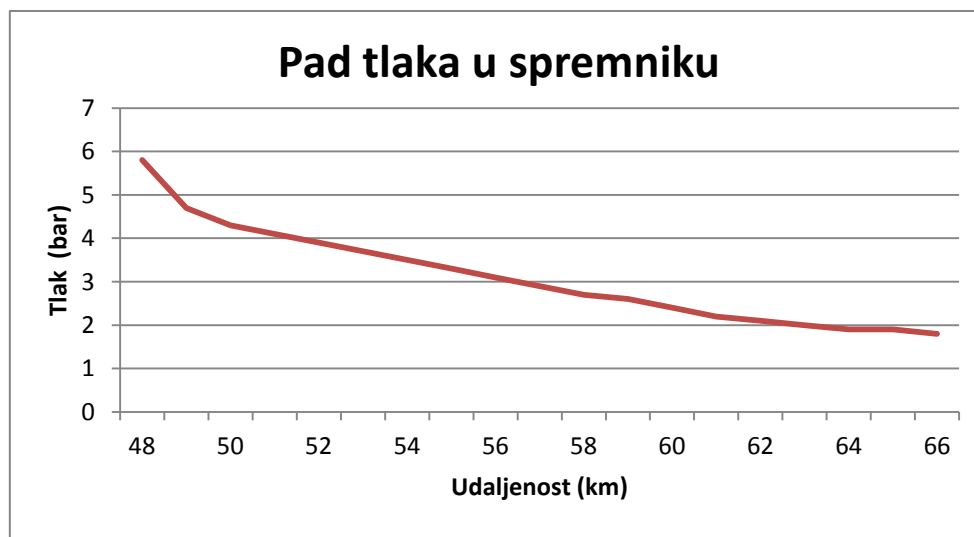
Tijekom prvog dana prijeđeno je 25,4 kilometara, a tlak u spremniku se spustio s početnih 30 bara i okolišne temperature 19 °C, na krajnjih 6 bara i to na temperaturi dosta nižoj od okolišne koja se nije mogla mjeriti budući da spremnik nije opremljen termometrom. U periodu između prvog i drugog testiranja, spremnik se ponovno ugrijao na okolišnu temperaturu od 22 °C, te je tlak u spremniku iznosio 8,2 bara. Taj podatak puno je realniji za usporedbu s početnih 30 bara, budući da je riječ o približno jednakoj temperaturi od 19 °C s kojom je vožnja započeta. Dijagram sličnih značajki, dobiven je analizom podataka iz drugog dana testiranja (Slika 46). Također, u prvim kilometrima, pad tlaka je bio veći, te je dijagram u tom području strmiji. Ipak, vidljiva je razlika da to ipak nije tako izraženo kao u slučaju kada se krenulo u vožnju sa spremnikom pri većem tlaku.



Slika 46. Pad tlaka - drugi dan

U drugom danu testiranja prijeđena je udaljenost od 22,1 km. Početna vrijednost tlaka u spremniku na temperaturi okoline od 17 °C bila je već spomenutih 8,2 bara, dok je konačna vrijednost, na dosta nižoj nepoznatoj temperaturi iznosila 3,9 bara. Analogno procesu između prvog i drugog dana, temperatura vodika u spremniku se povećala na temperaturu u spremištu bicikla u zgradi laboratorija od 22 °C, te je tlak porastao na 5,8 bara.

Treći dan testiranja donio je i završni dijagram kretanja tlaka u spremniku vodika ovisno o prijeđenim kilometrima (Slika 47). I ovdje je primjetna slična značajka ponašanja pada tlaka u dijagramu. Tlak od početnih 5,8 bara pada ispod razine razlučivosti na manometru koja iznosi 2 bara, na iznos tlaka od 1,7 bara.



Slika 47. Pad tlaka - treći dan

Promatrajući rezultate dobivene testiranjima mogu se zaključiti dvije stvari: Prvo, pad temperature u spremniku je izraženiji u uvodnim kilometrima, kada je razlika u padu temperature veća za svaki kilometar, nego kasnije tijekom vožnje, kada je *početna* temperatura u startu niža, pa je i sam pad temperature niži za svaki prijeđeni kilometar. Isto tako, pri nižim temperaturama, puno je veći temperaturni gradijent između plina u spremniku i okoliša, pa je i izmjena topline veća. Drugim riječima, kada je spremnik na nižoj temperaturi, okoliš mu predaje više topline.

Druga stvar koja se ističe je razlika pada tlaka u odnosu na sam tlak u spremniku. Pri višim tlakovima, pad tlaka je daleko izraženiji za svaki prijeđeni kilometar, nego što li je to slučaj pri nižim tlakovima.

Upravo zbog toga postavlja se pitanje optimizacije spremnika vodika na biciklu. Kako je i ranije spomenuto, maksimalni tlak testiranog spremnika vodika na biciklu je 30 bara. Rezultati istraživanja otvorili su mogućnost primjene manjeg spremnika vodika, maksimalnog tlaka od 16 bara, te istog volumena. Pretpostavka je da bi potrošnja vodika u tom slučaju bila puno učinkovitija, jer bi se sam spremnik punio na puno manji tlak, a na uštrb neznatno manjeg broja kilometara.

U provedbi testiranja potrošeno je 4,5 g vodika. Spremnik je mjereno prije i nakon završetka testiranja. S obzirom na znatno veću masu samog spremnika u odnosu na vodik u njemu, ove rezultate valja uzeti s rezervom, zbog mogućih pogrešaka u mjernom uređaju, te očitavanju podataka.

**Tablica 14.** Prikaz rezultata testiranja bicikla

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| Vremenski period  | 12. rujan 2018. - 17. rujan 2018. |
| Vrijeme trajanja eksperimenta   | 3 dana                            |
| Ukupno vrijeme vožnje $t_{u,B}$ , h   | 8:50                              |
| Efektivno vrijeme vožnje $t_{e,B}$ , h<br>(bez stajanja - gradska vožnja)       | 5:05                              |
| Maksimalan domet $l_{max,BC}$ , km  | 66                                |
| Masa potrošenog vodika $m_{hy,BC}$ , g  | 4,5                               |
| Prosječna potrošnja $B_A$ , g/km  | 0,0682                            |
| Prosječna brzina vožnje $v_{a,BC}$ , km/h                                       | 13                                |
| Raspon brzine tijekom vožnje, km/h  | 0 - 17                            |
| Maksimalna brzina bicikla $v_{max,BC}$ , kmh<br>(nije dosegnuta u testiranjima) | 28                                |
| Maksimalni tlak u spremniku $p_{max,BC}$ , bar                                  | 30                                |
| Minimalni tlak očitani u spremniku vodika $p_{min,BC}$ , bar                    | 1,8                               |
| Tlak u gumama $p_{tr,BC}$ , bar   | 3,5                               |
| Masa bicikla $m_{BC}$ , kg  | 33                                |
| Atmosferski tlak $p_A$ , hPa  | 1 016 - 1 023                     |
| Temperatura zraka $T_A$ , °C  | 17 - 27                           |
| Relativna vlažnost zraka $r_A$ , %  | 56 - 89                           |

Kada bi se uzelo u razmatranje prijedeni broj kilometra te razlika u masi, može se dobiti i prosječna potrošnja vodika.

$$B_A = \frac{m}{l} = \frac{4,5}{66} = 0,0682 \text{ g/km} \quad (3)$$

Ukupni rezultati, koji uključuju podatke o uvjetima izvođenja testiranja, te mjerenim i proračunatim vrijednostima dani su u tablici (Tablica 15).

## 5. PRORAČUNI U AUTONOMNOJ PUNIONICI VODIKA

### 5.1. Proračun proizvodnje električne energije i proizvodnje vodika u punionici

Kako bi se izračunao godišnji potencijal proizvodnje vodika u punionici, potrebno je proračunati proizvodnju energije same punionice.

Proizvedena električna energija u punionici koristi tri glavna potrošača:

- sustav za proizvodnju vodika,
- sustav LED rasvjete,
- sustav grijanja i hlađenja.

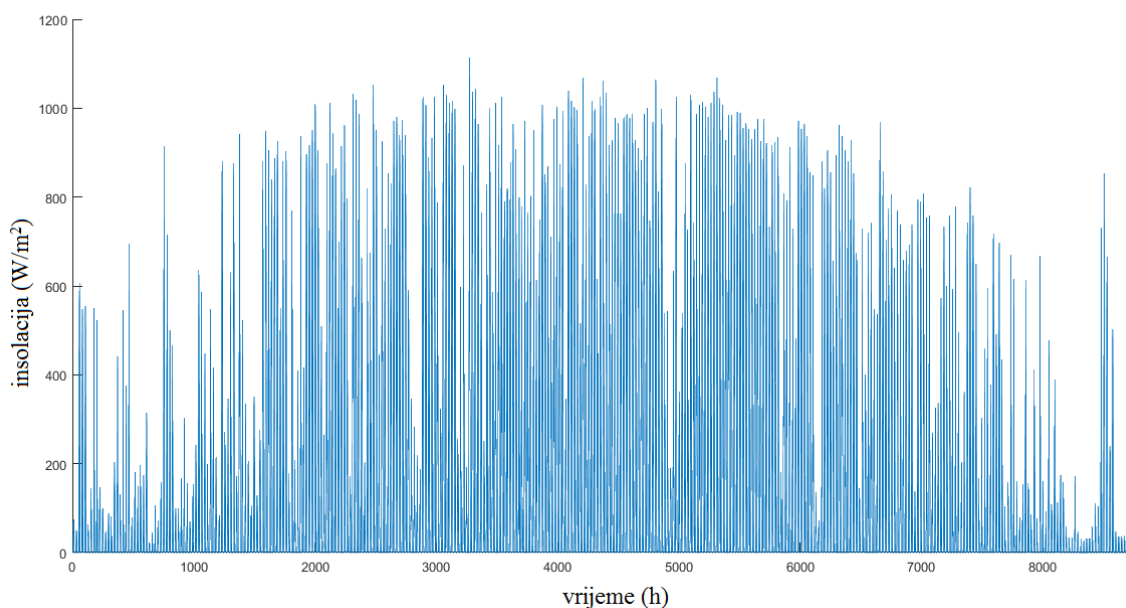
Model je postavljen tako da prezentira koliko je električne energije dostupno sustavu za proizvodnju vodika, koji uključuje elektrolizator i punjač, kada se oduzme energija potrebna za pokrivanje gubitaka sustava LED rasvjete i sustava grijanja i hlađenja. Potrošnja sustava LED rasvjete opisana je kao konstantna potrošnja od 250 W kada nema danjeg svjetla dok je sustav grijanja i hlađenja optimiziran ovisno o vanjskoj temperaturi zraka. Kada temperatura zraka padne ispod +5 °C uključuje se sustav grijanja, a kada temperatura zraka prijeđe vrijednosti od +25 °C uključuje se sustav hlađenja.

#### 5.1.1. Ulazni podaci

Podaci su preuzeti iz Državnog hidrometeorološkog zavoda te uključuju sljedeće podatke:

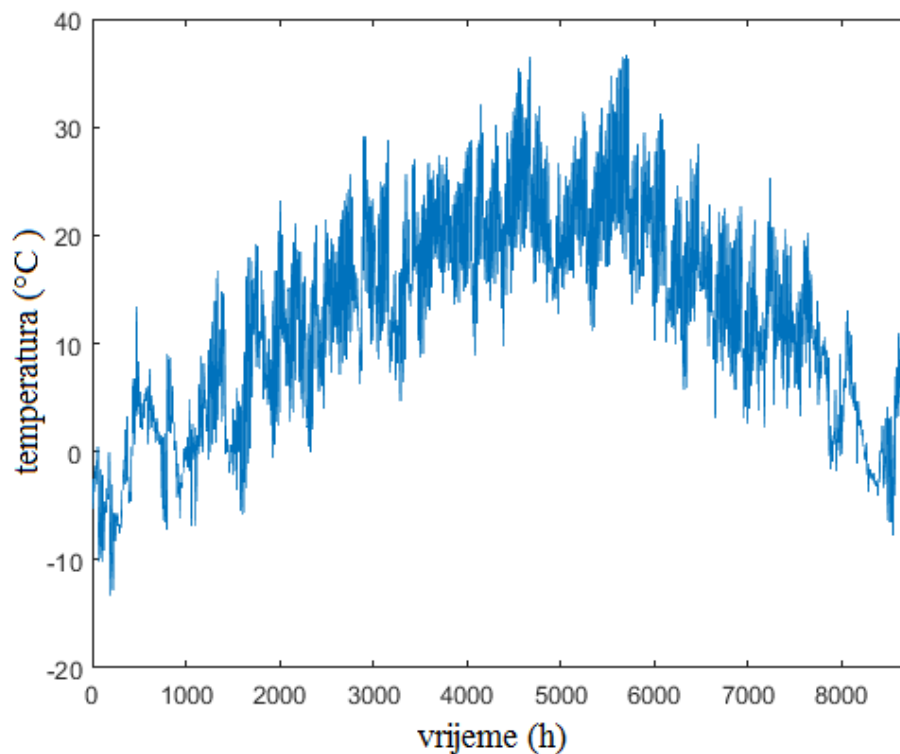
- globalno sunčevo ozračenje  $H_t$  za nagnute plohe 30° za Zagreb /  $W/m^2$  (Slika 48),
- temperature okoline  $T$  za Zagreb / °C (Slika 49).

Podaci obuhvaćaju satne podatke za temperaturu i insolaciju za cijelu godinu za određene referentne godine, u razdoblju od 1. ožujka 2004. do 28. veljače 2013. godine.



**Slika 48.** Godišnje kretanje globalnog sunčevog ozračenja  $H_t$  za nagnute plohe 30° za Zagreb





**Slika 49.** Godišnje kretanje temperature okoline T za Zagreb

### 5.1.2. Model proračuna

Za potrebe okvirnog proračuna proizvodnje vodika, korištena je jednadžba izlazne snage iz FN modula:

$$P = \frac{H_t}{H_{ref}} P_N \left( 1 + \gamma(T - T_{ref}) \right) \eta_p \quad (4)$$

Gdje je:

$P$  - izlazna snaga, W

$P_N$  - nazivna snaga FN modula, W (za FN modul iznosi 270 W)

$H_t$  - globalno sunčevo ozračenje,  $W/m^2$

$H_{ref}$  - referentno ozračenje,  $W/m^2$  (za STC iznosi  $1\,000\,W/m^2$ )

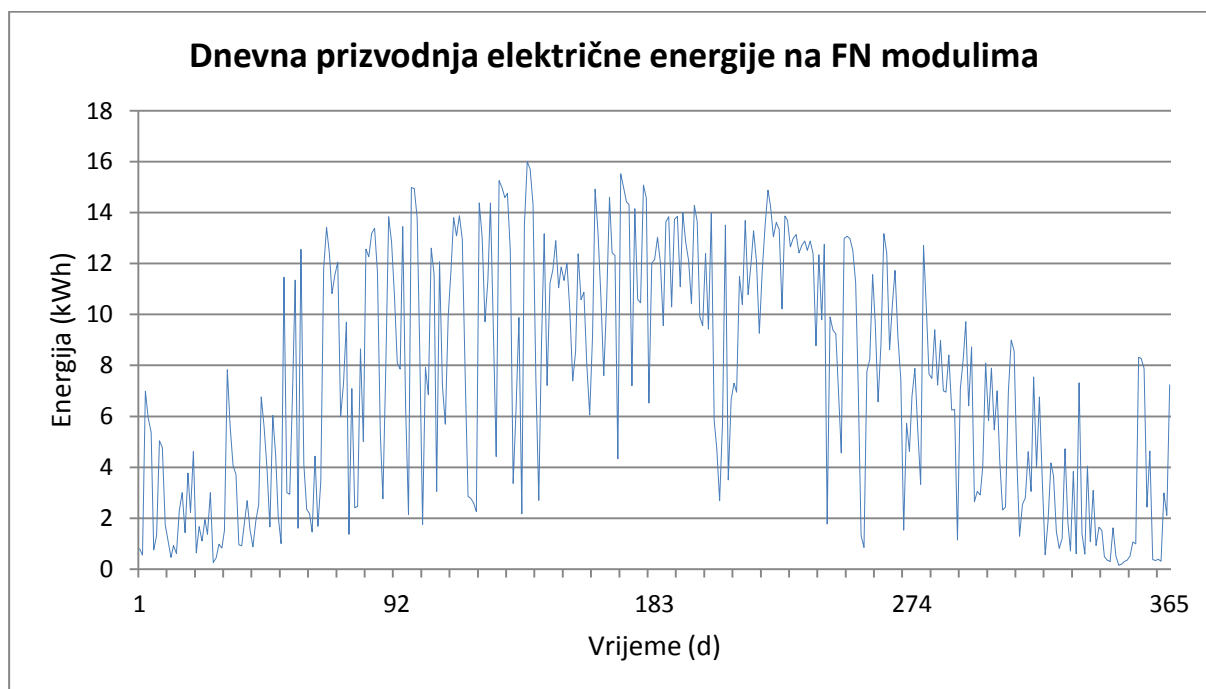
$\gamma$  - korekcijski faktor (za polikristalni Si iznosi -0,0055)

$T$  - vanjska temperatura zraka, °C

$T_{ref}$  - referentna temperatura, °C (za STC iznosi 25 °C)

$\eta_p$  - učinkovitost proizvodnje električne energije punionice uslijed gubitaka ( $\eta_p=0,85$ )

Proračun je realiziran tako da su za svaki sat uzimani podaci o prosječnoj vanjskoj temperaturi, te prosječnoj insolaciji, te bi se rezultati sumirali za svaki dan. Rezultati o dnevnoj proizvodnji prikazani su dijagramom dnevne proizvodnje energije na FN modulima, i uključuje ukupni kapacitet sunčeve punionice od 2,16 kW, odnosno svih 8 modula (Slika 50). Ukupno se u godini generira 2 709,8 kWh električne energije.

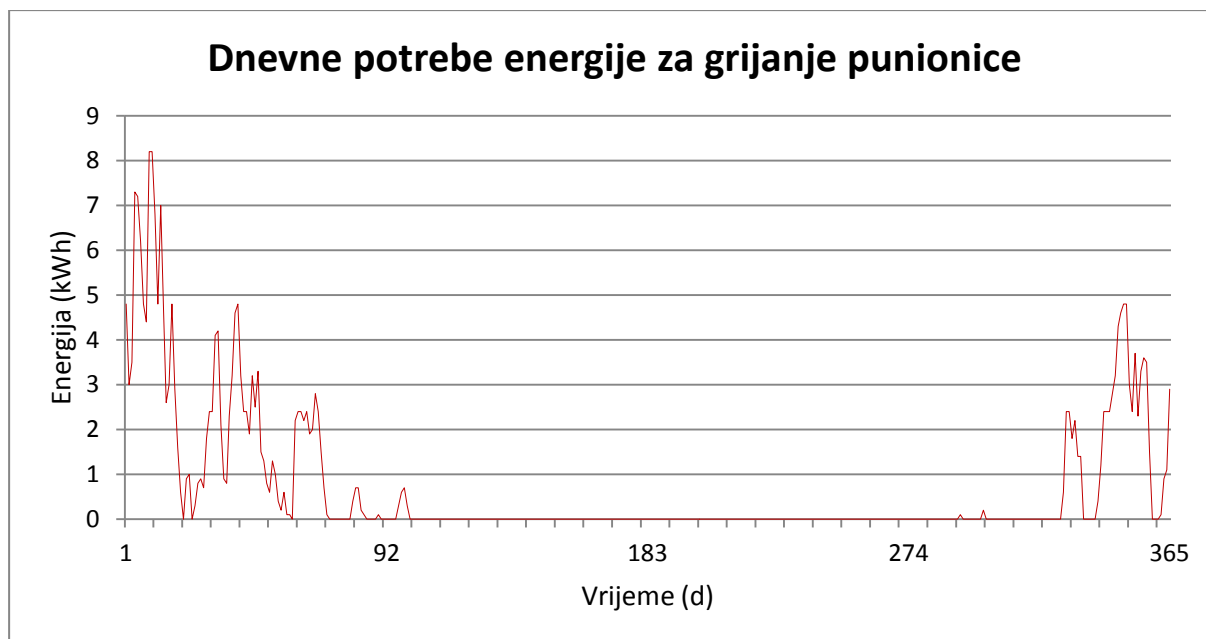


**Slika 50.** Dnevna proizvodnja energije na FN modulima

Rad grijalica definiran je jednostavnom regulacijom, ovisnoj o vanjskoj temperaturi:

- kada temperatura padne ispod  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  uključuje se sustav od 100 W,
- kada temperatura padne ispod  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  uključuje se sustav od 200 W,
- kada temperatura padne ispod  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  uključuje se sustav od 400 W.

Budući da oprema proizvodi otpadnu toplinu, a kućište je zatvoreno i toplinski izolirano, pretpostavljeno je da je ovakav sustav regulacije dostatan za osiguravanje potrebnih parametara za rad sustava. Godišnja potrošnja grijalica iznosi 262,5 kWh, a dana je i dnevna potrošnja energije za grijanje (Slika 51).

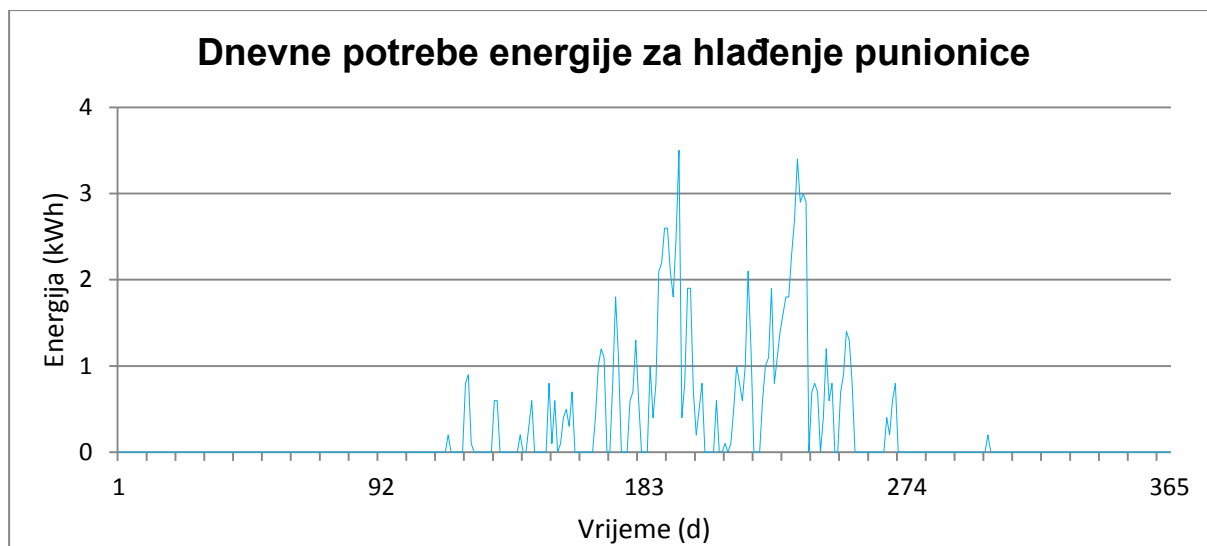


**Slika 51.** Dnevne potrebe energije za grijanje

Sukladno modelu sustavu grijanja, modelirano je i hlađenje kućišta:

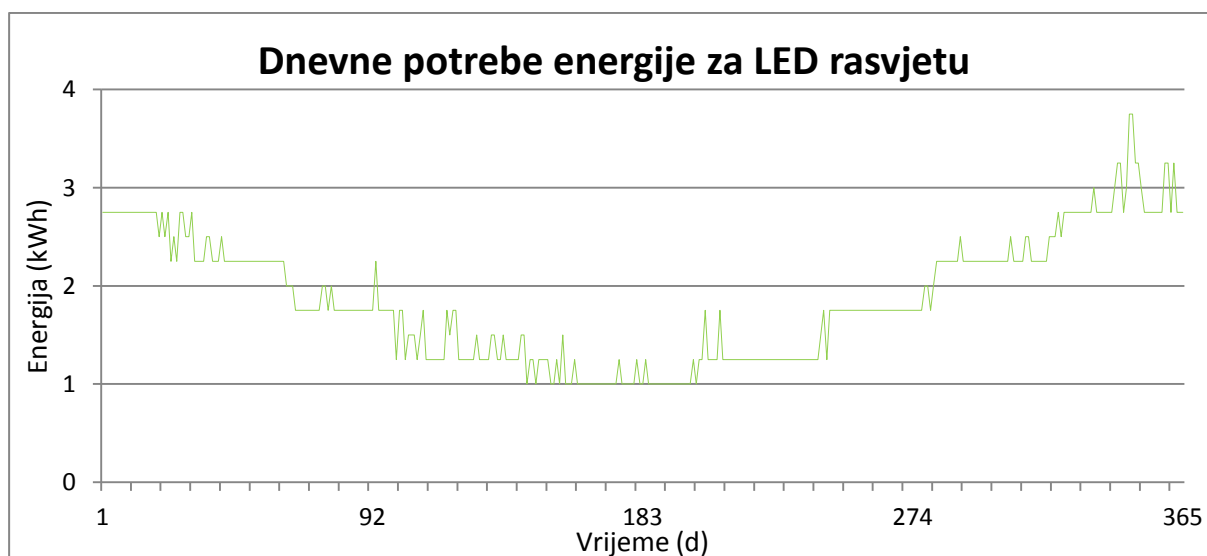
- kada temperatura naraste iznad 25 °C uključuje se sustav od 100 W,
- kada temperatura naraste iznad 30 °C uključuje se sustav od 200 W,
- kada temperatura naraste iznad 35 °C uključuje se sustav od 400 W.

Budući da oprema proizvodi otpadnu toplinu, kućište je zatvoreno i toplinski izolirano, potrebno je uključiti sustav hlađenja i već na nižim temperaturama kako bi se osigurao normalan rad elektrolizatora i druge opreme. Ukupna godišnja potreba za hlađenje kućišta iznosi 98 kWh, a dijagramom su dane dnevne potrebe za hlađenje (Slika 52).



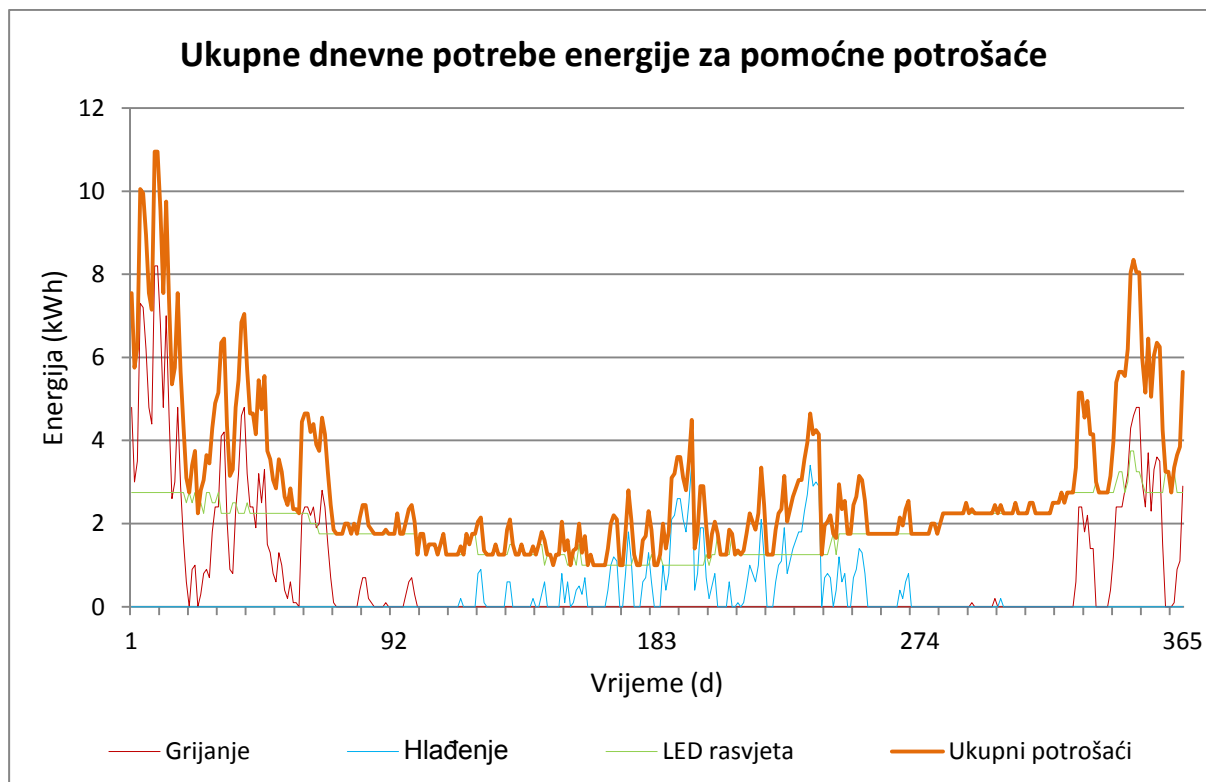
Slika 52. Dnevne potrebe energije za hlađenje

Punionica je opremljena i sustavom LED rasvjete ukupne snage 250 W. Zbog ušteda energije, sustav je projektiran tako da se rasvjeta uključi nestane danje svjetlosti. Također, rasvjeta je regulirana da ne radi između 1 i 5 sati ujutro. U proračunu, to je definirano podacima globalnog sunčevog ozračenja. Kada je insolacija ispod 1 W/m<sup>2</sup> tada sustav pretpostavlja da je vrijeme za uključivanje LED rasvjete. Godišnja potreba energije za rasvjetu u takvom režimu rada iznosi 681,5 kWh, a dijagramom je dana dnevna potreba energije za rasvjetu (Slika 53).



Slika 53. Dnevne potrebe energije za LED rasvjetu

Ukupne dnevne potrebe energije za sva tri potrošača dana su dijagramom ukupnih potreba energije pomoćnih sustava (Slika 54). gledano na godišnjoj razini, ukupne potrebe energije za pokrivanje potreba pomoćnih sustava iznosi 1 042 kWh, odnosno ukupno 38,45% ukupno proizvedene energije na FN modulima.



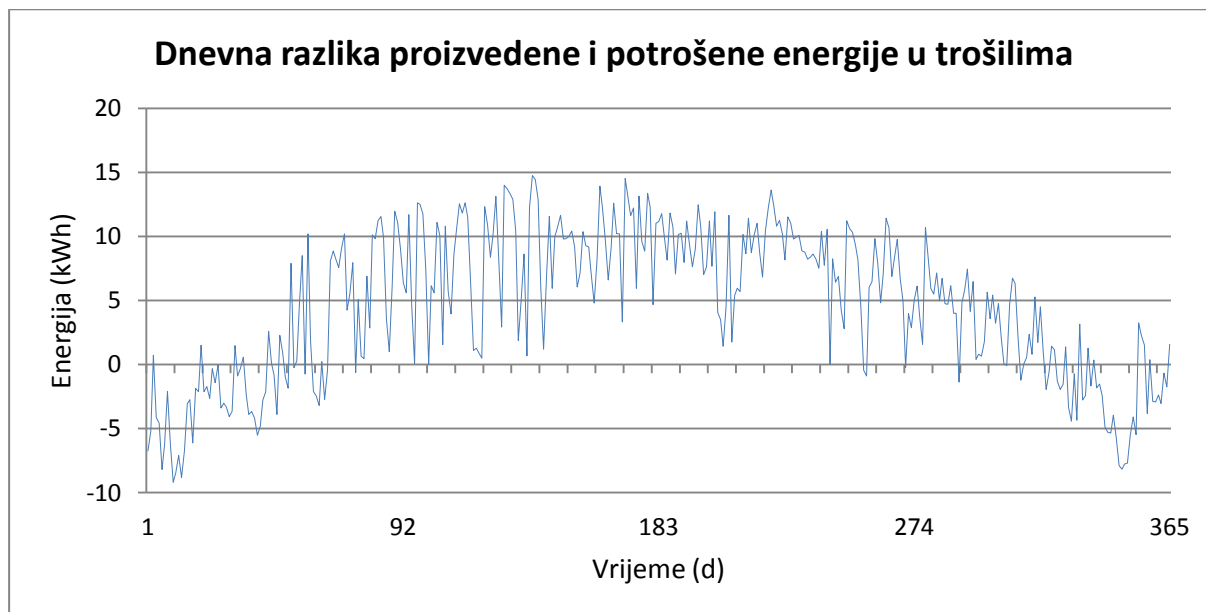
**Slika 54.** Ukupne dnevne potrebe potrošača

Najveće dnevne potrebe postoje zimi kada su zajedničke dnevne potrebe rasvjete i grijanja dosežu maksimum. Gledajući ukupnu potrošnju svakog pojedinog elementa sustava kroz godinu dana, vidljivo je da LED rasvjeta najveći potrošač energije (Slika 55).



**Slika 55.** Udjeli pojedinih potrošača u ukupnoj potrošnji

Kada se uspoređi dnevna proizvodnja na FN modulima s potrošnjom pomoćnih sustava dobije se realnija slika dostupne energije za proizvodnju vodika (Slika 56).



**Slika 56.** Dnevna razlika između proizvedene energije na FN modulima i potrošnje na pomoćnim sustavima punionice

Iz dijagrama je vidljivo da u zimskim mjesecima postoje gubici na dnevnoj bazi u punionici. Takvo ponašanje je i očekivano zbog velikih energetske potreba zimi, te slabijeg globalnog ozračenja i manjeg broja sunčanih sati. To ne samo da onemogućuje proizvodnju vodika u tom periodu, nego zahtjeva i osiguravanje dostatne energije u periodu kada postoji pozitivan potencijal za proizvodnju vodika. Ukupno dostupna energija za proizvodnju vodika na godišnjoj iznosi 1 667,8 kWh.

**Tablica 15.** Prikaz godišnjih iznosa energija

|   |         |
|---|---------|
| Proizvedeno energije na FN modulima $E_{FN}$ , kWh/god  | 2 709,8 |
| Potrebna energija za grijanje $E_H$ , kWh/god           | 262,5   |
| Potrebna energija za hlađenje $E_C$ , kWh/god           | 98,0    |
| Potrebna energija za LED rasvjetu $E_L$ , kWh/god       | 681,5   |
| Dostupna energija za proizvodnju vodika $E_P$ , kWh/god | 1 667,8 |

### 5.1.3. Proračun punjenja spremnika vodika na biciklu na vodik

U Laboratoriju za energetska postrojenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, 17. prosinca 2018. napravljeno je istraživanje punjenja spremnika vodika pomoću elektrolizatora i punjača koji se koriste u punionici. Kao izvor električne energije poslužio je jedan laboratorijski izvor koji se koristi prilikom takvih istraživanja u Laboratoriju. Ispitnu liniju (Slika 57) još je činio spremnik demineralizirane vode.



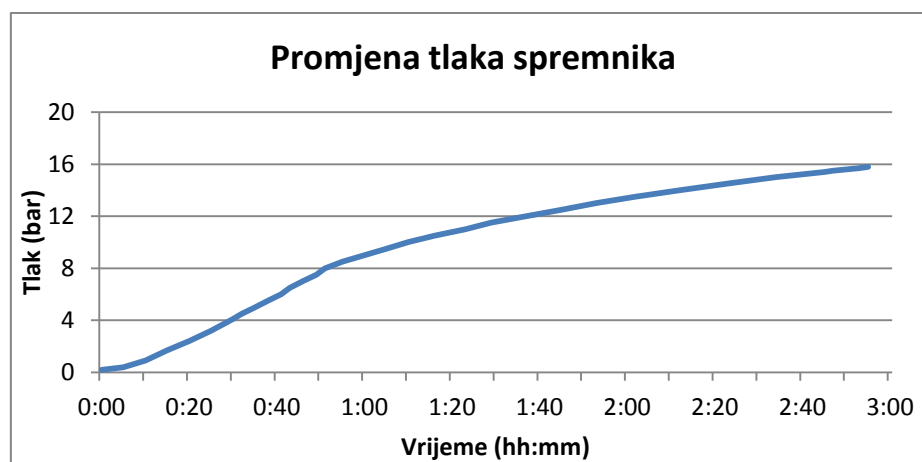
**Slika 57. Ispitna linija punjenja spremnika**

Istraživanje je počelo u 10:00 h, a završeno je 13:30. Samo punjenje spremnika trajalo je od 10:10 do 13:10. Svakih nekoliko minuta, zabilježen je tlak u spremniku, broj proizvedenih litara vodika, te struja i napon na izvoru.

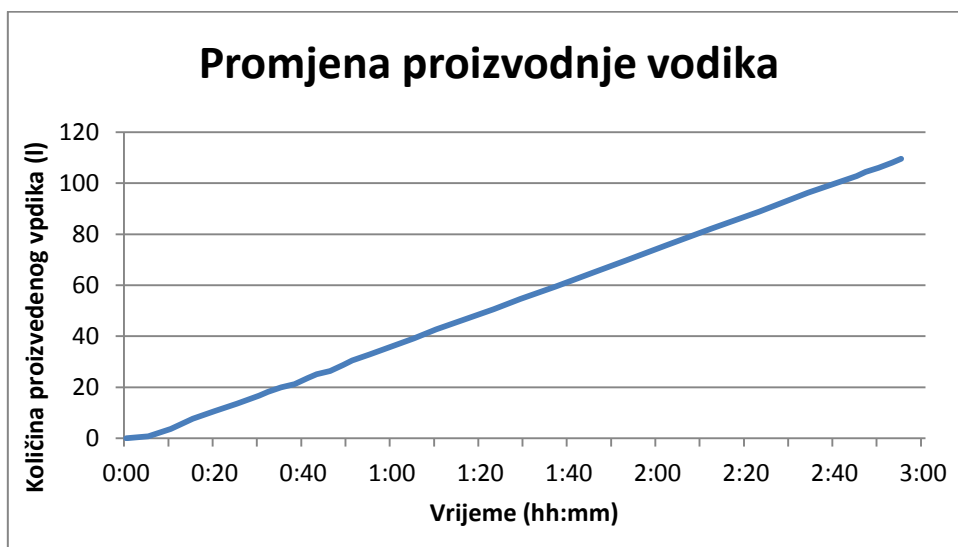


**Slika 58. Zaslonelektrolizatora u radu**

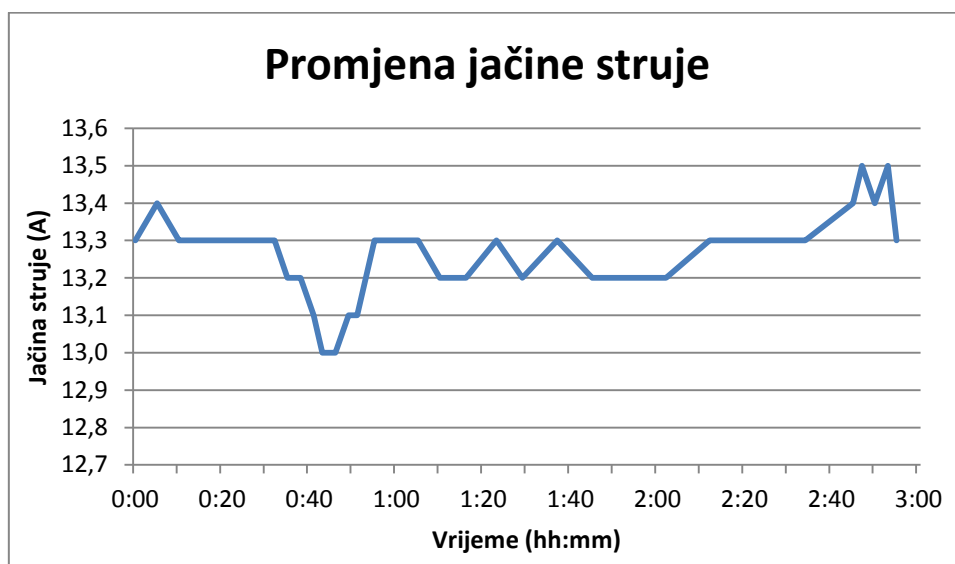
Prilikom punjenja, nije korišten maksimalan potencijal proizvodnje vodika elektrolizatora (Slika 58), već je radio s produktivnošću od otprilike 50% maksimalnog protoka koji iznosi 2000 cc/min, odnosno 2 l/min. Budući da je bila riječ o jednom od prvih ispitivanja na elektrolizatoru, nije se želio maksimalno opteretiti sustav. Zadani tlak na koji se punio spremnik također nije bio maksimalno dozvoljeni tlak vodika u spremniku od 20 bara, već je iznosio 16 bara. Rezultati dobiveni mjerenjima grafički su prikazani dijagramima (Slika 59, Slika 60, Slika 61, Slika 62).



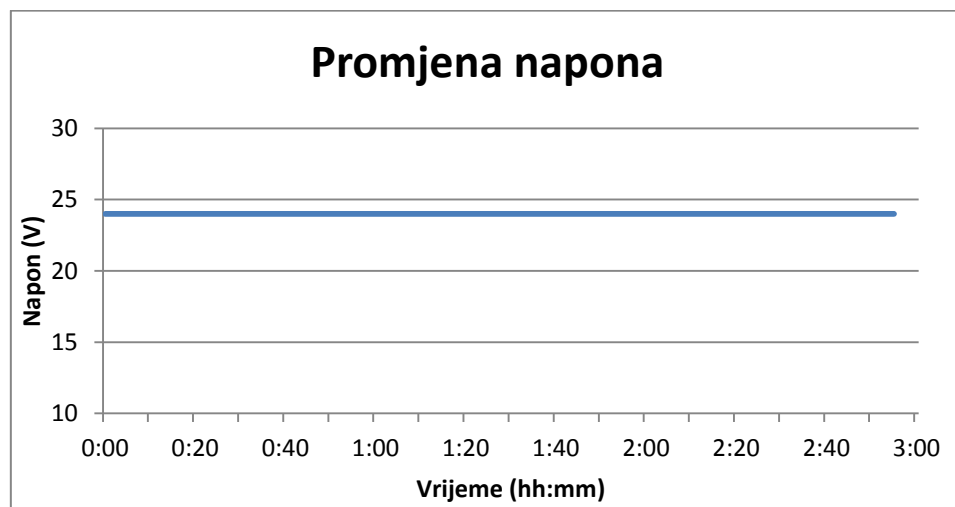
**Slika 59. Promjena tlaka u odnosu na vrijeme**



Slika 60. Proizvodnja vodika u vremenu



Slika 61. Promjena jačine struje na izvoru u vremenu



Slika 62. Promjena napona na izvoru u vremenu

Kod proizvodnje vodika na elektrolizatoru, uočljiva je linearna karakteristika proizvodnje, što znači da je elektrolizator cijelo vrijeme približno jednakom brzinom proizvodio vodik. Očekivana je i nelinearna karakteristika promjene tlaka u spremniku. Tlak je već nakon 50 minuta dosegao 50% zadane vrijednosti.

Elektrolizator i punjač su u ovom režimu rada proizveli 110 l vodika, za što je bilo potrebno 3 sata. Iz zabilježenih podataka vidi se da je cijelo vrijeme izvor osiguravao konstantan napon od 24 V, dok je jačina struje varirala između 13,0 i 13,5 A. Srednja vrijednost struje iznosila je 13,3 A, što za period od 3 sata znači da je za proces bilo potrebno 957,6 Wh, odnosno približno 960 Wh.

$$E_E = P_{Et} = U_E I_E t = 24 \cdot 13,3 \cdot 3 = 95,6 \text{ Wh} \quad (5)$$

Za ovakav režim rada može se tvrditi da ima sposobnost proizvodnje od 11,48 l/100 kWh.

$$D_{h,test} = 11,48 \frac{\text{l}}{100} \text{ kWh} \quad (6)$$

Za razliku od testiranih vrijednosti, maksimalne vrijednosti dostupne u specifikacijama ponudio je proizvođač i one iznose 500 W maksimalne snage elektrolizatora i punjača, te proizvodnja od maksimalno 2 l/min. U takvom režimu rada za 1 h rada elektrolizator bi proizveo 120 l vodika za što je potrebno 500 Wh energije. U tom slučaju maksimalna sposobnost proizvodnje bi iznosila 24 l/100 Wh.

$$D_{h,max} = 24 \frac{\text{l}}{100} \text{ Wh} \quad (7)$$

#### 5.1.4. Maksimalan potencijal proizvodnja vodika

##### 5.1.4.1. Proizvodni potencijal vodika prema testiranom režimu rada

Maksimalni potencijal vodika za testne uvijete definiran je jednadžbom.

$$V_{h,test} = D_{h,test} E_P = 11,48 \cdot \frac{1}{100} \cdot 1\,667\,800 = 191\,463 \text{ l} \quad (8)$$

Budući da je maksimalni kapacitet jednog spremnika vodika 350 l, možemo lako izračunati koliko bi se spremnika vodika moglo napuniti s ovakvim parametrima proizvodnje.

$$n_{S,test} = \frac{V_{h,test}}{350} = 547 \quad (9)$$

Kako smo testiranjem bicikla ustvrdili da je jedan spremnik vodika od 350 l koji je bio korišten u testiranjima dostatan za domet od 66 km možemo dobiti maksimalni domet bicikla.

$$l_{max,test} = n_{S,test} \cdot 66 = 36\,102 \text{ km} \quad (10)$$

Takav potencijal omogućuje biciklu dnevni domet od gotovo 100 km. Jasno je da je to i više nego dovoljno za realne potrebe jednog bicikla te se može uzeti u razmatranje korištenje većeg broja bicikla na vodik.

##### 5.1.4.2. Proizvodni potencijal vodika u maksimalnom režimu rada

Analogno proračunu za testirani režim rada elektrolizatora, napravljen je i proračun proizvodnje vodika za maksimalni potencijal vodika.

$$V_{h,max} = D_{h,max} E_P = 24 \cdot \frac{1}{100} \cdot 1\,667\,800 = 400\,272 \text{ l} \quad (11)$$



Budući da je maksimalni kapacitet jednog spremnika vodika 350 l, i ovdje možemo lako izračunati koliko bi se spremnika vodika moglo napuniti s maksimalnim parametrima proizvodnje.

$$n_{S,max} = \frac{V_{h,max}}{350} = 1\,143 \quad (12)$$

Kako smo testiranjem bicikla ustvrdili da je jedan spremnik vodika od 350 l koji je bio korišten u testiranjima dostatan za domet od 66 km možemo dobiti maksimalni domet bicikla.

$$l_{max,max} = n_{S,max} \cdot 66 = 75\,480 \text{ km} \quad (13)$$

## 6. ZAKLJUČAK

Izrada prve hrvatske punionice vodika u Laboratoriju za energetska postrojenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu predstavlja značajan korak u primjeni tehnologije vodika u Hrvatskoj. Znanja i iskustva stečena na ovom projektu moći će se primjenjivati u budućim projektima, te će zasigurno utjecati na daljnji razvoj ove tehnologije, ne samo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, nego i šire. Daljnja optimizacija sustava, kao i nadogradnja postojećih sustava, su svakako nužan korak koji je i predviđen planom razvoja projekta. Samo takvim pristupom ovaj prototip punionice ima priliku postati i mogući proizvod.

Primjerima uspješne primjene tehnologije vodika u svijetu praktički se potvrđuje činjenica da tehnologije vodika, koje često prati nadimak tehnologijama budućnosti, nisu tehnologije budućnosti, već tehnologije sadašnjosti. Ne postoji razlog zbog čega i Hrvatska ne bi pratila svjetske razvojne trendove te počela više ulagati u razvoj ove tehnologije, koje upravo u Hrvatskoj imaju dodatni potencijal podizanja standarda kvalitete života u nepristupačnim lokacijama. Uz sami ekološki aspekt, koji kombinacija gorivnih članaka i elektrolize vode iz obnovljivih izvora energije nedvojbeno ima, to je dodatan razlog više šire primjene vodikovih tehnologija.

Kada je u pitanju prva hrvatska punionica vodika instalirana na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, njezin rad bi se svakako trebao detaljno motriti u prvoj godini rada kako bi se mogla provesti kvalitetna analiza rada te na temelju stečenih iskustava provesti optimizacija sustava. Fotonaponski moduli na punionici stvaraju dovoljne količine energije za uvođenje dodatnih potrošača energije. Povećanjem proizvodnih kapaciteta punionice, dodatno se osnažuje i sada jasna činjenica da je sustav dovoljan za uvođenje dodatnih bicikla s pogonom na gorivne članke.

Instaliranjem punionice značajno su uvećani kapaciteti za kvantitativno i kvalitativno istraživanje i testiranje tehnologija vodika u okviru Fakulteta strojarstva i brodogradnje, grada Zagreba, te u konačnici i Republike Hrvatske. Uz omogućavanje boljeg rada na biciklima, razvoj same punionice također predstavlja ozbiljan potencijal. Daljnjim usavršavanjem prototipa, uz praćenje planiranog razvoja svih komponenti sustava punionice stvaraju se čvrsti temelji za stvaranje ozbiljnog, tržišno konkurentnog proizvoda. Kako broj instaliranih punionica u svijetu iz godine u godinu ruši rekorde, iskorištavanje potencijala ovog tržišta nije zanemarivo.

## LITERATURA

- [1] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=22730>  
Datum pristupa: 12.12.2018
- [2] [http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/12-13/PEM\\_fuel\\_cell/fc.html](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/12-13/PEM_fuel_cell/fc.html)  
Datum pristupa: 12.12.2018
- [3] <http://knowledge.electrochem.org/encycl/art-f03-fuel-cells.htm>  
Datum pristupa: 12.12.2018
- [4] Ankica Kovač: Doktorski rad - Proizvodnja energije elektrolizom vode pomoću sunčeve energije i fotonaponskoga modula, 2013.
- [5] Jadran Barač: Diplomski rad, 2009.
- [6] Ankica Đukić, Autonomous hydrogen production system, International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015) 7465-744
- [7] Tabbi Wilberforce, Zaki El-Hassan, F.N. Khatib, Ahmed Al Makky, Ahmad Baroutaji, James G. Carton, Abdul G. Olabi: Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars, International journal of hydrog enenergy 42 (2017) 25695-25734
- [8] Azadeh Kheirandish, Mohammad Saeed Kazemi, Mahidzal Dahari: Dynamic performance assessment of the efficiency of fuel cell-powered bicycle: An experimental approach, International journal of hydrog enenergy 39 (2014) 13276-13284
- [9] J.J. Hwang, D.Y. Wang, N.C. Shih, D.Y. Lai, C.K. Chen: Development of fuel-cell-powered electric bicycle, Journal of Power Sources 133 (2004) 223–228
- [10] Luciano Cardinali, Saverio Santomassimo, Marco Stefanoni: Design and realization of a 300 W fuel cell generator on an electric bicycle, Journal of Power Sources 106 (2002) 384–387
- [11] <https://www.toyota.hr/articles/mirai-inovacija.json>  
Datum pristupa: 22.12.2018
- [12] <https://www.toyota.com.cy/new-cars/new-mirai/meet-mirai#1>  
Datum pristupa: 22.12.2018
- [13] <https://www.hyundai.com/worldwide/en/eco/nexo/technology>  
Datum pristupa: 22.12.2018
- [14] <https://www.motor1.com/reviews/234085/2019-hyundai-nexo-first-drive/>  
Datum pristupa: 22.12.2018
- [15] Kenshi Itaoka, Aya Saito, Kazunari Sasaki: Public perception on hydrogen infrastructure in Japan: Influence of rollout of commercial fuel cell vehicles, International journal of hydrog enenergy 42 (2017) 7290-7296
- [16] <https://www.generacijanext.hr/stem/na-fsb-u-izumili-bicikl-na-vodik-slijedi-punionica/>  
Datum pristupa: 22.12.2018
- [17] <https://fuelcellsworks.com/news/92-new-hydrogen-refuelling-stations-worldwide-in-2016>  
Datum pristupa: 27.12.2018
- [18] <https://insideevs.com/there-is-only-6500-hydrogen-fuel-cell-cars-in-the-world-half-in-california-report/>  
Datum pristupa: 27.12.2018
- [19] <https://www.reuters.com/article/us-japan-hydrogen/japan-venture-aims-to-build-80-hydrogen-fuelling-stations-by-2022-idUSKBN1GH072>  
Datum pristupa: 27.12.2018

- [20] 2018 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment & Hydrogen Fuel Station Network Development, California Air Resources Board, 2018
- [21] <https://www.tuev-sued.de/uploads/images/1529408575630722640030/18040-is-lbst-europe-2018.jpg>  
Datum pristupa: 21.12.2018
- [22] <https://www.google.com/maps/@45.8005882,15.9768213,2705m/data=!3m1!1e3>  
Datum pristupa: 21.12.2018
- [23] Narodne Novine (NN 130/2009): STRATEGIJA ENERGETSKOG RAZVOJA REPUBLIKE HRVATSKE, 2009
- [24] <https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/web/pub/locator/nacrt.php?nacrt=33&blok=14&zgrada=25&id=168>  
Datum pristupa: 21.12.2018
- [25] <http://www.fuelcelltoday.com/news-archive/2012/october/austria%E2%80%99s-first-public-hydrogen-refuelling-station-opens-in-vienna>  
Datum pristupa: 22.12.2018
- [26] [http://klima.hr/razno.php?id=priopcenja&param=apsolutno\\_najvisa](http://klima.hr/razno.php?id=priopcenja&param=apsolutno_najvisa)  
Datum pristupa: 28.12.2018
- [27] [http://klima.hr/razno.php?id=priopcenja&param=apsolutno\\_najniza](http://klima.hr/razno.php?id=priopcenja&param=apsolutno_najniza)  
Datum pristupa: 28.12.2018
- [28] <http://www.wipo.int/designdb/hague/en/showData.jsp?&SOURCE=HAGUE&KEY=D084591&LANG=en&NO=21&TOT=41>  
Datum pristupa: 22.09.2018
- [29] Solvis - Fotonaponski moduli (Model SV60) Specifikacije
- [30] Victron energy, Smart Solar Charge Controllers with screw-or MC4 PV (MPPT 150/45 up to MPPT 150//100) Specification
- [31] Leoch Battery: LPS SERIES-Solar Power (LPS12-285 (12V285.5AH) Specification
- [32] H2 Planet, New Hy-PEM XP Rack User Manual
- [33] H2 Planet, HyRefill-BOX Mini User Manual
- [34] H2 Planet, H2 slim and smart metal hydrides storage system User Manual
- [35] <https://www.educentar.net/Article/13172/Docentica-s-Fakulteta-strojarstva-i-brodogradnja-osmislila-bicikl-na-vodik/>  
Datum pristupa: 10.01.2019
- [36] <http://www.unizg.hr/nc/vijest/article/prvi-hrvatski-bicikl-na-vodik-docentice-ankice-dukic-s-fsb-a/>  
Datum pristupa: 18.12.2018
- [37] <https://zepeo.fsb.hr/blog/2017/07/07/ankica-dukic-predstavila-bicikl-na-vodik/>  
Datum pristupa: 18.12.2018
- [38] <https://www.google.com/maps/place/Jarun/@45.7836256,15.9320772,12.75z/data=!4m5!3m4!1s0x4765d40255feb73d:0xe0f5d7604234b71e!8m2!3d45.7826356!4d15.9149789>  
Datum pristupa: 18.12.2018
- [39] [https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1Suh5aYjMwe3YytEdSRLmijmxGcXFvgE\\_&ll=45.78216349765712%2C15.920038942688848&z=15](https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1Suh5aYjMwe3YytEdSRLmijmxGcXFvgE_&ll=45.78216349765712%2C15.920038942688848&z=15)  
Datum pristupa: 18.12.2018
- [40] <https://www.google.com/maps/place/Fakultet+strojarstva+i+brodogradnje/@45.783611,15.9322292,12.75z/data=!4m5!3m4!1s0x4765d68ad9f699b9:0xf723dab18066040b!8m2!3d45.795332!4d15.971241>

Datum pristupa: 18.12.2018

- [41] [https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1o81ixW4VTtd6jxzE-jYQ0SqVfAX2r\\_2P&ll=45.797200319012866%2C15.966530067490112&z=16](https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1o81ixW4VTtd6jxzE-jYQ0SqVfAX2r_2P&ll=45.797200319012866%2C15.966530067490112&z=16)

Datum pristupa: 18.12.2018

**PRILOZI**

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