

Usporedba razvoja tehnologija zelenog vodika

Markotić, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:918025>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

Usporedba razvoja tehnologija zelenog vodika

Završni rad

Tomislav Markotić

Osijek, 2022.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 20.07.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Tomislav Markotić
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4705, 22.07.2019.
OIB Pristupnika:	08958046071
Mentor:	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Usporedba razvoja tehnologija zelenog vodika
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	U teorijskom dijelu dati pregled trenutnog razvoja tehnologija za proizvodnju 'zeleno' vodika iz OIE. U praktičnom dijelu usporediti energetske učinkovitost tih tehnologija. Molim prijavite se na teme koje želite, kriterij za odabir teme: zbroj ocjene iz OEiE i prosjeka ocjena prijavljenih na temi.
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	20.07.2022.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	07.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 07.09.2022.

Ime i prezime studenta:

Tomislav Markotić

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4705, 22.07.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba razvoja tehnologija zelenog vodika**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	2
2. TEORIJSKI PREGLED ZELENOG VODIKA.....	3
2.1. Što je vodik	3
2.2. Boje vodika	3
2.2.1. Sivi vodik.....	4
2.2.2. Plavi vodik.....	4
2.2.3. Tirkizni vodik.....	4
2.2.4. Zeleni vodik.....	5
2.3. Proizvodnja vodika	6
2.3.1. Elektroliza vode.....	6
2.3.2. Parna reformacija bioplina.....	9
2.3.3. Toplinska konverzija ili rasplinjavanje organskih tvari i otpada	11
2.4. Skladištenje zelenog vodika.....	12
2.5. Prijenos i distribucija zelenog vodika	13
2.6. Vodikova goriva i promet.....	15
3. BUDUĆNOST I RAZVOJ ZELENOG VODIKA.....	19
3.1. Potencijalni problemi i izazovi zelenog vodika.....	19
3.2. Tehnološka rješenja za razvoj zelenog vodika	20
3.3. Budućnost zelenog vodika	24
3.4. Vodik u Republici Hrvatskoj	26
4. UPORABA SUSTAVA ZA PROIZVODNJU ZELENOG VODIKA ZA ENERGETSKE POTREBE JAVNE ZGRADE	29
4.1. Usporedba tržišno dostupnih sustava za proizvodnju zelenog vodika putem elektrolize vode	29
4.2. Proračun proizvodnje zelenog vodika na primjeru javne zgrade Strojarskog fakulteta u Slavonskom Bordu	35
5. ZAKLJUČAK.....	53

Literatura.....	55
SAŽETAK.....	56

1. UVOD

U današnje vrijeme postoje velike potrebe za smanjenjem korištenja fosilnih goriva i prelazak na obnovljive izvore energije. Smanjenjem korištenja fosilnih goriva i integracijom što više obnovljivih izvora energije promiče se bolja klimatska situacija i smanjenje emisija ugljikovog dioksida. Tako je i vodik koji je glavna tema ovog završnog rada jedan od velikih potencijala za budućnost energetike i energenata za dobivanje električne energije i uporabe energije bez štetnih emisija ugljikovog dioksida. Osim samog vodika ovaj završni rad je ponajviše posvećen proizvodnji, mogućnosti transporta, uporabi i skladištenju zelenog vodika. Zeleni vodik je vodik koji je proizveden pomoću obnovljivih izvora energije te kao takav je vrlo pogodan za promidžbu, razvoj i komercijaliziranu uporabu u budućnosti, budući da se proizvodi bez emisija ugljikovog dioksida i troši se bez ugljikovog dioksida, jedini nusprodukt iz korištenja zelenog vodika jest voda. Zeleni vodik još uvijek nije mainstream tema te je na samim svojim počecima, no prema sadašnjim predviđanjima i planovima bi mogao igrati značajnu ulogu u različitim područjima života ljudi, jer ima mogućnost iskorištenja u puno sektora koji danas koriste fosilna goriva kao energente.

U ovom završnom radu su navedeni trenutni postupci dobivanja zelenog vodika, kao i mogućnosti njegova transporta i skladištenja. Također, dane su sve trenutne tehnologije, kao i mogućnosti unaprijeđenja postojećih tehnologija. Navedene su i mogućnosti primjene zelenog vodika u raznim životnim sektorima kao što su: grijanje, hlađenje, mogućnosti implementiranja vodika u osobne automobile, kao i sveukupni transport pomoću brodova, aviona, kamiona i ostalih transportnih vozila.

Završni rad se sastoji od pet poglavlja u kojemu je prvo poglavlje uvod te zadatak završnog rada. Drugo poglavlje se dotiče teorijskog pregleda samih tehnologija, procesa dobivanja, mogućnosti transporta, iskorištenja te distribucije krajnjim korisnicima. Treće poglavlje govori o problemima postojećih tehnologija kao i o mogućnosti razvoja samih tehnologija kroz iduće godine. Također se dotiče i budućnost zelenog vodika kao i potencijalima prilikama i strategijom vodika u Republici Hrvatskoj. Četvrto poglavlje je praktični dio ovog završnog rada i sastoji se od usporedbe trenutno dostupnih fizičkih uređaja za proizvodnju zelenog vodika putem elektrolize vode i njihove primjene te proračuna proizvodnje zelenog vodika na primjeru javne zgrade. Zadnje poglavlje je posvećeno zaključku ovog završnog rada te završnoj riječi o samoj temi trenutnih tehnologija u području zelenog vodika.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je opisati i objasniti pojam zeleni vodik, dati teorijski pregled i usporedbu trenutno dostupnih tehnologija vezanih za zeleni vodik. Opisuje se problematika i mogućnost razvoja postojećih tehnologija. Također se daje mogućnost primjene zelenog vodika, kao i strategija i trenutni plan za zeleni vodik u Republici Hrvatskoj. Osim svega navedenog zadatak je i praktični dio u kojemu se opisuju i uspoređuju trenutno postojeće tehnologije i njihova iskoristivost te proračun proizvodnje zelenog vodika za zadovoljenje energetske potrebe javne zgrade Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu.

2. TEORIJSKI PREGLED ZELENOG VODIKA

U ovome poglavlju su opisane sve mogućnosti dobivanja vodika iz različitih izvora te su kao takvi raščlanjeni prema bojama. Prikazani su svi postupci dobivanja zelenog vodika, postupak skladištenja zelenog vodika kao i distribucija zelenog vodika. Također se u ovome poglavlju nalazi i potpoglavlje koje je posvećeno vodiku i njegovim gorivima te mogućnost implementiranja vodika i njegovih goriva u promet.

2.1. Što je vodik

Vodik je najzastupljeniji i najlakši element u svemiru. Prirodno se javlja kao H_2 molekula. Na Zemlji vodik se najčešće pojavljuje kao molekula vode (H_2O) i molekula ugljikovodika. Vodik je plin bez mirisa pri standardnim uvjetima. Vodik proizveden iz različitih izvora služi kao energent te se koristi za proizvodnju, prijenos, distribuciju te skladištenje energije. [1]

Vodik može igrati značajnu ulogu u energetskej tranziciji s neobnovljivih na obnovljive izvore energije. Iako je danas preko 90% vodika proizvedeno iz neobnovljivih izvora energije, postoji globalni plan u kojemu se navodi da bi vodik iz obnovljivih izvora trebao činiti 13% ukupnog udjela što je puno u odnosu na današnjih 0.1%. Time bi odigrao i značajnu ulogu u procesu dekarbonizacije koji je bitan zbog klimatskih promjena. [2]

2.2. Boje vodika

Boje vodika su oznake koje označavaju način na koji je moguće doći do vodika. Prema trenutnim oznakama postoje: Zeleni vodik, Plavi vodik, Sivi vodik, Tirkizni vodik. Također postoje i slučajevi proizvodnje vodika kojima ne odgovara niti jedna od navedenih boja pa se još pojavljuju Žuti vodik, Bijeli vodik, Ljubičasti vodik. [3]



Slika 2.1. : Razdioba proizvodnje vodika po bojama

2.2.1. Sivi vodik

Trenutno je sivi vodik najrasprostranjeniji te se od ukupne proizvodnje vodika oko 71% karakterizira kao sivi vodik. Energetska podloga za proizvodnju sivog vodika su fosilna goriva kao što su: prirodni plin i propan. Proces proizvodnje sivog vodika je poznat i pod imenom „Steam methane reformation“ (SMR) odnosno Parna Reformacija Metana (PRM). Parna reformacija metana je postupak kojim metan zajedno s parom pod visokim tlakom proizvodi vodik, ugljikov monoksid i ugljikov dioksid. Nakon toga se nastali vodik još „čisti“ odnosno odstranjuju mu se otpadni plinovi kako bi ostao samo čisti plinoviti vodik. Omjer $\frac{CO_2}{H_2}$ po kilogramu su jednaki 8 do 12 što daje sliku o emisiji CO_2 u proizvodnji vodika na ovakav način. [1]

Problem kod sivog vodika je što su za njegovu proizvodnju neizbježne značajne emisije ugljikovog dioksida te se na taj način ne može postići klimatska neutralnost kojoj se teži. [3]

2.2.2. Plavi vodik

Plavi vodik kao i sivi dolazi s istom energetsom podlogom za proizvodnju što su fosilna goriva. Za razliku od sivog vodika, plavi vodik ima značajno manju emisiju CO_2 u odnosu na sivi vodik, čemu je razlog carbon capture and sequestration technology (CCS) odnosno tehnologija za hvatanje i sekvestracije ugljika. Omjer $\frac{CO_2}{H_2}$ po kilogramu su jednaki 0.6 do 3.5. [1]

CCS tehnologija može „uhvatiti“ 85%-95% CO_2 . No i dalje i kod plavog vodika postoje emisije CO_2 što zapravo govori da ni plavi vodik nije dugoročno rješenje. Plavi vodik se u trenutnoj literaturi najčešće spominje u kontekstu tranzicijskog načina proizvodnje vodika. [3]

2.2.3. Tirkizni vodik

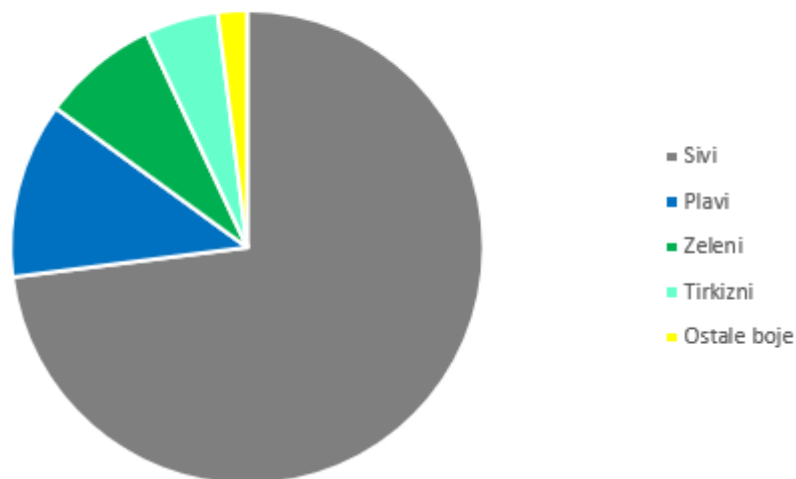
Tirkizni vodik kao energetska podlogu koristi prirodni plin, no proces proizvodnje vodika je drugačiji u odnosu na sivi i plavi vodik. „Proces proizvodnje naziva se piroliza metana, gdje ugljik u metanu postaje čvrsta čađa“ Nedostatak ovakvog načina proizvodnje vodika jest što zahtjeva veću količinu prirodnog plina nego parna reformacija metana. Stupanj djelovanja ovakvog načina proizvodnje vodika je između 40% i 45%. [3]

2.2.4. Zeleni vodik

Zeleni vodik je vodik dobiven iz obnovljivih izvora energije kao što su: sunce, vjetar, voda, bioplina, biomasa i gradski otpad. Trenutno postoje tri tehnologije odnosno tri procesa dobivanja zelenog vodika, to su: elektroliza vode pomoću obnovljivih izvora energije, parna reformacija bioplina s hvatanjem CO_2 , toplinska pretvorba ili rasplinjavanje organske materije i otpada. Trenutni udio zelenog vodika u globalnoj proizvodnji je 0.1%. [1]

Razlog tako niskom udjelu u proizvodnji vodika je trenutačna cijena za proizvodnju koja je višestruko veća nego cijena za proizvodnju vodika iz fosilnih goriva. Ovakav način proizvodnje vodika je trenutno na samim počecima te se ekspanzija u uporabi i udio u ukupnoj proizvodnji vodika očekuje od 2030. do 2050. [3]

Razdioba zastupljenosti boja vodika



Slika 2.2. : Razdioba zastupljenosti boja vodika

Na slici 2.2. je prikazana trenutna razdioba zastupljenosti u proizvodnji navedenih vrsta vodika. Prema trenutnim strategijama i planovima ovaj grafikon bi se trebao promijeniti u korist zelenog vodika te na štetu sivog vodika, a u tranzicijskom razdoblju značajno povećanje bi trebao imati i plavi vodik. Glavni razlog tendencijama smanjenja udjela sivog vodika jest CO_2 neutralnost u proizvodnji vodika te dobivanje čistog vodika za čiju proizvodnju nije nusproizvod ugljikov dioksid.

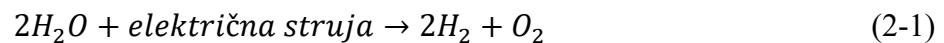
2.3. Proizvodnja vodika

Proizvodnja zelenog vodika podrazumijeva korištenje obnovljivih izvora energije za dobivanje čistog vodika. Vodik se može dobiti na razne načine i kroz razne procese, no ono što razlikuje proizvodnju zelenog vodika od ostalih „boja“ vodika jest nulta emisija CO_2 . Najkonvencionalniji procesi dobivanja zelenog vodika jesu: Elektroliza vode, parna reformacija prirodnog plina s hvatanjem CO_2 i rasplinjavanje organske materije i otpada. [1]

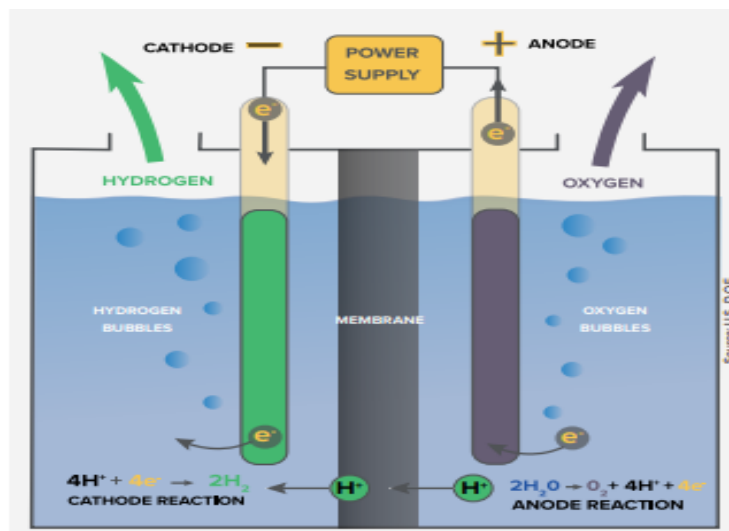
2.3.1. Elektroliza vode

„Michael Faraday prvi je formulirao princip elektrolize vode 1820. godine, nakon čega je došlo do više tehnoloških otkrića kako bi se postigla sadašnja učinkovitost. U svom najosnovnijem obliku, elektroliza vode je elektrokemijski proces tijekom kojega se voda razlaže na vodik i kisik primjenom vanjskoga istosmjernoga napona na dvije elektrode (anodu i katodu) koje su u kontaktu s radnim medijem, odnosno elektrolitom.“ [3]

Kako bi uopće došlo do procesa elektrolize, osim električne energije potrebna je i zaliha vode koja je osnovna sirovina za ovaj proces. Kemijska jednadžba elektrolize vode glasi:



Količina vode koja je potrebna za proizvodnju jednog kilograma zelenog vodika putem elektrolize vode jest 9 litara. Učinkovitost ovog procesa jest 45-78 kW/kg odnosno 60% do 90%. [1]



Slika 2.3. : Postupak elektrolize vode [1]

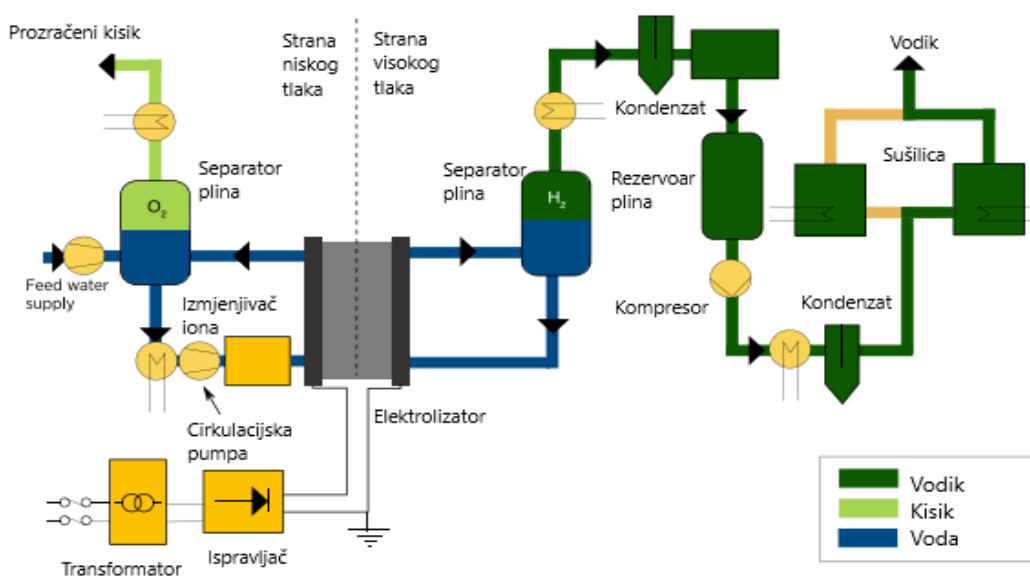
Prijevod Slike 2.3. s lijeva na desno: Katoda, Izvor napajanja, Anoda, Vodik, Kisik, Mjehurići vodika, Membrana, Mjehurići vodika, Katodna reakcija, Anodna reakcija.

Na slici 2.3. je prikazan postupak klasične elektrolize vode u kojemu se pomoću električne struje voda razdvaja na vodik i kisik pomoću anode i katode. Na anodu se sintetizira vodik, dok se na katodu sintetizira kisik. Elektroliza je postupak u kojemu se dobiva čisti vodik jer po definiciji izvor električne energije za proizvodnju zelenog vodika su obnovljivi izvori energije tako da u cijelom lancu proizvodnje nema emisija ugljikovog dioksida. Također postupak koji se primjenjuje u praksi u automobilske industriji jest proces obrnute elektrolize gdje se pomoću vodika iz spremnika i kisika iz okoline pomoću gorivnih ćelija dobiva električna energija koja pogoni vozilo te kao nusprodukt voda koja se izbacuje van kroz ispušni sustav.

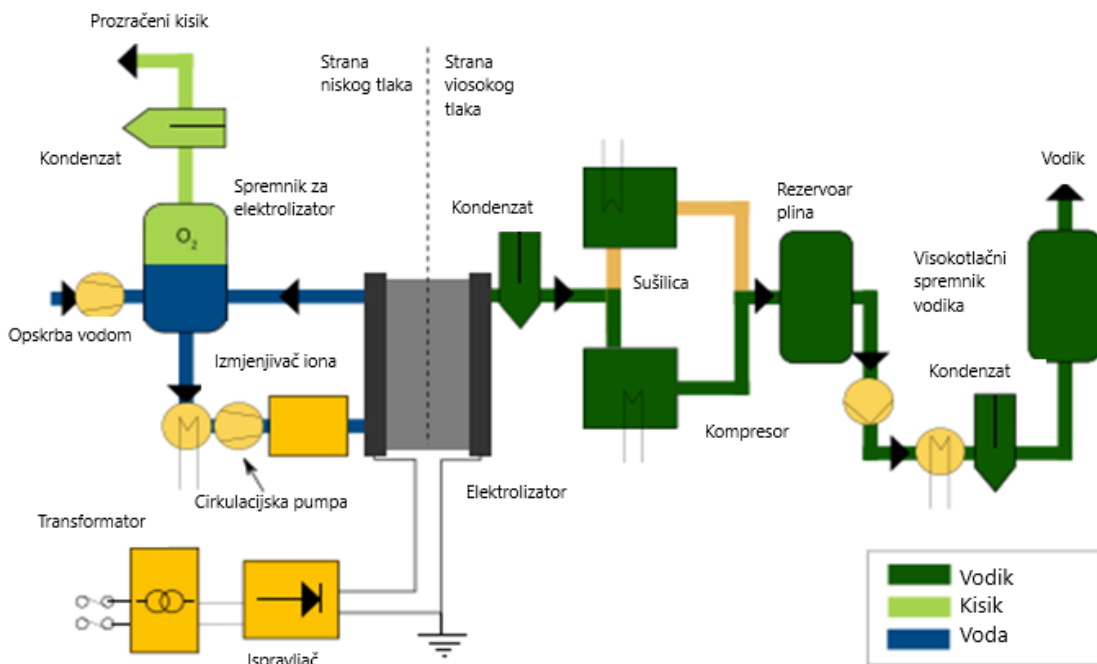
„Elektrolizatori su sustavi u kojima se odvija proces elektrolize vode.“[3]

Elektrolizatori mogu biti vrlo mali za laboratorijsku uporabu, te vrlo veliki za uporabu u elektranama u radu s velikim nazivnim snagama. Trenutno najveće elektrolizne ćelije mogu se koristiti za komercijalnu proizvodnju zelenog vodika koristeći kao izvor električne energije vjetroelektrane i solarne elektrane. [1]

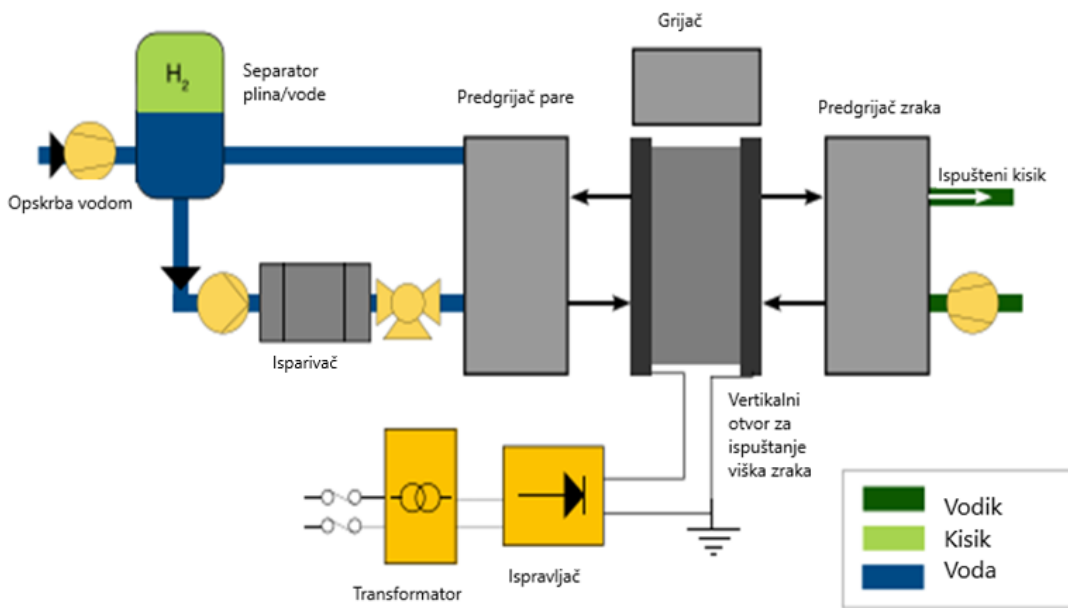
Postoje četiri glavna tipa elektrolizatora koji se razlikuju prema vrsti elektrolita: alkalni elektrolizator, elektrolizator za protone izmjenjivačkom membranom ,elektrolizator s krutim oksidima i elektrolizator za anione s izmjenjivačkom membranom. [4]



Slika 2.4. : Sustav elektrolizatora za protone s izmjenjivačkom membranom [5]



Slika 2.5. : Sustav elektrolizatora za anione s izmjenjivačkom membranom [5]

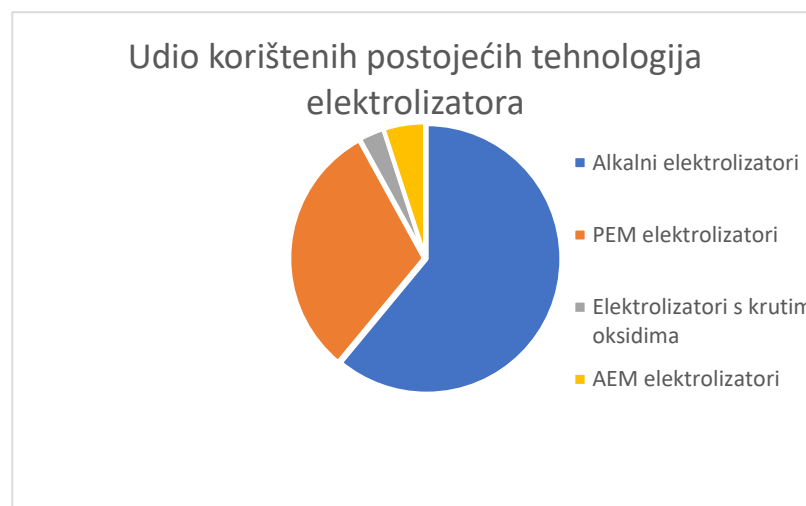


Slika 2.6. : Sustav elektrolizatora s krutim oksidima [5]

Na slikama 2.4.,2.5.,2.6. su prikazane sheme sustava za tri tipa elektrolizatora. Najzastupljeniji od ova tri tipa elektrolizatora je elektrolizator za protone s izmjenjivačkom membranom (PEM elektrolizator) dok su elektrolizator za anione s izmjenjivačkom membranom (AEM elektrolizator)

te elektrolizator sa krutim oksidom nešto novije tehnologije i trenutno skuplje pa nisu još toliko razvijene.

Trenutačno najrazvijenija tehnologija je tehnologija alkalnih elektrolizatora, zbog toga i ima najveći udio zastupljenosti te su troškovi za njezinu uporabu trenutno dosta jeftiniji u odnosu na ostale tehnologije budući da ne zahtijevaju točno određene materijale u izradi. Zahtjevi elektrolizatora za protone s izmjenjivačkom membranom nisu toliko veliki, te se promiču u potencijalno poželjnu tehnologiju u odnosu na alkalne elektrolizatore u području uporabe u industriji. U ovoj tehnologiji se za katalizatore kao materijali trenutno koriste platina i iridij, a za bipolarne ploče titan. Budući da je elektrolizator za protone s izmjenjivačkom membranom novija tehnologija od alkalnih elektrolizatora ujedno je i skuplja. Cijena za kW za alkalne elektrolizatore iznosi 1000-1400 USD dok za elektrolizatore za protone s izmjenjivačkom membranom iznosi oko 1750 USD. Elektrolizator za protone s izmjenjivačkom membranom ima nešto kraći životni vijek u odnosu na alkalne elektrolizatore.[4]



Slika 2.7. : Udio postojećih tehnologija elektrolizatora [4]

U 2020. godini 61% udjela u elektrolizi su činili alkalni elektrolizatori, dok su elektrolizatori za protone s izmjenjivačkom membranom činili 31 % udjela, a ostali postotak su činili elektrolizatori s krutim oksidima i za anione s izmjenjivačkom membranom. [4]

2.3.2. Parna reformacija bioplina

Parna reformacija bioplina je postupak kojim se bioplina dobiven najčešće iz biomase se reformira na isti način kao i kod proizvodnje sivog vodika odnosno parnom reformacijom metana. Sličnosti u odnosu na postupak za dobivanje sivog vodika parnom reformacijom metana jesu postrojenje

koje se koristi i sveobuhvatni kemijski procesi koji se događaju tijekom proizvodnje vodika. Glavna razlika u odnosu na sivi vodik dobiven iz fosilnih goriva je porijeklo ugljika. Budući da parnom reformacijom bioplina kao i parnom reformacijom metana nastaje CO_2 i H_2 događa se ispuštanje CO_2 u atmosferu. No kod procesa parne reformacije bioplina taj CO_2 koji se proizvede tim postupkom kao i H_2 se smatra obnovljivim ugljično-neutralnim gorivom jer se korišteni ugljik već nalazio u prirodnom Zemljinom krugu ugljika, odnosno taj CO_2 je iz prirode koji stalno kruži. Parna reformacija metana iz fosilnih goriva se gleda kao zagađenje jer CO_2 koji se oslobađa je oslobođen iz Zemljine kore te se na taj način podiže nivo CO_2 u okolišu koji stalno kruži. [1]

Kemijska jednadžba parne reformacije glasi:



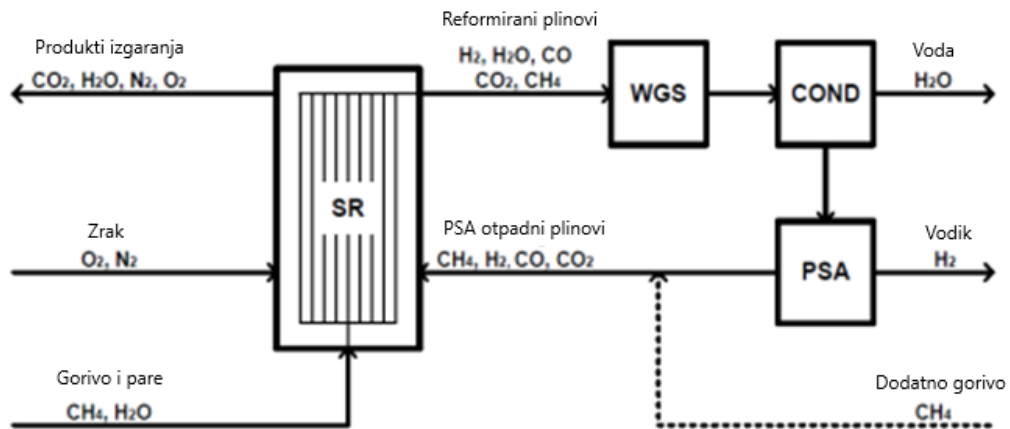
„Reakcija se uobičajeno odvija u cijevima reaktora koje su ispunjene katalizatorom, obično od nikla i inertnih vezivnih aditiva. Veličina i oblik katalizatora su optimizirani kako bi se postiglo maksimalno djelovanje (aktivnost) i maksimalni prijenos topline, dok se u isto vrijeme smanjuje pad tlaka. Odsumporavanje goriva je potrebno jer su već i male količine sumpora dovoljne da uzrokuju trovanje katalizatora. Procesni parametri variraju. U većini slučajeva izlazna temperatura iz reformera je u intervalu 700-950 °C, izlazni tlak između 15-40 bara i omjer pare u odnosu na ugljik u sirovini 3,0-6,0. Reakcije reformiranja su brze i dobiveni sastav produkata je obično blizu termodinamičke ravnoteže.“ [6]

„Ako je H_2 željeni produkt, parno reformiranje prati dobivanje dodatne količine vodika, što je egzotermna reakcija kojom se CO i H_2O prevode u CO_2 i H_2 :



Dobivanje dodatne količine vodika odvija se u jednom ili dva odvojena reaktora. U prvom reaktoru je visoka temperatura u rasponu 350-500 °C i koristi se željezo/krom kao katalizator. Dodatna vodena para se može dodati da se poboljša stupanj konverzije CO . To nije nužno za reformirani plin iz parnog reformiranja budući da već sadrži višak pare. Tipična koncentracija CO nakon dobivanja dodatne količine vodika pod visokom temperaturom iznosi 3,5 mol. % na suhoj osnovi. Ako je potrebna niža koncentracija CO , nakon reaktora koji radi pri visokoj temperaturi slijedi drugi reaktor koji radi pri nižoj temperaturi.“[6]

Osim za proizvodnju sivog vodika i zelenog iz bio plina ovaj postupak se koristi i kod dobivanja plavog vodika koji ima još tehnologiju za „hvatanje“ CO_2 čestica koji smanjuje emisiju CO_2 za 71%-92%, ali ta tehnologija nije još dovoljno razvijena da bi bila u komercijalnoj uporabi. [1]



Slika 2.8. : Blok dijagram proizvodnje vodika putem parne reformacije bioplina [6]

„Parno reformiranje (SR) je dobro poznati industrijski proces kojim se lako ugljikovodično gorivo, najčešće metan, prevodi u sintezni plin, H_2 i CO . Sintezni plin se koristi za proizvodnju amonijaka, metanola, sintetičkih goriva i drugih kemikalija, kao i za proizvodnju čistog H_2 . Trenutačno se gotovo sav proizvedeni H_2 upotrebljava za industrijske (petrokemijske) namjene, a ne kao čisto gorivo koje izgaranjem ne proizvodi nepoželjni CO_2 . Tako, većina modernih postrojenja za proizvodnju H_2 sadrži cijevni reaktor u kojem se odvija parno reformiranje prirodnoga plina iza kojeg slijedi reaktor za oksidaciju CO vodom čime se proizvodi dodatna količina vodika (tzv. „water-gas shift“ reaktor (WGS). Slijedi odvajanje suvišne vode i pročišćavanje vodika, najčešće postupkom tlačno-izmjenične adsorpcije (PSA).“ [6]

Stupanj djelovanja ovog procesa iznosi 74%. [7]

2.3.3. Toplinska konverzija ili rasplinjavanje organskih tvari i otpada

Toplinska konverzija ili rasplinjavanje organskih tvari je postupak u kojemu se toplinski obrađuju organske tvari i otpad kao što su komunalni otpad, biomasa i drugi organski otpadi kako bi se dobio vodik. Sami postupak djeluje primjenom visoke topline i tlaka na organsku tvar ili otpad kako bi se transformirali iz čvrstog u plinovito stanje. Komponente koje nastaju ovim postupkom su vodik, ugljikov monoksid i ugljikov dioksid. Ugljikov monoksid i ugljikov dioksid se dalje pročišćuju kako bi se došlo do vodika ili metana koji se kasnije može koristiti kao gorivo. Ovaj postupak dobivanja vodika se smatra zelenim budući da sama organska tvar dolazi iz prirode odnosno količina ugljikovog dioksida nije iz Zemljine kore nego iz prirodnog kružnog ciklusa.

Organska tvar koja se koristi može biti dolaziti od šumskog otpada, poljoprivrednog otpada, organskog komunalnog otpada ili od otpada životinjskog porijekla. Ovaj način proizvodnje vodika je još uvijek „mlad“ i nije komercijaliziran, ali svakako predstavlja priliku da organske tvari i komunalni otpad dobiju svrhu u kojoj će služiti za proizvodnju goriva. Samim time se može i ljude motivirati kako bi taj otpad mogli razvrstavati i jednoga dana predavati za proizvodnju vodika kada se ovaj postupak razvije i počne komercijalno upotrebljavati. [1]

2.4. Skladištenje zelenog vodika

„Niska gustoća vodika čini ga znatno težim za pohranu od fosilnih goriva. U suštini, za prijenos iste količine energije potrebno je premjestiti veće količine vodika. Zbog toga se vodik tretira kako bi se smanjio njegov volumen prilikom transporta. Trenutno dostupne opcije tretmana su kompresija, ukapljivanje, korištenje tekućeg organskog vodikovog nosača (LOHC) i pretvorba u amonijak, metanol ili sintetička goriva.“ [3]

Vodik se može skladištiti na različite načine pod različitim uvjetima temperature, gustoće i tlaka ovisno o njegovoj kasnijoj primjeni. [1]

Nakon tretiranja idući izazov je način skladištenja koji uvelike ovisi o planu uporabe vodika i količini vodika kojeg je potrebno skladištiti. Ukoliko je vodik potreban u kraćem vremenskom periodu koriste se spremnici. Ako se velika količina vodika planira skladištiti na duži vremenski period, tada je najprikladniji način skladištenja geološki način. U spremnike za manje količine skladištenja se skladišti stlačeni vodik najčešće pod tlakom od 700 bara i ukapljeni vodik. Takvi spremnici se koriste u područjima u kojima vodik mora biti brzo dostupan i spreman za brzu uporabu. Problem kod takvog načina skladištenja jest gustoća čestice vodika, budući da kod stlačenog vodika na 700 bara u odnosu na ekvivalentu energiju benzina, vodik ima samo 15% energetske gustoće odnosno za jednaku energiju potrebna je puno veća površina za vodik pa bi primjerice za ekvivalentu energiju na benzinskoj postaji trebali otprilike sedam puta veću površinu za skladištenje nego za benzin. Rješenje za navedeni problem se nalazi u pretvorbi vodika u amonijak budući da on ima veću gustoću pa bi smanjio veličinu potrebnog spremnika. Ali te prednosti amonijaka treba dobro sagledati sa strane isplativosti i mogućih gubitaka, jer je to ne isplativo ukoliko je za krajnju uporabu potreban čisti vodik. U području automobilizma, prema trenutno dostupnim podacima, spremnici goriva za vodik imaju veću gustoću energije u odnosu na litij-ionske baterije što omogućava veći domet vozila u odnosu na trenutne električne automobile što je vrlo korisna informacija i zalog za budućnost u tom spektru za gusto naseljena

područja. Postoji i način skladištenja u čvrstim materijalima kao što su metalni i kemijski hidridi koji bi mogli omogućiti skladištenje većih količina vodika pri atmosferskom tlaku. No taj način skladištenja je još uvijek na samim počecima. [8]

Što se tiče geološkog skladištenja vodika za velike količine na dugo razdoblje, najčešće se govori u kontekstu slanih špilja i područja iscrpljenih naftnih bušotina i bušotina prirodnog plina. Ovakav način skladištenja se smatra najefikasnijim kada se uzmu u obzir svi mogući troškovi kao i učinkovitost „izvlačenja“ vodika iz geološkog spremnika. Slane špilje koriste se za skladištenje vodika u kemijskom sektoru u Ujedinjenom Kraljevstvu od 1970-ih te u Sjedinjenim Američkim Državama od 1980-ih. Ovakav način skladištenja u slanim špiljama im omogućava relativno jeftino skladištenje koje prosječno košta 0.6 USD/kg vodika te učinkovitost „izvlačenja“ od 98% kao i vrlo nisku razinu kontaminacije skladištenog vodika. Pozitivna stvar kod slanih špilja je što se slane špilje koje se koriste za skladištenje prirodnog plina mogu prenamijeniti za skladištenje vodika. Trenutno najveći sustav slanih špilja za skladištenje vodika imaju Sjedinjene Američke Države koje mogu pohraniti između deset i dvadeset tisuća tona vodika. Ujedinjeno Kraljevstvo ima tri slane špilje s kapacitetom od tisuću tona vodika odnosno ukupno kapacitet od 3 tisuće tona vodika. U Njemačkoj se priprema demonstracijski projekt slane špilje koja će imati kapacitet od tri i pol tisuće tona vodika koji je planiran za 2023. godinu. [8]

2.5. Prijenos i distribucija zelenog vodika

„Ovisno o načinu pohrane, postoje tri glavna načina isporuke vodika, a to su isporuka plinovitoga vodika, isporuka tekućeg vodika, te metalni hidridi. Odabir metode isporuke ovisi o specifičnim geografskim i tržišnim značajkama poput ciljane populacije i ponašanja potrošača, gustoće naseljenosti, veličine punionica i tržišnoga prodora električnih vozila na pogon gorivnim člancima (eng. Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV) i drugih sustava koji troše vodik.“ [3]

Vodik je moguće isporučiti kroz cjevovode kao i prirodni plin. Vodik može biti isporučen kao čisti vodik, ali kao i mješavina zajedno s prirodnim plinom. Sjedinjene Američke Države trenutno imaju 2575 kilometara namjenskih cjevovoda za vodik. Ti namjenski cjevovodi su postavljeni blizu velikih korisnika vodika kao što su rafinerije nafte i kemijska postrojenja. Vodik se prenosi na tlaku između 35 i 85 bara u cjevovodima. [1]

Osim cjevovodima vodik je moguće prenositi i prijevoznim vozilima u plinskim bocama.

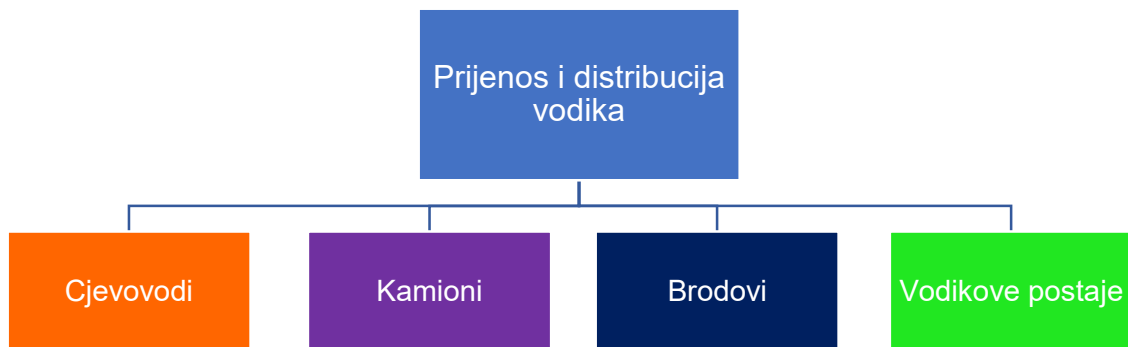
“Stlačeni vodik može se transportirati kamionima ili prikolicama u plinskim bocama s tlakovima između 200 i 700 bara (prikolica s jumbo cijevima može prevoziti do 1.100 kg H_2 stlačenoga na 500 bara). Prijevoz stlačenoga vodika kamionom izvediv je za kratke udaljenosti (do nekoliko stotina kilometara) i za male količine. Za veće udaljenosti vodik se obično prevozi u tekućem obliku (jedan kamion može prevesti do 3.500 kg tekućega vodika).“ [3]

Jedini problem kod prijevoznčkog transporta vodika jest što upravo transportna vozila izazivaju emisiju neželjenog CO_2 . Kamionskim prijevozom se lako može izgubiti željeni efekt smanjenja emisija CO_2 ukoliko se vodik vozi na duže relacije. [3]

Tako da je prije samog transporta bitno izvršiti kalkulaciju isplativosti te radnje, odnosno sve pozitivne i negativne efekte tipa transporta koji se odabire. Što se tiče miješanja prirodnog plina i vodika: „Njegova uloga je isključivo tranzicijska koja će omogućiti postupno umješavanje vodika. Na početku je udio vodika 10% da bi do 2050. godine postigli udio vodika od 100%. Kada se promatra EU, vidi se da se tu već sada može govoriti o 2% – 6% volumnih udjela vodika, a u Njemačkoj u određenim uvjetima i do 10%.“ [3]

„Ono što je važno za Republiku Hrvatsku je da svi planirani novi cjevovodi moraju prethodno zadovoljiti uvjet o mogućnosti prihvata 100% vodika.“ [3]

Iz svega navedenog može se zaključiti da i u smislu transporta postoje veliki izazovi u bližoj budućnosti za implementaciju vodika kao stalnog „igrača“ u svijetu energenata.



Slika 2.9. : Prikaz opcija prijenosa i distribucije vodika

2.6. Vodikova goriva i promet

Zeleni vodik je izvrsna opcija za promet s niskim udjelom ugljikovog dioksida te sposobnošću relativno brzog punjenja gorivom te domet sličan vozilima koja koriste fosilna goriva. Korištenje vodika kao alternativu za električnim vozilima moguće je ostvariti posebno za autobuse i kamione koji imaju veliku nosivost. Implementirajući vodik kao gorivo može se ublažiti pritisak na elektroenergetski sustav. Također vodik kao gorivo je moguće implementirati i u pomorstvo te zračni promet, koji su loši kandidati za elektrifikaciju.

U Sjedinjenim Američkim Državama upravo je promet najveći izvor stakleničkih plinova. U cestovnom prometu 90% energije dolazi iz fosilnih goriva. Implementacijom vodika kao goriva mogla bi se postići nulta emisija ugljikovog dioksida. Razina primjenjivosti vodika kao goriva je vrlo visoka budući da ga je moguće primijeniti na: osobna vozila, laka teretna vozila, srednja teretna vozila, teška teretna vozila, autobuse i motocikle. Prijevoz na zeleni vodik je idealno prikladan za teška transportna vozila i autobuse, budući da upravo oni čine više od četvrtine u udjelu utrošene energije za promet. Mogućnost za transportna vozila je svakako pogon gorivnim ćelijama ili čak s modificiranim motorima s unutarnjim izgaranjem koji bi za gorivo koristili umiješani vodik s prirodnim plinom ili s dizelom. Vozila na vodik mogu se vrlo brzo napuniti svojim vodikovim gorivom te je za jedno lako transportno vozilo potrebno 5-7 minuta za potpuno punjenje. Doseg jednog lakog transportnog vozila je od 400 do 650 kilometara. Još jedna prednost vodika kao goriva je svakako da je lakši od benzina i dizela i da pri istom volumenu u usporedbi s njima daje veću količinu energije. Samim time se povećava i nosivost samog vozila. [1]

Što se tiče osobnih vozila na gorivne ćelije Toyota je predstavila svoj prvi model s takvim pogonom.

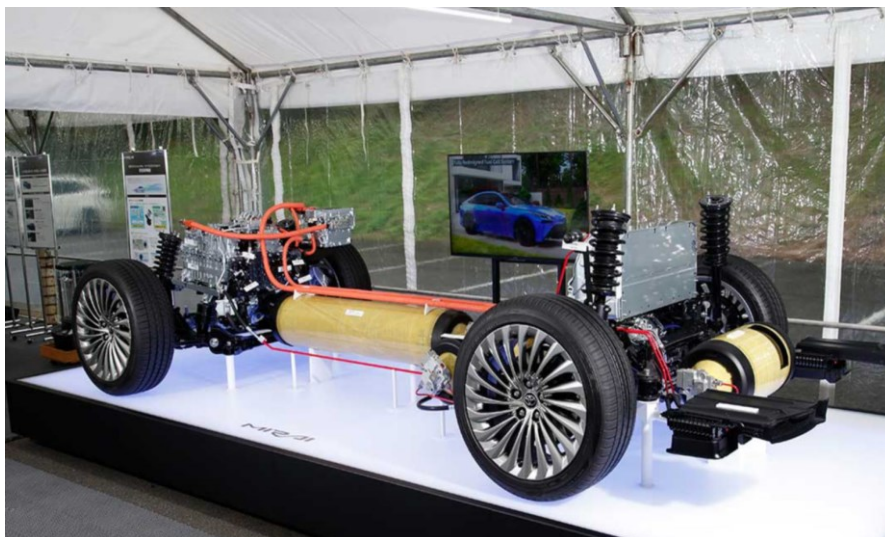
„Toyota je započela razvoj električnih vozila s vodikovim gorivnim člancima 1992. godine, uspješnim predstavljanjem limuzine Mirai na svjetskim tržištima 2014. godine. Ovo izuzetno postignuće je utemeljeno na predvodničkom iskustvu ovog proizvođača u hibridnoj tehnologiji, ključnoj tehnologiji za široku paletu pogonskih sklopova različitih električnih vozila.“ [9]

Zanimljivost u proizvodnji Toyote Mirai je svakako i sama tehnologija gorivnih ćelija koja se koristila. „Toyotin novi paket gorivnih članaka i pretvarač snage gorivnih članaka (FCPC) su razvijeni posebno za korištenje uz platformu GA-L. Konstruktori su uspjeli posložiti sve dijelove unutar okvira paketa (uključujući pumpe za vodu, intercooler, klima uređaj i zračne kompresore te pumpu za recirkulaciju vodika) pri čemu su svaki sklop učinili manjim i lakšim, istovremeno poboljšavajući performanse. Kućište paketa gorivnih članaka je sada manje zahvaljujući

zavarivanju trenjem, što je smanjilo zazor između gorivnog članka i kućišta.“ (IZVOR Toyota.hr / Mirai) „Paket gorivnih članaka koristi kruti polimer, kao na aktualnom Miraiju, ali je sada manji i ima manje članaka (330 umjesto 370). Unatoč tome, postavio je novi rekord u pogledu specifične gustoće snage od 5,4 kW/l (isključujući rubne ploče). Najveća snaga je na taj način povećana s 114 kW na 128 kW. Poboľšan je i rad na niskim temperaturama, pa je sada pokretanje moguće i pri -30°C .“ [9]



Slika 2.10. : Toyota Mirai – automobil na vodikov pogon [9]



Slika 2.11. : Prikaz pogona na vodik Toyote Mirai [9]

Osim u cestovnom prometu, prilika za ubacivanje vodika kao goriva moguća je i u pomorskom prometu. Budući da je 2019. ukupna emisija ugljikovog dioksida dolazila upravo iz pomorskog prometa, ubacivanje vodika je definitivno jedna od tehnika kojima je moguće smanjiti emisiju ugljikovog dioksida i u ovom sektoru. Većina brodova kao gorivo koristi loživa ulja iz fosilnih goriva dok neki moderniji brodovi koriste i tekući prirodni plin kao gorivo. Kako se pomorski promet susreće sa sve većom kontrolom okoliša i strogim međunarodnim standardima za emisije ugljikovog dioksida, vodik i na vodik bazirana goriva kao na primjer amonijak su sve privlačnija kao moguće alternative. Mogućnosti uporabe vodika su korištenje elektromotora koji će primati struju iz gorivne ćelije ili korištenje motora koji bi bili prilagođeni za rad na tekuće gorivo čija je baza vodik. Trenutno postoji nekoliko trajekta i čamaca u SAD-u i Europi koji prometuju na vodik. Luke mogu biti vrlo atraktivne lokacije za postavljanje vodikovih postaja za goriva budući da osim brodova, vrlo česta odredišta luka su i kamioni koji su idući korak u isporuci raznih dobara. Kada bi se postupno zamijenile postaje s fosilnim gorivima za postaje s vodikovim gorivima na tim područjima bi se također značajno smanjila emisija ugljikovog dioksida. [1]

Zračni promet je oblik prijevoza koji je najviše odgovoran za emisije ugljikovog dioksida te je odgovoran za 2% ukupnih emisija stakleničkih plinova. Trenutno su biogoriva jedina alternativa u zračnom prometu fosilnim gorivima. No, zeleni vodik se i u ovom načinu prometa promiče kao potencijalno rješenje za smanjenje emisije stakleničkih plinova. Zrakoplovi s pogonom na vodik bi trebali imati gorivne ćelije na vodik koje će emitirati samo vodu te se smatra da će biti mnogo tiši nego trenutni zrakoplovi na fosilna goriva što je ujedno još jedan benefit tog pogona. Trenutno postoji nekoliko malih vodikovih zrakoplova koji potvrđuju sami koncept takvog načina zrakoplova. Industrijski analitičari su vrlo optimistični oko zrakoplova na zeleni vodik te vjeruju da bi zrakoplovi s gorivnim ćelijama mogli izići na tržište oko 2035. Zahtjevi za ovakav pogon su sustavi za sigurnu pohranu tekućeg vodikovog goriva, odgovarajuće gorivne ćelije za pretvorbu vodika u električnu energiju, uređaj za upravljanje snagom ćelija te motor za okretanje propelera. Bez prethodno navedena četiri uvjeta nije moguće projektirati ni ostvariti komercijalno upotrebljiv zrakoplov na zeleni vodik. Uz razvoj navedene tehnologije bit će potrebni vrlo visoki naponi za izgradnju potrebne infrastrukture za punjenje goriva u zračnim lukama kao i implementiranje odgovarajućih sigurnosnih standarda koji su potrebni za sigurnu uporabu. Još jedna alternativa za gorivo u zrakoplovstvu su i sintetička vodikova mlazna goriva koja koriste zeleni vodik kao najznačajniji sastojak. Ovakav način goriva omogućio bi uporabu već postojećih mlaznih turbina za velike udaljenosti, te bi takvo gorivo također omogućilo i uporabu već postojeće infrastrukture za punjenje goriva čime bi se značajno smanjili troškovi infrastrukture. Trenutno je Europa najveći

optimist i prednjači u razvoju zrakoplova na zeleni vodik. Prema trenutno dostupnim informacijama vjeruje se da će u ne tako dalekoj budućnosti putnici moći letjeti od San Francisca do Singapura u zrakoplovu na zeleni vodik s nultom emisijom stakleničkih plinova. [1]

3. BUDUĆNOST I RAZVOJ ZELENOG VODIKA

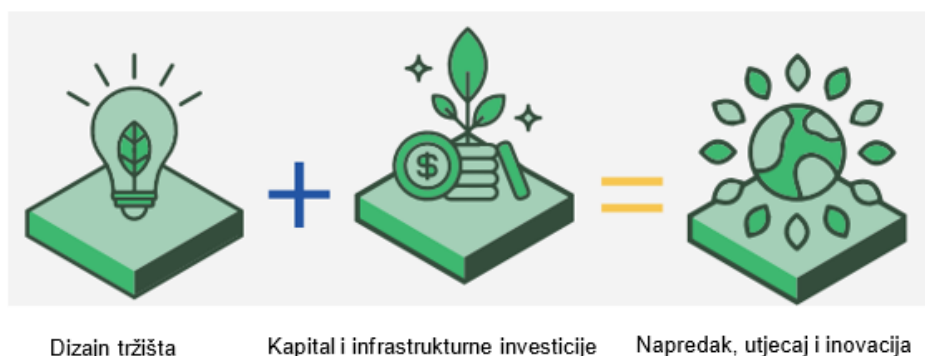
U ovome poglavlju je opisana budućnost zelenog vodika, mogućnosti razvoja tehnologija zelenog vodika, potencijalni problemi i izazovi s kojima bi se mogao susresti te plan i strategija Republike Hrvatske za zeleni vodik. Također su u ovome poglavlju opisane tehnološke mogućnosti i zadaci koji stoje pred tehnologijama za njihov razvitak.

3.1. Potencijalni problemi i izazovi zelenog vodika

Najveće prepreke i izazovi u brzom razvoju zelenog vodika ne leže u samoj tehnologiji, nego u tržišnom dizajnu. Prepreke kao što su ovisnost o paradigmi „najniže cijene“, odvojeno planiranje sektora plina i sektora električne energije, te potrebe za vodstvom, fokusom i usklađivanjem moraju se riješiti kako bi se zeleni vodik uspješno skalirao kao sami proizvod. [1]

Povijesno gledano planiranje energetske i plinskog sektora se oslanjalo na modele „najniže cijene“ za procjenu donošenja odluka, ulaganja te razvoja infrastrukture. Desetljećima je takav pristup dobro funkcionirao jer je bilo relativno lagano pretpostaviti i predvidjeti potražnju za fosilna goriva. Međutim, takav sustav ograničava inovacije i više ne služi interesima obveznika i ciljevima politike čiste energije. Trenutni izazovi su također i svi trenutni trendovi u energetske sektoru kao što su: vrlo niske cijene obnovljivih izvora energije, prijelaz iz centraliziranih u decentralizirane energetske sustave, digitalne kontrole, dvosmjerno skladištenje energije kao i potreba za dekarboniziranjem energetske sustava. Još jedan od ciljeva promijeniti mentalitet, odnosno promijeniti način razmišljanja s paradigme „najnižih cijena“ na pristup „Skupljanja pogodnosti i kompenzaciji“ u smislu energije. [1]

Pristup „skupljanja pogodnosti i kompenzacije“ se temelji na načelima efikasnosti i raznovrsnosti. Odnosno nije cijena ključni faktor u odluci, nego i same funkcije proizvoda u koji će se uložiti. Sa stajališta zelenog vodika, potrebno ga je dobro promovirati, pokazati sve njegove benefite kako bi se budući potrošači lakše odlučili za korištenje zelenog vodika kao energenta. Pomoć u odluci na prelazak na zeleni vodik mogu biti i razne zakonske regulative o emisijama CO_2 koje bi svakako išle u korist zelenog vodika kao energenta. Na sličan način kao i za uporabu i ulaganje u zeleni vodik se trebaju donositi odluke oko infrastrukture, odnosno ne treba cijena biti presudan faktor za izgradnju, nego sama strategija i što veća efikasnost buduće infrastrukture. Sveukupno, presudan je dobar marketing i iznos dostupnog kapitala za razvoj vodika na tržištu jer je i on samo još jedan proizvod na tržištu kojeg je potrebno dobro promovirati i „gurnuti“ na mainstream scenu, te prikazati i pružiti ljudima njegove benefite.



Slika 3.1. : Formula za napredak zelenog vodika [1]

Omogućavanje kompenzacijskih puteva za sve pogodnosti zelenog vodika je izniman izazov jer sami projekt zelenog vodika ne obuhvaća samo sektor energetike, odnosno proizvodnju, prijenos, distribuciju i korištenje električne energije, nego se projekt zelenog vodika odnosi i na sektore prometa i plina, što može značajno promijeniti situaciju u svim navedenim sektorima. Izazov za navedene sektore je i promjena mentaliteta i svijest o međusobnoj suradnji svih sektora na razvoju zelenog vodika jer se do sada nije pojavio tako fleksibilan energent poput vodika koji može imati toliko široku uporabu. Budući da će zeleni vodik biti spreman za komercijalnu uporabu kroz nekoliko godina, ključni izazov će biti i politika plasiranja na tržište koja može odigrati ključnu ulogu o budućnosti zelenog vodika kao energenta. Pred tom politikom će se naći izazovi poput dizajna tržišta, ispitivanje tržišta, pronalazak potrošača, razvoj tržišta, rast udjela vodika kao energenta na svjetskoj razini, te razviti ciklus stalnih ulaganja i smanjenja cijene za proizvodnju zelenog vodika. Također trenutno nedostaju i alati za modeliranje koji mogu pomoći u planiranju o mogućim kompromisima između ulaganja u plinsku i elektroenergetsku infrastrukturu. Odsutnost alata za modeliranje može imati negativan učinak u razmatranju šireg usvajanja zelenog vodika kao energenta, budući da bez načina za simulaciju mogućih događanja se zeleni vodik može smatrati ne dovoljno pouzdanim za velika ulaganja i potpuni prelazak na njega kao energenta. [1]

3.2. Tehnološka rješenja za razvoj zelenog vodika

U ovome potpoglavlju će se iznijeti potencijalna rješenja za smanjenje cijena trenutno dostupnih tehnologija za proizvodnju zelenog vodika te usporedba danih rješenja u odnosu na danas dostupne

tehnologije. Tehnološki napredak elektrolizatora može se podijeliti na nekoliko razina. Prva od tih razina u kojima tehnologija može napredovati je jedinična razina.

Na jediničnoj razini postoje dvije strategije za smanjenje troškova proizvodnje zelenog vodika. Prva strategija je dizajn i sastav ćelija, dok je druga strategija povećanje veličine modula. Prva strategija se odnosi na korištenje novih manje kritičnih materijala, redizajniranje postojećih tehnologija u cilju povećanja učinkovitosti što bi dalo nižu cijenu električne energije, duži životni vijek samih elektrolizatora i povećanje gustoće struje što bi dalo veću stopu proizvodnje zelenog vodika. Druga strategija bi trebala doprinijeti ravnoteži u primjeni između malih planski komercijalnih elektrolizatora i velikih planski industrijskih elektrolizatora. Alkalne elektrolizatore je moguće unaprijediti u području elektroda i dijafragmi. Cilj je povećati gustoću struje koja trenutno iznosi 0.5 A/cm^2 na $2-3 \text{ A/cm}^2$. Neki proizvođači su uspjeli proizvesti alkalne elektrolizatore s gustoćom struje od 1.2 A/cm^2 . Gustoća snage od $2-3 \text{ W/cm}^2$ je moguće postići sa stanjivanjem dijafragmi i membrana alkalnih elektrolizatora. Smanjenjem debljine dijafragme bi se postigla veća učinkovitost procesa i smanjenje potrošnje električne energije. Trenutna debljina dijafragme za alkalne elektrolizatore iznosi oko $460 \mu\text{m}$. Smanjenjem debljine dijafragme sa 460 na $50 \mu\text{m}$ povećala bi se učinkovitost s trenutnih 53% na 75% pri gustoći struje od 1 A/cm^2 . [5]

Tablica 3.1. : Predložene aktivnosti za poboljšanje performansi alkalnih elektrolizatora [5]

		Izazov	Benefit
1.	Velika površina katalizatora $>50 \text{ g/m}^2$	Lagano	Srednji
2.	Visoka iskorištenost katalizatora $> 80\%$	Umjereno	Srednji
3.	Poboljšana kinetika za vodik i kisik, evolucija s novim legurama na bazi nikla	Umjereno	Visok
4.	Ublažavanje deaktivacije katalizatora stranim elementima iz elektrolita	Umjereno	Nizak
5.	Dizajniranje, stvaranje i integriranje oblika rekombinacije katalizatora za prodiranje plina	Umjereno	Srednji
6.	Ublažavanje kritične degradacije katalizatora na anodi kako bi se izbjegao gubitak površine	Teško	Visok
7.	Ublažavanje stvaranja nikal-vodika na katodnoj strani	Teško	Nizak
8.	Uklanjanje mehaničke degradacije slojeva katalizatora	Teško	Visok
9.	Identificirati stabilne polimere koji će se koristiti za izradu elektroda	Teško	Visok
10.	Identificirati i smanjiti otpore od katalizatora do poroznog transportnog sloja (PTL-a)	Teško	Visok

U tablici 3.2. su prikazane aktivnosti odnosno zadaci koje je potrebno ispuniti kako bi se alkalni elektrolizatori poboljšali i dali veću učinkovitost.

Elektrolizator za protone s izmjenjivačkom membranom (PEM elektrolizator) moguće je unaprijediti u područjima bipolarne ploče i poroznog transportnog sloja (PTL). Budući da su ta dva dijela elektrolizatora značajno skupa imaju velik potencijal za smanjenje njihove cijene. Redizajnom PEM elektrolizatora moglo bi se postići značajne financijske uštede te povećati učinkovitost procesa elektrolize. Za to je potrebno povećati elektrode s trenutnih 1500 – 2000 cm^2 na 5000 cm^2 ili čak 10000 cm^2 . Veća površina elektrode bi se trebala upariti s mehanički robusnijim membranama koje bi mogle iskoristiti navedenu veličinu elektrode. S tim postupkom bi se učinkovitost PEM elektrolizatora povećala s trenutnih 1 MW/jedinici na 5 MW/jedinici, potencijalno čak i do 10 MW/jedinici. Kao i kod alkalnih elektrolizatora mogućnost za unaprjeđenje PEM elektrolizatora je stanjivanje membrane čime bi se mogla povećati učinkovitost s trenutnih 75% na 94% pri gustoći struje od 2 A/cm^2 . Potencijalni problem kod stanjivanja membrane je njihov manji životni vijek te niža mehanička čvrstoća. Elektrode moraju biti mehanički čvrste i stabilne kako ne bi došlo do neželjenih mehaničkih naprezanja tijekom postupka elektrolize čime može doći do pucanja elektroda. Stoga će se morati naći kompromis između debljine elektrode i željene učinkovitosti. Eventualnim razvojem novih materijala koji bi imali jednaku mehaničku čvrstoću pri manjim debljinama bi se uspjela postići oba cilja. Također s razvojem boljih poroznih transportnih slojeva je moguće pronaći rješenje kako smanjiti membranu, jer bi s kvalitetnijim PTL-om koji bi podupirao membranu bilo moguće smanjiti debljinu membrane bez rizika od pucanja elektroda. Također mogućnost smanjenja troškova je i eventualna zamjena materijala od kojih se prve PTL-ovi koji su trenutno pretežito od titana kao i bipolarne ploče, te većinom imaju zaštitni premaz od platine. Studije su pokazale da su potencijalni novi materijali za PTL-ove i bipolarne ploče niobij, tantal te nehrđajući čelik koji bi trebao imati zaštitni premazni sloj. [5]

Postoje određene aktivnosti i zadaci koje je potrebno izvršiti kako bi se poboljšao cijeli sustav elektrolizatora za protone s izmjenjivačkom membranom. U idućim godinama će biti ključno uložiti sredstva kako bi se aktivnosti i zadaci mogli izvršiti. U slijedećoj tablici su prikazane te aktivnosti i zadaci, čijim izvršavanjem će se povećati učinkovitost PEM elektrolizatora.

Tablica 3.2. : Predložene aktivnosti za poboljšanje performansi PEM elektrolizatora [5]

		IZAZOV	BENEFIT
1.	Ublaživanje deaktivacije membrane stranim elementima iz sustava	Lagano	Srednji
2.	Dizajniranje, stvaranje i integriranje oblika rekombinacije katalizatora za prodiranje plina	Lagano	Srednji
3.	Povećanje iskorištenja katalizatora, anode i katode	Umjereno	Visok
4.	Identificirati i smanjiti otpore od katalizatora do poroznog transportnog sloja (PTL-a)	Umjereno	Srednji
5.	Smanjiti omske gubitke i propusnost membrane	Teško	Visok
6.	Poboljšati kinetiku kisika evolucijom bez korištenja irdija za katalizatore	Teško	Visok
7.	Uklanjanje mehaničke degradacije slojeva katalizatora	Teško	Srednji
8.	Napraviti zaštitne slojeve bez plemenitih metala za PTL-ove	Teško	Visok
9.	Napraviti PTL-ove bez titanija	Teško	Visok

Elektrolizator za anione s izmjenjivačkom membranom (AEM elektrolizator) je moguće unaprijediti u smislu membrane i ionomera. Budući da su AEM elektrolizatori još uvijek relativno nova tehnologija još uvijek se traži membrana sa željenim svojstvima kao što su visoka mehanička, kemijska i toplinska stabilnost, veću ionsku vodljivost i manju permeabilnost u odnosu na elektrone. Problem je što je postizanje visoke mehaničke čvrstoće i ionske vodljivosti vrlo skupa. Razvijene su strategije za povećanje ionske vodljivosti, ali trenutno dostupne dovode do smanjenja mehaničke čvrstoće zbog prekomjernog upijanja vode. Tada se događa da AEM elektrolizator postaje kemijski nestabilan te mu se narušava ionska vodljivost. Ionska vodljivost igra značajnu ulogu u performansama AEM elektrolizatora, zato je glavni cilj podići ionsku vodljivost pri tome ne narušavajući mehaničku čvrstoću. S većom ionskom vodljivosti se dobiva i veća gustoća struje samim time i učinkovitost. Kao i kod alkalnih i PEM elektrolizatora želja je povećati životni vijek elektroda i PTL-ova. [5]

Elektrolizator s krutim oksidima je kao i AEM elektrolizator relativno nova tehnologija koju čeka još puno razvijanja. Glavni potencijal elektrolizatora s krutim oksidima leži u visokoj učinkovitosti

dok je glavni izazov životni vijek elektrolizatora. Područja u kojima se može razvijati elektrolizator s krutim oksidima jesu: poboljšanje vodljivosti elektrolita, optimizacija kemijske i mehaničke stabilnosti, usklađivanje koeficijenta toplinskog širenja obje elektrode. [5]

Kao i kod svih tehnologija razvoj materijala je uvijek bitan faktor za razvoj tehnologije. PEM elektrolizator ima najveću prepreku u smislu materijala jer mu je anodna strana podložna velikom potencijalu oksidacije i nema puno materijala koji mogu pružiti dugotrajan rad u takvim uvjetima. Zbog toga su najzastupljeniji materijali koji se trenutno koriste iridij, titan i platina. Postoji alternativa u tantalu kao materijalu za premaz koji bi mogao zamijeniti platinu. No svi navedeni materijali su vrlo skupi, zbog čega će se morati razviti novi materijali kako bi bila moguća komercijalna primjena. Titan je najskuplji jer je najzastupljeniji, ali njegovi troškovi su visoki zbog proizvodnje komponenata od njega, a ne zbog sirovog titana. [5]

Osim na jediničnom nivou samih tehnologija razvitak je moguć i na sustavnom globalnom nivou. Postoje dvije strategije na globalnom nivou, a to su: Povećanje obujma proizvodnje elektrolizatora te strategija „Uči – radeći“. Povećanje obujma proizvodnje elektrolizatora se temelji na ekspanziji proizvodnje elektrolizatora, te će se time predvoditi smanjenju specifičnih troškova. Globalnom ekspanzijom proizvodnje može se doprinijeti smanjenju troškova zgrada za proizvodnju kroz razne poticaje, poboljšati korištenje opreme i poboljšati proces prinosa i time smanjiti gubitke. Strategija „Uči-radeći“ se temelji na smanjenju troškova proizvodnje kroz iskustvo prethodne proizvodnje. Odnosno kroz masovnu proizvodnju dolazi do novih otkrića u toj tehnološkoj grani, čime se smanjuju troškovi te se konkurencija na tržištu međusobno dopunjuje kroz inovacije i guraju jedni druge da budu bolji i samim time pada cijena proizvodnje. Smanjenje troškova može biti postignuto na više načina, neki od načina su: smanjenje vremena proizvodnje, standardizacija, razvoj specijaliziranih tvrtki za proizvodnju nekih dijelova za elektrolizatore formirajući lance vrijednosti. Veće kumulativna implementacija dovodi do više iskustva u svakoj pojedinoj grani od ljudi koji se bave razvojem projekata do radnika u pogonu. S većom razinom iskustva se može dovesti do bolje percepcije rizika i time smanjiti neželjene troškove. [5]

3.3. Budućnost zelenog vodika

Budućnost zelenog vodika ovisiti će o daljnjim koracima koje ljudi iz energetske, ekonomske i političke struke budu poduzimali. Prema trenutnim planovima i očekivanjima budućnost zelenog vodika je svakako svijetla. U prilog mu idu planovi za smanjenje emisije ugljikovog dioksida te širenje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, budući da se zeleni vodik

dobiva iz obnovljivih izvora tim domino efektom će se širiti i proizvodnja i uporaba zelenog vodika.

Vlade zemalja mogu imati koristi ulažući u proizvodnju zelenog vodika budući da će prema planovima za budućnost veći dio tehnologija biti s nultom emisijom ugljikovog dioksida te će ulažući u zeleni vodik imati već iskustva u radu s tehnologijama s nultom emisijom ugljikovog dioksida. Budućnost vodika također donosi veći udio zelenog vodika u ukupnom udjelu vodika, kao i veći udio u udjelu ukupne uporabe energenata. Zeleni vodik čeka i sve veća primjena u transportu, metalnoj industriji i u proizvodnji električne energije. Također u budućnosti će se vodik moći pronaći u nekoliko vrsta goriva koji su izvedenice iz elementarnog vodika kao što je naprimjer amonijak koji se čak i trenutno pojavljuje kao jedno od vodikovih goriva. Kratkoročni ciljevi u razvoju tehnologija zelenog vodika su razvijanje elektrolizatora koji će svojim razvitkom pospješiti učinkovitost procesa elektrolize. Implementacija nekih sektora se očekuje do 2030. [8]

Tablica 3.3. : Predikcije primjena i skala dugoročnih potencijala vodika [8]

Tip primjene	Primjena	Veličina mogućnosti do 2030. u <i>kt H₂/godina</i>	Skala dugoročnog potencijala
Glavne vrste upotrebe vodika danas	Amonijak i metan	>100	Visok
	Rafinerije nafte i biogoriva	>100	Srednji
	Željezno i čelik (industrije)	10-100	Nizak
Nove primjene vodika za čisti energetski sustav	Zgrade	>100	Visok
	Cestovni teret	>100	Visok
	Putnička vozila	>100	Srednji
	Zgrade (vodik miješan u plinskoj mreži)	>100	Nizak
	Željezo i čelik (100% čisti vodik)	10-100	Visoka
	Zrakoplovni i pomorski promet	<100	Visoka
	Skladištenje električne energije	<100	Visoka
	Fleksibilna i rezervna proizvodnja energije	<100	Srednja
	Toplina za industriju kojoj su potrebne visoke temperature	<100	Niska

Kratkoročna ulaganja u jedan sektor mogu pospješiti implementaciju zelenog vodika u druge povezane sektore. Trenutno je vodik relativno skupo gorivo, ali trenutne predikcije govore kako to neće dugo biti tako, stoga će se primjenom povećanom primjenom zelenog vodika dogoditi i

pozitivni utjecaj na klimatske promjene. Do 2030. je plan napraviti što bolju tranziciju u proizvodnji vodika u smislu smanjenja emisija ugljikovog dioksida pri proizvodnji. Prema tome će se u narednim godinama značajno smanjiti proizvodnja sivog vodika te podizati proizvodnja plavog i zelenog vodika. Upravo je plavi vodik taj koji će biti ključan za tranziciju na proizvodnju s nultom emisijom ugljikovog dioksida. [8]

Prema nekim procjenama IEA idućih deset godina će biti ključno i kritično u energetske tranziciji te vodik svakako ima mjesta u tom „novom energetskom poretku“. „Ambiciozni pragmatizam“ će biti nužan za stvaranje zamaha u komercijalnoj proizvodnji jeftinog zelenog vodika te pomoći u pozicioniranju zelenog vodika te u borbi s drugim energentima.

U posljednjih deset godina je napravljen veliki napredak no potrebno je još vremena da nove energetske tehnologije prodru na tržište i postanu opće prihvaćene. Upravo u idućih deset godina bi vodik trebao napraviti tu tranziciju iz pojma energenta za koji je čulo jako malo ljudi u pojam energenta koji postaje mainstream energent za koji je će čuti jako visok udio ljudi koji nisu nužno povezani s energetikom. [8]

Postavljanje dugoročnih ciljeva je vrlo bitno kako bi se osiguralo tržište vodika u narednim godinama. Primjer dugoročnih ciljeva postoji u prometu, do 2030. bi se trebalo riješiti pitanje infrastrukture i puštanje u pogon vozila na gorivne ćelije. Neke zemlje već imaju razvijene strategije oko lokacija punionica vodika.

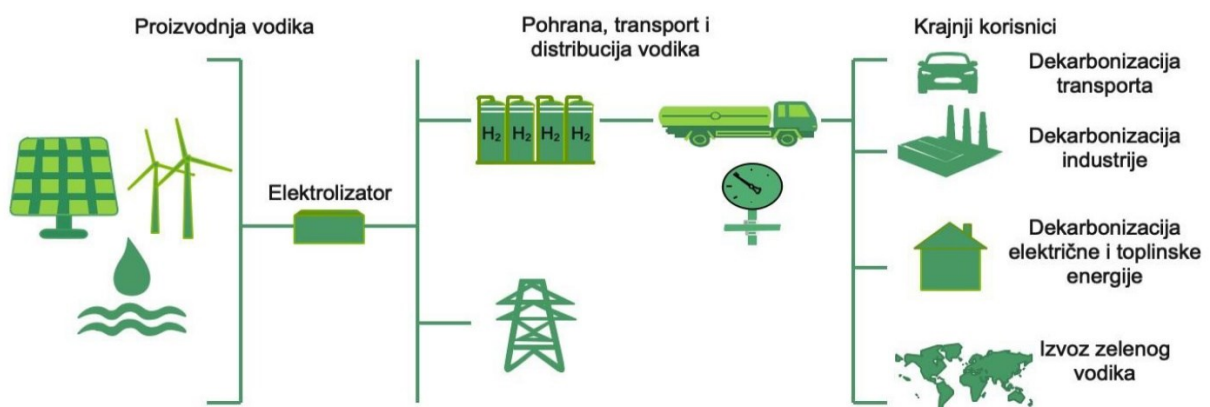
3.4. Vodik u Republici Hrvatskoj

„Sukladno članku 18. stavku 5. Zakona o sustavu strateškog planiranja i upravljanja razvojem Republike Hrvatske (»Narodne novine«, broj 123/17.), Vlada Republike Hrvatske je na 45. sjednici održanoj 25. veljače 2021. donijela Odluku o pokretanju postupka izrade Hrvatske strategije za vodik od 2021. do 2050. godine (u daljnjem tekstu: Strategija), koju donosi Hrvatski sabor na prijedlog Vlade Republike Hrvatske.

Temeljem navedene Odluke, za izradu Strategije zaduženo je Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja te je ministar, 18. ožujka 2021., donio Odluku o osnivanju stručne radne skupine za izradu prijedloga Hrvatske strategije za vodik od 2021. do 2050. godine (KLASA: 310-02/21-01/94, URBROJ: 517-07-1-2-21-10). Predsjednik Stručne radne skupine je ministar gospodarstva i održivog razvoja, a zadatak skupine je bio pripremiti sve analitičke podloge, temeljene na Nacionalnoj razvojnoj strategiji Republike Hrvatske do 2030. godine te Strategiji energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu, kao i nacrt dokumenta

koji će, nakon javne rasprave i uključivanja svih relevantnih dionika, omogućiti razvoj strateških ciljeva vezanih uz gospodarstvo zasnovano na vodik. Na osnovi brojnih aktivnosti vezanih uz dijalog sa svim zainteresiranim dionicima i aktivnosti Stručne radne skupine, Vlada Republike Hrvatske je pripremila Prijedlog hrvatske strategije za vodik do 2050. godine.“ [10]

Cilj osnivanja strategije za vodik jest izvršenje cilja Europske Unije da Europa postane prvi CO_2 neutralni kontinent do 2050. Republika Hrvatska radi na vlastitoj dekarbonizaciji promičući proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora te inzistiranjem na povećanju energetske učinkovitosti u industriji i kućanstvu. Vodik će imati značajnu ulogu u više sektora. Očekuje se primjena zelenog vodika u sektorima grijanja i hlađenja gdje bi trebao zamijeniti fosilna goriva i prirodni plin. Također veliku ulogu bi trebao imati u sektoru prometa gdje bi također trebao zamijeniti fosilna goriva te osigurati sigurni promet i mobilnost kroz cestovni, željeznički, pomorski te zračni promet. „ Vodik je kompatibilan s trenutnim obrascima potrošnje i omogućava povezivanje električnih i toplinskih sustava na fleksibilan način, ističući komplementarnost i sinergiju između električnih mreža i plinskih sustava. Tehnologije povezane s vodikom razvile su se diljem svijeta nevjerojatnom brzinom u posljednjem desetljeću. Sada postoje dokazi da je u određenim kontekstima proizvodnje i uporabe vodik već održivo i isplativo rješenje za dekarbonizaciju nekih od najtežih sektora u gospodarstvu, poput prometa ili toplinske energije u nizu gospodarskih grana.“ Potencijal za proizvodnju električne energije u Republici Hrvatskoj prvenstveno proizlazi iz potencijala za proizvodnju obnovljivih izvora energije. Osim zelenog vodika koji dolazi iz obnovljivih izvora, značajan udio potencijala za proizvodnju dolazi iz postupka plinske reformacije metana s ugrađenom CCS tehnologijom koja skuplja čestice ugljikovog dioksida. Takva vrsta proizvodnje vodika bi trebala biti usko povezana s trenutnim industrijskim središtima kao što su naftne rafinerije kako bi se koristio potencijal naftnih i plinskih polja za pohranu dobivenog ugljikovog dioksida iz proizvodnje. [10]



Slika 3.2. : Shema vodikovog lanca vrijednosti od proizvodnje do krajnjih korisnika [10]

Doline vodika predstavljaju jednu svjetsku inicijativu u kojoj bi se trebalo integrirati 36 dolina vodika na 5 kontinenata.

„To su regionalni sustavi smješteni unutar više država, koji povezuju proizvodnju vodika, transport i različite krajnje uporabe (poput mobilnosti ili industrijske sirovine) te su važni za uspostavu i jačanje gospodarstva zasnovanog na vodiku. Postoje i unutar članica EU-a poput Nizozemske, Španjolske, Njemačke i sl.“ [10]

„Doline vodika imaju za cilj promovirati mogućnosti i potencijal vodikovih tehnologija u svrhu privlačenja dodatnih ulaganja u regije i države koje su uspostavile dolinu vodika te osigurati lanac vrijednosti od proizvodnje do korištenja vodika. Privlačenje investicija na svjetskoj razini osigurava vidljivost i prepoznatljivost pojedinih regija po pitanju vodikovih tehnologija.“ [10]

„RH je uključena u projekt »Dolina vodika Sjeverni Jadran« zajedno s Republikom Slovenijom i *Autonomnom regijom Friuli, Venezia Giulia* iz sjeverne Italije. Predmetna dolina je u procesu uspostave i za cilj ima povezivanje projekata, koji su sastavni dio doline, s potencijalnim partnerima u državama članicama doline. Uz to, dolina ima važnu ulogu i u osiguravanju vidljivosti RH, SI i IT unutar EU-a, kao i njihove vodeće pozicije ispred 13 najmlađih država članica EU-a (EU 13 država), koje još uvijek nemaju dovoljno razvijen potencijal za proizvodnju i korištenje obnovljivog vodika.“ [10]

4. UPORABA SUSTAVA ZA PROIZVODNJU ZELENOG VODIKA ZA ENERGETSKE POTREBE JAVNE ZGRADE

U ovome poglavlju želi se prikazati mogućnosti uporabe sustava za proizvodnju zelenog vodika za energetske potrebe javne zgrade. Najprije je prikazano nekoliko trenutno tržišno dostupnih sustava za proizvodnju zelenog vodika putem elektrolize vode pomoću PEM tehnologije elektrolizatora. Sustavi su međusobno uspoređeni prema njihovoj primjenjivosti, učinkovitosti te isplativosti prema tipu namjene. Osim samih usporedbi postojećih sustava u ovome poglavlju se nalazi i proračun proizvodnje zelenog vodika za zadovoljenje energetskih potreba javne zgrade.

4.1. Usporedba tržišno dostupnih sustava za proizvodnju zelenog vodika putem elektrolize vode

Trenutno tržišno dostupni sustavi za proizvodnju vodika dolaze u različitim veličinama. U ovome poglavlju će biti opisani sustav za proizvodnju vodika različitih veličina u smislu količine proizvodnog vodika na sat (l/h) i to cjelokupnog sustava koji proizvodi 10 l/h vodika (oznaka proizvođača C10) te samo generatori vodika (elektrolizatori) 2 l/h (oznaka H2m), 4 l/h (oznaka H4m) i 6 l/h (oznaka H6m) . Međusobno će se usporediti navedeni sustavi i generatori vodika (elektrolizatori) i njihov red veličine moguće opskrbe vodikom.

Najveći i najskuplji od navedenih sustava i generatora je sustav za proizvodnju vodika C10. Njegova glavna sposobnost je što posjeduje kompletan sustav za proizvodnju te na njega nije potrebno ništa nadograđivati od ostalih komponenti, nego radi samostalno. Sustav za proizvodnju vodika C10 dolazi s proizvodnim protokom od $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ pri temperaturi od 0°C i tlaku iznosa 1 bar. Sustav radi na maksimalnoj nadmorskoj visini od 2000 m i njegov rad se kreće pri temperaturama od 5°C do 40°C , masa samog sustava iznosi 2041 kg. Sustav radi s PEM elektrolizatorom. [11]



Slika 4.1. : Sustav za proizvodnju vodika C10 [11]

Na slici 4.1. je prikazan sustav za proizvodnju vodika C10. U samom sustavu su integrirani: sustav za praćenje vode uključujući nadzor čistoće, automatska kontrola razine vode, automatska kontrola proizvodnje vodika, sustav deioniziranja vode, hladnjak, mjerač točke rosišta, paket mogućnosti rada na otvorenom, računalo za bilježenje podataka i statistike i automatski sustav detekcije curenja vodika. [11]

Tablica 4.1. : Tehničke specifikacije sustava za proizvodnju vodika C10 [11]

Protok	10 Nm ³ /h pri temperaturi od 0°C i tlaku iznosa 1 bar
Izlazni tlak	30 bara
Čistoća vodika	99.9995%
Opskrba deioniziranom vodom	ASTM tipa 1 i ASTM tipa 2
Tlak deionizirane vode pri automatskom punjenju	1 bar do 4.1 bara
Stopa potrošnje vode	9 L/h
Stopa potrošnje električne energije	6.2 kWh/Nm ³ ili 68.9 kWh/kg
Električno napajanje	342 VAC do 456 VAC , 3 faze , 50 Hz
Standardi zaštite sustava	P66 za kućište napajanja, IP56 za kućište elektrolizatora, IP24 za unutarnju raskidnu kutiju i IP56 za vanjsku rasklopnu kutiju
Maksimalno toplinsko opterećenje	33.5 kW
Radna temperatura	od 5°C do 40°C
Dimenzije	Kućište elektrolizatora: 2388 mm × 914 mm × 2007mm ; Kućište napajanja: 1880 mm × 914 mm × 2007mm
Maksimalna nadmorska visina	2000 m
Masa sustava	2041 kg

U tablici 4.1. su prikazane sve tehničke specifikacije sustava za proizvodnju vodika i njegove potrebe za rad. Ovakav sustav kao što je C10 može služiti kao opskrba vodikom jednoj većoj zgradi. Osim C10 postoje i veći sustavi za proizvodnju vodika, a to su sustavi C20 i C30. Razlika između većih sustava C20 i C30 u odnosu na C10 je veća zapremina vode i veća proizvodnja vodika po satu. Takvi sustavi su zbog svojih mogućnosti i skuplji od C10, ali oni imaju mogućnost primjene za puno veće površine od sustava C10.

H2m generator je najmanji generator koji svoju primjenu nalazi u opskrbi energijom za obradu materijala, hlađenje elektrana te za razna elektronička postrojenja. H2 generator dolazi s proizvodnim protokom od $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ pri temperaturi od 0°C i tlaku iznosa 1 bar. Sam generator je modularan i ima mogućnost nadogradnje s različitim komponentama. Također ova vrsta generatora ima sposobnost kombiniranja s drugim generatorima, tako stvarajući sustav većeg proizvodnog kapaciteta. Ovaj generator također kao i C10 sustav radi s PEM tehnologijom elektrolizatora. [11]



Slika 4.2. : Generator za proizvodnju zelenog vodika H2m [11]

Na slici 4.2. je prikazan generator H2m za proizvodnju zelenog vodika. Generator se sastoji od: automatske kontrole razine vode, sustava za praćenje vode i nadzor čistoće, automatske kontrole proizvodnje, sustav „osjećanja“ potražnje proizvodnje prema kojoj regulira tempo proizvodnje, sustav za praćenje protoka zraka, automatski sustav za detekciju curenja vodika. [11]

Tablica 4.2. : Tehničke specifikacije H2m generatora za proizvodnju zelenog vodika [11]

Protok	2 Nm ³ /h pri temperaturi od 0°C i tlaku iznosa 1 bar
Izlazni tlak	15 bara, mogućnost do 30 bara
Čistoća vodika	99.9995%
Opskrba deioniziranom vodom	ASTM tipa 1 i ASTM tipa 2
Tlak deionizirane vode pri automatskom punjenju	1.5 bar do 4 bara
Stopa potrošnje vode	1.83 L/h
Stopa potrošnje električne energije	7.3 kWh/Nm ³
Električno napajanje	380 VAC do 400 VAC , 3 faze , 50 Hz
Standardi zaštite sustava	IP66 za elektroniku. IP43 za odjeljak tekućine. Odjeljak tekućine ima mogućnost nadogradnje na IP56
Maksimalno toplinsko opterećenje	8.1 kW
Radna temperatura	od 5°C do 50°C
Dimenzije	1800 mm × 810 mm × 1910mm
Maksimalna nadmorska visina	2400 m
Masa sustava	682 kg

U tablici 4.2. se nalaze tehničke specifikacije H2m generatora. U odnosu na C10 sustav ima manje dimenzije i masu, kao i manju mogućnost proizvodnje vodika po satu. Također ima i manje toplinsko opterećenje od C10 sustava. Ali svakako H2m generatoru ide u prilog mogućnost nadogradnje pomoću koje se može kombinirati više vrsta generatora kako bi se došlo do željene razine proizvodnje, dok u C10 sustavu dolazi već integriran cijeli sustav i nema mogućnosti proširenja. [11]

H4m generator za proizvodnju vodika je vrlo sličan po svojim mogućnostima H2m generatoru jedina i glavna razlika je razina proizvodnje vodika. H4m ima razinu proizvodnog protoka od 4 Nm³/h pri temperaturi od 0°C i tlaku iznosa 1 bar. Dolazi u istim dimenzijama kao i H2m generator. [11]



Slika 4.3. : Generator za proizvodnju zelenog vodika H4m [11]

Na slici 4.3. je prikazan generator H4m za proizvodnju zelenog vodika. Sa slike se može vidjeti da zapravo nema nekih bitnih razlika u izgledu u odnosu na H2m generator. Također, sastoji se od istih dijelova kao i H2m generator, a to su: automatske kontrole razine vode, sustava za praćenje vode i nadzor čistoće, automatske kontrole proizvodnje, sustav „osjećanja“ potražnje proizvodnje prema kojoj regulira tempo proizvodnje, sustav za praćenje protoka zraka, automatski sustav za detekciju curenja vodika. Osim po masi i proizvodnom protoku razlikuju se i po maksimalnom toplinskom opterećenju kao i po stopi potrošnje vode, ali to su tehnički podaci koji su u visokom stupnju korelacije sa proizvodnjom vodika pa su na neki način i očekivane razlike u tim tehničkim podacima. [11]

Tablica 4.3. : Tehničke specifikacije H4m generatora za proizvodnju zelenog vodika [11]

Protok	4 Nm ³ /h pri temperaturi od 0°C i tlaku iznosa 1 bar
Izlazni tlak	15 bara, mogućnost do 30 bara
Čistoća vodika	99.9995%
Opskrba deioniziranom vodom	ASTM tipa 1 i ASTM tipa 2
Tlak deionizirane vode pri automatskom punjenju	1.5 bar do 4 bara
Stopa potrošnje vode	3.66 L/h
Stopa potrošnje električne energije	7 kWh/Nm ³
Električno napajanje	380 VAC do 400 VAC , 3 faze , 50 Hz
Standardi zaštite sustava	IP66 za elektroniku. IP43 za odjeljak tekućine. Odjeljak tekućine ima mogućnost nadogradnje na IP56
Maksimalno toplinsko opterećenje	16.1 kW
Radna temperatura	od 5°C do 50°C
Dimenzije	1800 mm × 810 mm × 1910mm
Maksimalna nadmorska visina	2400 m
Masa sustava	727 kg

U tablici 4.3. se nalaze tehničke specifikacije generatora H4m. U odnosu na C10 sustav, kao i H2m generator ima manje dimenzije i masu, kao i manju mogućnost proizvodnje vodika po satu. Također ima i manje toplinsko opterećenje od C10 sustava.

H6m generator dolazi s proizvodnim protokom od 6 Nm³/h pri temperaturi od 0°C i tlaku iznosa 1 bar. Također, kao i H2m i H4m to je modularan generator s mogućnošću proširenja proizvodnje. H6m je moguće upariti s H2m i tako tvoriti „H8m“ koji kao sam generator ne postoji, ali ako su potrebe sustava za tom količinom proizvodnje moguće ju je izvesti uparivanjem dva navedena generatora. H6m generator kao i C10 sustav te H2m i H4m radi s PEM tehnologijom

elektrolizatora. Razlikuje se od H4m i H2m po masi generatora, po većem proizvodnom protoku, pa samim time i većoj stopi potrošnje vode. [11]

H6m generator se sastoji od istih dijelova kao i H2m i H4m generator, a to su: automatske kontrole razine vode, sustava za praćenje vode i nadzor čistoće, automatske kontrole proizvodnje, sustav „osjećanja“ potražnje proizvodnje prema kojoj regulira tempo proizvodnje, sustav za praćenje protoka zraka, automatski sustav za detekciju curenja vodika. [11]



Slika 4.4. : Generator za proizvodnju zelenog vodika H6m [11]

Slika 4.4. prikazuje generator H6m. Generator H6m se razlikuje u nekoliko tehničkih specifikacija u odnosu na H2m i H4m generatore. Razlika u odnosu na sustav je kao i kod H2m i H4m sama mogućnost nadogradnje i fleksibilnost mogućnosti proizvodnje nadgrađivanjem.

Tablica 4.4. : Tehničke specifikacije H6m generatora za proizvodnju zelenog vodika [11]

Protok	6 Nm ³ /h pri temperaturi od 0°C i tlaku iznosa 1 bar
Izlazni tlak	15 bara, mogućnost do 30 bara
Čistoća vodika	99.9995%
Opskrba deioniziranom vodom	ASTM tipa 1 i ASTM tipa 2
Tlak deionizirane vode pri automatskom punjenju	1.5 bar do 4 bara
Stopa potrošnje vode	5.50 L/h
Stopa potrošnje električne energije	6.8 kWh/Nm ³
Električno napajanje	380 VAC do 400 VAC , 3 faze , 50 Hz
Standardi zaštite sustava	IP66 za elektroniku. IP43 za odjeljak tekućine. Odjeljak tekućine ima mogućnost nadogradnje na IP56
Maksimalno toplinsko opterećenje	23.7 kW
Radna temperatura	od 5°C do 50°C
Dimenzije	1800 mm × 810 mm × 1910mm
Maksimalna nadmorska visina	2400 m
Masa sustava	773 kg

U tablici 4.4. se nalaze tehničke specifikacije H6m generatora. H6m generator svoju primjenu nalazi u većim kućanstvima i manjim zgradama. Također na razini mjeseca, jedan H6m generator će isporučivati jednaku količinu vodika kao i jedna i pol jumbo prikolica iz nekakvog specificiranog proizvodnog pogona vodika. Prednost ovakvih generatora u odnosu na dopremu iz proizvodnih pogona je smanjenje troškova radi prijevoza i distribucije samog vodika, kao i sigurnost čistoće proizvedenog vodika. [11]

4.2. Proračun proizvodnje zelenog vodika na primjeru javne zgrade Strojarskog fakulteta u Slavenskom Brodu

U ovome proračunu je cilj izračunati kolika je mogućnost zadovoljavanja energetske potrebe javne zgrade Zavoda za energetiku Strojarskog fakulteta u Slavenskom Brodu pomoću kombinacije fotonaponske elektrane i PEM elektrolizatora koji proizvodi zeleni vodik. U proračunu će biti prikazana prosječna dnevna potrošnja i proizvodnja električne energije te mogućnost proizvodnje zelenog vodika putem PEM elektrolizatora u prosječnom danu u godini, te u prosječnim danima u veljači i kolovozu budući da su to mjeseci u kojima se najviše odnosno najmanje potroši električne energije, te prikaz rada elektrolizatora po mjesecima. Za potrebe proračuna pretpostavljamo FN elektranu instalirane snage 64 kW koja je instalirana u okviru

Interreg IPA Hrvatska Srbija projekta RESCUE. Za dnevni dijagram potrošnje po mjesecima preuzeti su mjereni podaci od zgrade Zavoda za energetiku Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu.

Tablica 4.5. : Mjerni podaci prosječne potrošnje po satima za prosječan dan u godini

Sati	Prosječna potrošnja po satima u godini [kW]
0	18,99
1	18,72
2	18,58
3	18,58
4	18,26
5	18,18
6	20,42
7	25,30
8	41,05
9	46,07
10	48,82
11	51,35
12	53,68
13	54,21
14	53,10
15	48,17
16	36,87
17	30,02
18	26,67
19	23,60
20	21,02
21	19,50
22	19,39
23	19,25

U tablici 4.5. su prikazani podaci o prosječnoj dnevnoj potrošnji električne energije u godini.



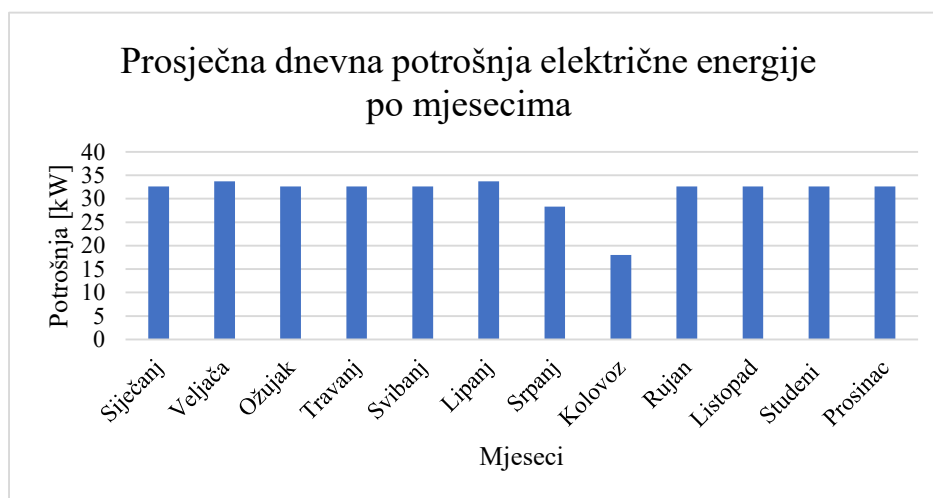
Slika 4.5. : Dijagram prosječne dnevne potrošnje električne energije u godini

Na slici 4.5. su prikazane prosječne dnevne potrebe za električnom energijom u javnoj zgradi Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu. Iz slike 4.5. je jasno vidljiv profil dnevne potrošnje u kojemu je najizraženija te ujedno i najveća potrošnja između 8 i 16 sati, što je i očekivano budući da tada u zgradi boravi najviše ljudi. Prosjek dnevne potrošnje iznosi oko $31 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$.

Tablica 4.6. : Prosječna dnevna potrošnja električne energije po mjesecima

Mjesec	Prosječna dnevna potrošnja električne energije po mjesecima [kW]
Siječanj	32,65
Veljača	33,70
Ožujak	32,65
Travanj	32,65
Svibanj	32,65
Lipanj	33,70
Srpanj	28,29
Kolovoz	18,00
Rujan	32,65
Listopad	32,65
Studeni	32,65
Prosinac	32,65

U tablici 4.6. su prikazani mjerni podaci o prosječnoj potrošnji električne energije, tijekom prosječnog dana za svaki mjesec u godini. Srednja vrijednost potrošnje električne energije u prosječnim danima u mjesecima u godini će iznositi oko $31 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$. Najveća potrošnja je u prosječnom danu u veljači i lipnju, dok je najmanja prosječna potrošnja u kolovozu.

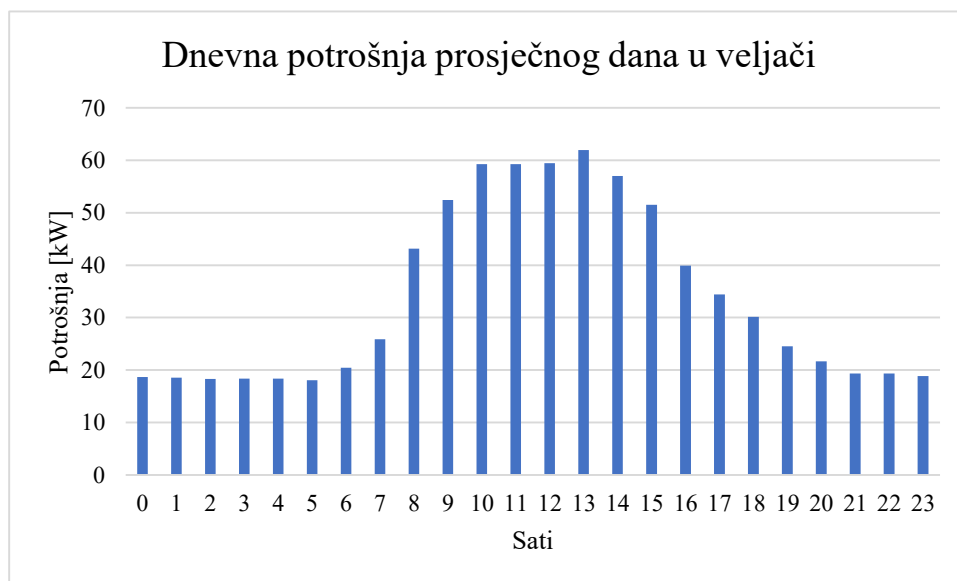


Slika 4.6. : Dijagram prosječne dnevne potrošnje električne energije po mjesecima

Na slici 4.6. se nalazi grafički prikaz rezultata mjernih podataka iz tablice 4.6. iz kojih se vidi profil potrošnje električne energije po mjesecima.

Tablica 4.7. : Potrošnja električne energije prosječnog dana u veljači

Sati	Prosječna potrošnja po satima u veljači [kW]
0	18,68
1	18,52
2	18,29
3	18,38
4	18,37
5	18,03
6	20,42
7	25,87
8	43,14
9	52,41
10	59,27
11	59,30
12	59,43
13	61,98
14	57,02
15	51,52
16	39,94
17	34,42
18	30,14
19	24,50
20	21,68
21	19,37
22	19,33
23	18,88

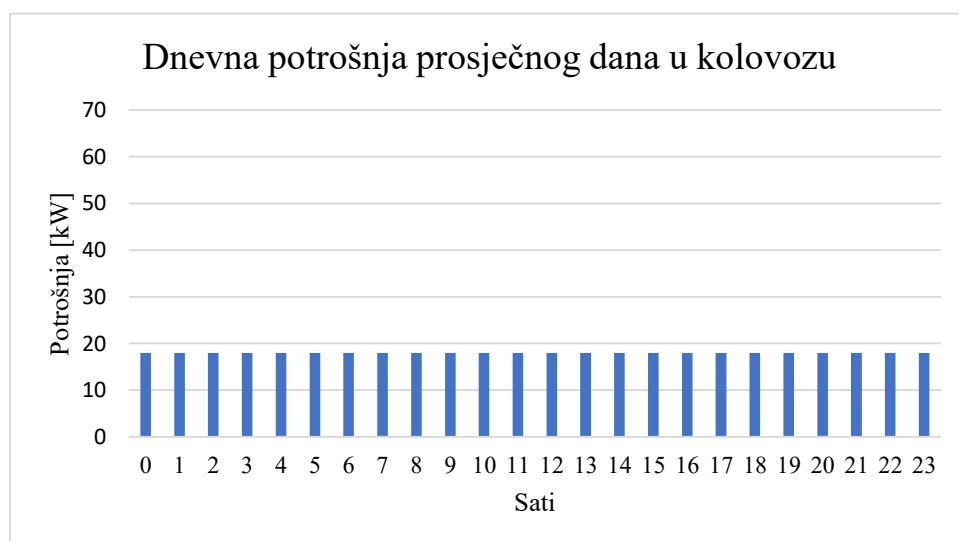


Slika 4.7. : Dnevna potrošnja električne energije prosječnog dana u veljači

U tablici 4.7. te na slici 4.7. su prikazani mjerni podaci potrošnje električne energije za prosječan dan u veljači.

Tablica 4.8. : Dnevna potrošnja električne energije prosječnog dana u kolovozu

Sati	Prosječna potrošnja po satima u kolovozu [kW]
0	18,00
1	18,00
2	18,00
3	18,00
4	18,00
5	18,00
6	18,00
7	18,00
8	18,00
9	18,00
10	18,00
11	18,00
12	18,00
13	18,00
14	18,00
15	18,00
16	18,00
17	18,00
18	18,00
19	18,00
20	18,00
21	18,00
22	18,00
23	18,00



Slika 4.8. : Dnevna potrošnja električne energije prosječnog dana u kolovozu

U tablici 4.8. te na slici 4.8. su prikazani mjerni podaci potrošnje električne energije za prosječan dan u kolovozu.

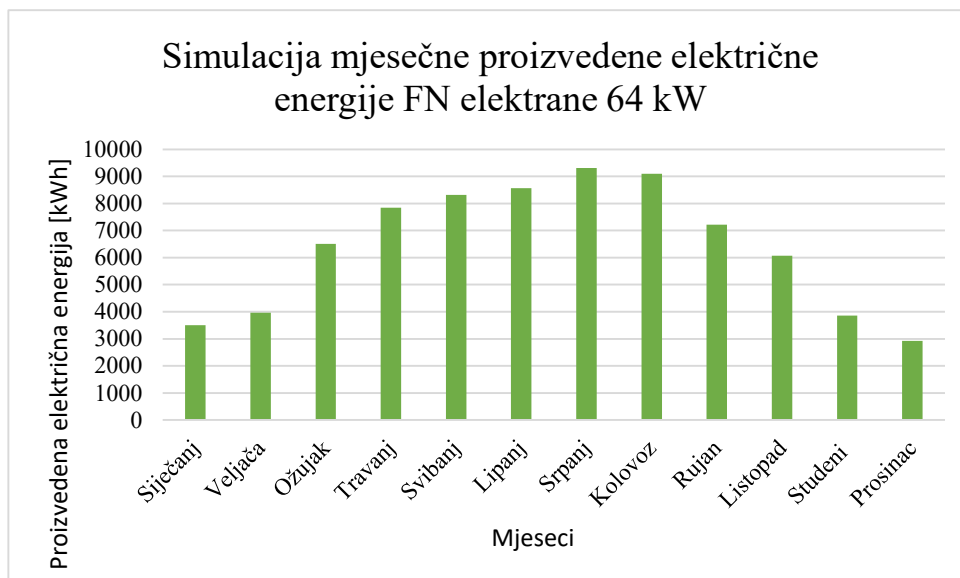
Putem PVGIS alata za izračun mogućnosti mjesečne proizvodnje električne energije putem fotonaponske elektrane instalirane snage 64 kW na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu dobili su se pretpostavljeni rezultati proizvodnje uz pretpostavku da je materijal od kojeg je sačinjena fotonaponska elektrana kristalni silicij, sistemskih gubitaka od 14% te kuta postavljanja fotonaponskih modula od 35°.

Tablica 4.9: Izlazne vrijednosti simulacije proizvodnje električne energije FN elektrane putem PVGIS alata

Kut nagiba [°]	35°
Kut azimuta [°]	0°
Godišnja proizvedena energija [kWh]	77182,7 kWh
Godišnje sunčevo zračenje [$\frac{kWh}{m^2}$]	1555,59 $\frac{kWh}{m^2}$
Varijabilnost iz godine u godinu [kWh]	3710,50 kWh
Gubitci zbog upadnog kuta [%]	-2,79 %
Spektralni učinci [%]	1,18 %
Temperatura i nisko zračenje [%]	-8,35 %
Potpuni gubitci [%]	-22,47 %

Tablica 4.10. : Simulacija mjesečne proizvodnje električne energije FN elektrane putem PVGIS alata

Mjesec	Proizvedena električna energija [kWh]
Siječanj	3507,79
Veljača	3959,19
Ožujak	6503,08
Travanj	7847,00
Svibanj	8315,27
Lipanj	8564,67
Srpanj	9311,55
Kolovoz	9101,39
Rujan	7216,91
Listopad	6075,52
Studeni	3855,05
Prosinac	2925,03



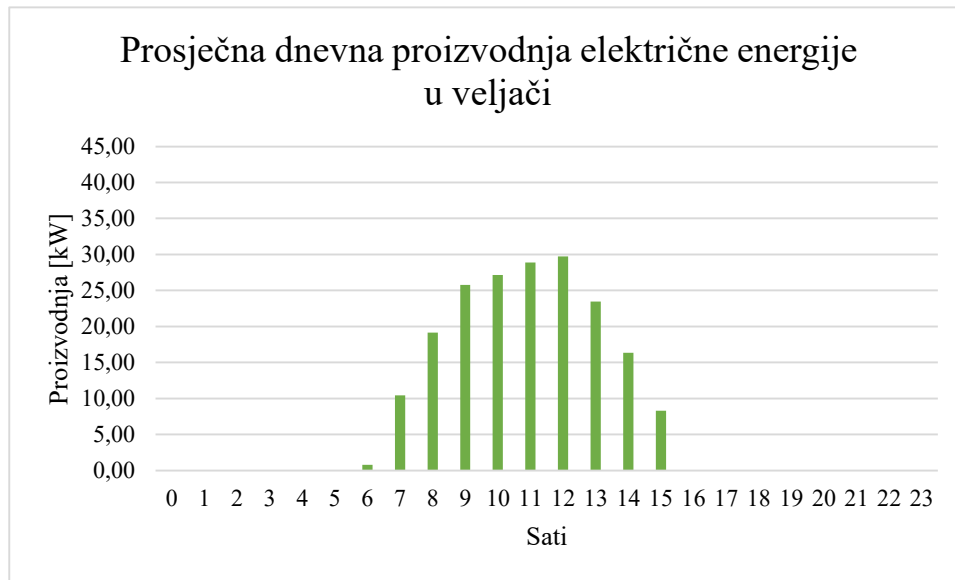
Slika 4.9. : Simulacija mjesečne proizvedene električne energije FN elektrane 64 kW putem PVGIS alata

U tablicama 4.9. i 4.10. te na slici 4.9. su prikazani dobiveni simulacijski rezultati proizvodnje električne energije putem fotonaponske elektrane od 64 kW putem alata za simulaciju PVGIS.

Tablica 4.11. : Prosječna dnevna proizvodnja električne energije po mjesecima i proizvodnja električne energije prosječnog dana u godini

Vrijeme/ Mjesec	Siječanj [kW]	Veljača [kW]	Ožujak [kW]	Travanj [kW]	Svibanj [kW]	Lipanj [kW]	Srpanj [kW]	Kolovoz [kW]	Rujan [kW]	Listopad [kW]	Studeni [kW]	Prosinac [kW]	Prosječan dan u godini [kW]
0:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4:10	0,00	0,00	0,00	0,02	0,62	1,49	1,11	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28
5:10	0,00	0,00	0,11	3,35	4,02	4,90	4,52	3,19	1,60	0,06	0,00	0,00	1,81
6:10	0,00	0,81	6,19	14,69	10,98	13,21	13,14	12,09	9,03	5,26	0,72	0,00	7,18
7:10	6,81	10,45	15,69	26,41	18,07	20,14	23,08	21,81	19,90	13,63	5,61	2,73	15,36
8:10	15,82	19,17	24,83	36,27	26,55	28,34	31,10	31,35	30,06	19,48	11,31	6,45	23,39
9:10	21,83	25,80	28,08	42,61	30,38	32,66	38,33	36,68	36,31	24,18	13,26	7,65	28,15
10:10	24,24	27,15	29,46	46,05	33,60	32,62	38,92	40,02	37,71	29,22	14,09	7,94	30,09
11:10	25,47	28,91	28,22	46,08	34,36	34,53	39,45	37,64	37,55	29,83	14,28	7,77	30,34
12:10	23,66	29,71	25,52	43,65	27,77	33,40	36,18	33,08	33,44	24,84	12,43	9,19	27,74
13:10	19,33	23,49	22,53	37,69	27,03	24,57	30,18	32,13	27,79	19,14	10,39	7,24	23,46
14:10	13,71	16,36	18,64	27,97	17,75	20,85	23,70	23,12	18,74	12,48	5,45	2,76	16,79
15:10	1,95	8,30	10,37	18,39	13,25	14,36	17,69	14,61	10,57	4,38	0,14	0,00	9,50
16:10	0,00	0,03	3,94	6,16	6,13	6,53	7,99	5,77	2,31	0,00	0,00	0,00	3,24
17:10	0,00	0,00	0,00	0,28	1,48	2,21	2,16	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58
18:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
19:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

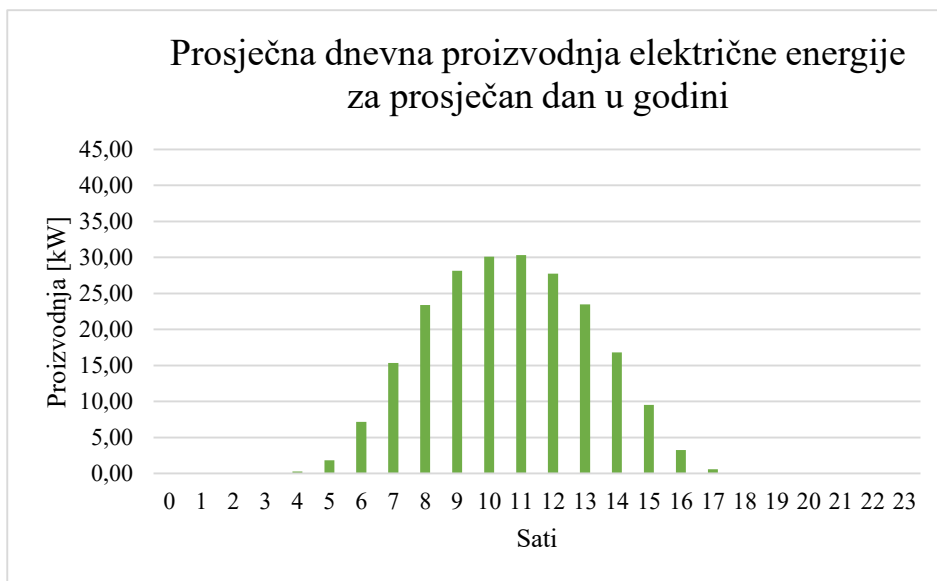
U tablici 4.11. su prikazani dobiveni rezultati proizvodnje električne energije u prosječnom danu svakog mjeseca u godini i prosječnog dana u godini. Rezultati su dobiveni pomoću simulacije u PVGIS-u u kojemu su se dobila simulirana mjerenja svakih sat vremena u godini, koja su iskorištena kako bi se pomoću srednje vrijednosti dobila prosječna proizvodnja električne energije za svaki sat u svakom mjesecu u godini. Pomoću srednjih vrijednosti proizvodnje svakoga sata u svakome mjesecu je određen profil prosječnog dana u godini.



Slika 4.10. : Prosječna dnevna proizvodnja električne energije u veljači



Slika 4.11. : Prosječna dnevna proizvodnja električne energije u kolovožu



Slika 4.12. : Prosječna dnevna proizvodnja električne energije za prosječan dan u godini

Na slikama 4.10. , 4.11. i 4.12. su prikazani profili proizvodnje električne energije, odnosno količina proizvedene električne energije iz FN elektrane 64 kW za prosječan dan u veljači, kolovozu i prosječan dan u godini koji su ujedno i tema ovoga proračuna.

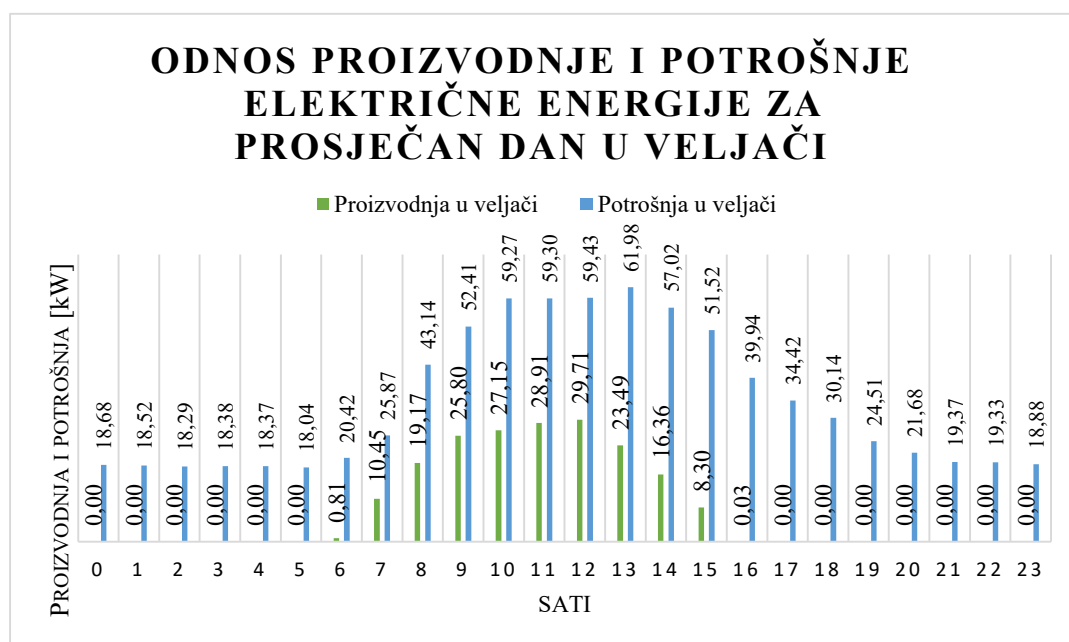
Idući korak je usporedba proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u veljači, kolovozu i prosječan dan u godini, te iščitavanje mogućnosti proizvodnje zelenog vodika putem PEM elektrolizatora iz viškova električne energije iz FN elektrane.

Nakon određivanja mogućnosti proizvodnje zelenog vodika iz viškova električne energije, odrediti će se količina mogućeg proizvedenog vodika iz PEM elektrolizatora, a to su C10 sustav za proizvodnju vodika, H2m generator, H4m generator te H6m generator čije su tehničke specifikacije i opis dani u potpoglavlju 4.1.

Konačni cilj je odrediti optimalan i najučinkovitiji sustav od navedena četiri koji može proizvoditi što više zelenog vodika iz viškova električne energije iz FN elektrane.

Tablica 4.12. : Odnos proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u veljači

Vrijeme/Mjesec	Proizvodnja u veljači [kW]	Potrošnja u veljači [kW]	Proizvodnja - potrošnja [kW]
0:10	0,00	18,68	-18,68
1:10	0,00	18,52	-18,52
2:10	0,00	18,29	-18,29
3:10	0,00	18,38	-18,38
4:10	0,00	18,37	-18,37
5:10	0,00	18,04	-18,04
6:10	0,81	20,42	-19,62
7:10	10,45	25,87	-15,42
8:10	19,17	43,14	-23,96
9:10	25,80	52,41	-26,62
10:10	27,15	59,27	-32,12
11:10	28,91	59,30	-30,39
12:10	29,71	59,43	-29,72
13:10	23,49	61,98	-38,50
14:10	16,36	57,02	-40,66
15:10	8,30	51,52	-43,22
16:10	0,03	39,94	-39,91
17:10	0,00	34,42	-34,42
18:10	0,00	30,14	-30,14
19:10	0,00	24,51	-24,51
20:10	0,00	21,68	-21,68
21:10	0,00	19,37	-19,37
22:10	0,00	19,33	-19,33
23:10	0,00	18,88	-18,88



Slika 4.13. : Odnos proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u veljači

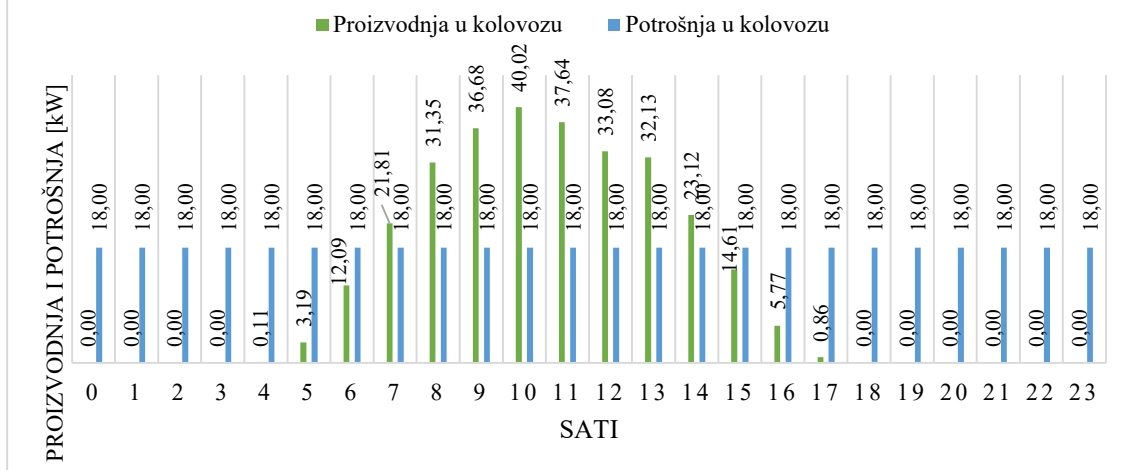
Na slici 4.13. i u tablici 4.12. prikazan je odnos proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u veljači, te se iz tablice, a i iz dijagrama zaključuje kako u veljači nema viškova proizvedene električne energije iz FN elektrane što je i očekivano za zimsko razdoblje. Na osnovu toga se zaključuje kako PEM elektrolizator neće raditi te proizvoditi zeleni vodik, budući da nema viškova električne energije koji bi mu služili kao izvor električne energije za proces elektrolize.

Tablica 4.13. : Odnos proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u kolovozu

Vrijeme/Mjesec	Proizvodnja u kolovozu [kW]	Potrošnja u kolovozu [kW]	Proizvodnja - potrošnja [kW]
0:10	0,00	18,00	-18,00
1:10	0,00	18,00	-18,00
2:10	0,00	18,00	-18,00
3:10	0,00	18,00	-18,00
4:10	0,11	18,00	-17,89
5:10	3,19	18,00	-14,81
6:10	12,09	18,00	-5,91
7:10	21,81	18,00	3,81
8:10	31,35	18,00	13,35
9:10	36,68	18,00	18,68
10:10	40,02	18,00	22,02
11:10	37,64	18,00	19,64
12:10	33,08	18,00	15,08
13:10	32,13	18,00	14,13
14:10	23,12	18,00	5,12
15:10	14,61	18,00	-3,39
16:10	5,77	18,00	-12,23
17:10	0,86	18,00	-17,14
18:10	0,00	18,00	-18,00
19:10	0,00	18,00	-18,00
20:10	0,00	18,00	-18,00
21:10	0,00	18,00	-18,00
22:10	0,00	18,00	-18,00
23:10	0,00	18,00	-18,00

U tablici 4.13. je prikazan odnos između proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u kolovozu. Za razliku od prosječnog dana u veljači, u ovome slučaju postoje viškovi električne energije u 8 od ukupno 24 sati u danu, što je i očekivanu budući da se radi o ljetnom mjesecu u kojemu FN elektrana daje puno veće iznose električne energije u odnosu na zimske mjesec.

ODNOS PROIZVODNJE I POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA PROSJEČAN DAN U KOLOVOZU



Slika 4.14. : Odnos proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u kolovozu

Na slici 4.14. je prikazan odnos proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u kolovozu, te se iz slike zaključuje kako u ovome slučaju postoji mogućnost proizvodnje zelenog vodika iz PEM elektrolizatora.

Pretpostavka je da će PEM elektrolizator proizvoditi zeleni vodik u svakome satu u kojemu postoji višak električne energije, ukoliko taj višak električne energije nije dovoljan za njegov rad, ostatak električne energije će se preuzeti iz mreže.

Prva teorijska pretpostavka je da je za 1 kg vodika potrebno na elektrolizu utrošiti 9 L vode.

Druga teorijska pretpostavka je da 1 kg vodika daje 33,3 kWh korisne električne energije.

Tablica 4.14. : Energetske potrebe PEM elektrolizatora

Energetske potrebe PEM elektrolizatora	C10	H2m	H4m	H6m
	sustav			
Stopa potrošnje vode [$\frac{L}{h}$]	9,00	1,83	3,66	5,50
Protok [$\frac{Nm^3}{h}$]	10,00	2,00	4,00	6,00
Stopa potrošnje električne energije [$\frac{kWh}{Nm^3}$]	6,20	7,30	7,00	6,80
Ukupna potrošnja električne energije [$\frac{kWh}{h}$]	62,00	14,60	28,00	40,80

U tablici 4.14. su prikazane energetske potrebe sva četiri tipa PEM elektrolizatora koji su opisani u potpoglavlju 4.1. te su za potrebe tablice 4.14. su uzete njihove tehničke specifikacije iz tablica 4.1. , 4.2. , 4.3. i 4.4.

Tablica 4.15. : Proizvodnja zelenog vodika putem PEM elektrolizatora C10

Vrijeme/ proizvodnja putem C10 sustava	Viškovi električne energije iz FN-elektrane [$\frac{kWh}{h}$]	Ukupna potrošnja električne energije C10 sustava [$\frac{kWh}{h}$]	Potrebna energija iz mreže [$\frac{kWh}{h}$]	Proizvodnja zelenog vodika [kg]	Moguća električna energija iz vodika [$\frac{kWh}{h}$]
7:10	3,81	62,00	-58,19	1,00	33,33
8:10	13,35	62,00	-48,65	1,00	33,33
9:10	18,68	62,00	-43,32	1,00	33,33
10:10	22,02	62,00	-39,98	1,00	33,33
11:10	19,64	62,00	-42,36	1,00	33,33
12:10	15,08	62,00	-46,92	1,00	33,33
13:10	14,13	62,00	-47,87	1,00	33,33
14:10	5,12	62,00	-56,88	1,00	33,33

U tablici 4.15. se nalazi mogućnost proizvodnje zelenog vodika izraženog u kg te u korisnoj električnoj energiji u $\frac{kWh}{h}$ putem teorijske pretpostavke da se je za 1 kg vodika potrebno 9 L vode, a u C10 sustavu stopa potrošnje vode čini $9 \frac{L}{h}$ odnosno u sat vremena se proizvede točno 1 kg vodika putem ovoga sustava, što je vidljivo u tablici 4.14. Koristeći drugu teorijsku pretpostavku izračunata je moguća korisna električna energija iz vodika budući da je 1 kg vodika ekvivalentan oko 33,33 kWh korisne električne energije. No većina električne energije koja je potrebna za rad elektrolizatora dolazi iz mreže, a ne iz viškova električne energije iz FN elektrane što je bio cilj. Na osnovnu svega navedenoga se zaključuje da je C10 sustav za proizvodnju vodika prevelik za promatranu zgradu, te da je neisplativ za integraciju, budući da je cilj pokriti energetske potrebe proizvodnje iz viškova električne energije FN elektrane.

Tablica 4.16. : Proizvodnja zelenog vodika putem PEM elektrolizatora H2m

Vrijeme/ proizvodnja putem H2 sustava	Viškovi električne energije iz FN-elektrane [$\frac{kWh}{h}$]	Ukupna potrošnja električne energije H2 sustava [$\frac{kWh}{h}$]	Potrebna energija iz mreže [$\frac{kWh}{h}$]	Proizvodnja zelenog vodika [kg]	Moguća električna energija iz vodika [$\frac{kWh}{h}$]
7:10	3,81	14,60	10,79	0,20	6,67
8:10	13,35	14,60	1,25	0,20	6,67
9:10	18,68	14,60	0,00	0,20	6,67
10:10	22,02	14,60	0,00	0,20	6,67
11:10	19,64	14,60	0,00	0,20	6,67
12:10	15,08	14,60	0,00	0,20	6,67
13:10	14,13	14,60	0,47	0,20	6,67
14:10	5,12	14,60	9,48	0,20	6,67

U tablici 4.16. se nalazi prikaz mogućnosti proizvodnje zelenog vodika putem H2m elektrolizatora. Postupak i metode izračuna je jednak kao i za elektrolizator C10, koji je prikazan u tablici 4.15. i opisan ispod tablice. H2m elektrolizator u ovome slučaju radi uglavnom iz viškova električne energije iz FN elektrane što i je cilj. Možuća količina proizvodnje vodika iznosi 0,2 kg u svakome satu u kojemu radi elektrolizator što daje $6,67 \frac{kWh}{h}$ korisne električne energije. Iz svega navedenog se zaključuje da je H2m elektrolizator prikladan za promatranu zgradu budući da viškovi električne energije iz FN elektrane pokrivaju količinu električne energije koja je potrebna elektrolizatoru za rad u 50% slučajeva kada elektrolizator radi, dok u ostalim slučajevima se uzima električna energija iz mreže, ali u maloj količini. Kada se uzme u obzir i vrijednost električne energije u dobivenom vodik, elektrolizator H2m je vrlo isplativ na promatranj zgradi, budući kada se zbroje vrijednosti električne energije iz vodika i FN elektrane i oduzmu od vrijednosti električne energije iz mreže i energije potrebne za rad elektrolizatora, ostane 26,64 kW „zeleno električne energije“

Tablica 4.17. : Proizvodnja zelenog vodika putem PEM elektrolizatora H4m

Vrijeme/ proizvodnja putem H4 sustava	Viškovi električne energije iz FN-elektrane $\left[\frac{kWh}{h}\right]$	Ukupna potrošnja električne energije H4 sustava $\left[\frac{kWh}{h}\right]$	Potrebna energija iz mreže $\left[\frac{kWh}{h}\right]$	Proizvodnja zelenog vodika [kg]	Moguća električna energija iz vodika $\left[\frac{kWh}{h}\right]$
7:10	3,81	28,00	24,19	0,41	13,67
8:10	13,35	28,00	14,65	0,41	13,67
9:10	18,68	28,00	9,32	0,41	13,67
10:10	22,02	28,00	5,98	0,41	13,67
11:10	19,64	28,00	8,36	0,41	13,67
12:10	15,08	28,00	12,92	0,41	13,67
13:10	14,13	28,00	13,87	0,41	13,67
14:10	5,12	28,00	22,88	0,41	13,67

U tablici 4.17. se nalazi prikaz mogućnosti proizvodnje zelenog vodika putem H4m elektrolizatora. Postupak i metode izračuna je jednak kao i za elektrolizator C10, koji je prikazan u tablici 4.15. i opisan ispod tablice. U ovome slučaju elektrolizator H4m radi hibridno, odnosno podjednako koristi viškove električne energije iz FN elektrane i električnu energiju iz mreže. Ovaj elektrolizator proizvodi 0,41 kg vodika u svakome satu u kojemu radi, što je ekvivalentno $13,67 \frac{kWh}{h}$ korisne električne energije. Kada se uzme u obzir vrijednost električne energije u dobivenom vodik, H4m elektrolizator nije isplativ budući da kada se zbroje vrijednosti iz viškova električne energije iz FN elektrane te vrijednosti električne energije u vodik i oduzmu od energije koja je potrebna elektrolizatoru za rad i preuzete energije iz mreže, ipak je veća količina energije koja je potrebna za rad i koja se uzima iz mreže za $114,98 \frac{kWh}{h}$.

Tablica 4.18. : Proizvodnja zelenog vodika putem PEM elektrolizatora H6m

Vrijeme/ proizvodnja putem H6 sustava	Viškovi električne energije iz FN-elektrane $\left[\frac{kWh}{h}\right]$	Ukupna potrošnja električne energije H6 sustava $\left[\frac{kWh}{h}\right]$	Potrebna energija iz mreže $\left[\frac{kWh}{h}\right]$	Proizvodnja zelenog vodika [kg]	Moguća električna energija iz vodika $\left[\frac{kWh}{h}\right]$
7:10	3,81	40,80	36,99	0,61	20,33
8:10	13,35	40,80	27,45	0,61	20,33
9:10	18,68	40,80	22,12	0,61	20,33
10:10	22,02	40,80	18,78	0,61	20,33
11:10	19,64	40,80	21,16	0,61	20,33
12:10	15,08	40,80	25,72	0,61	20,33
13:10	14,13	40,80	26,67	0,61	20,33
14:10	5,12	40,80	35,68	0,61	20,33

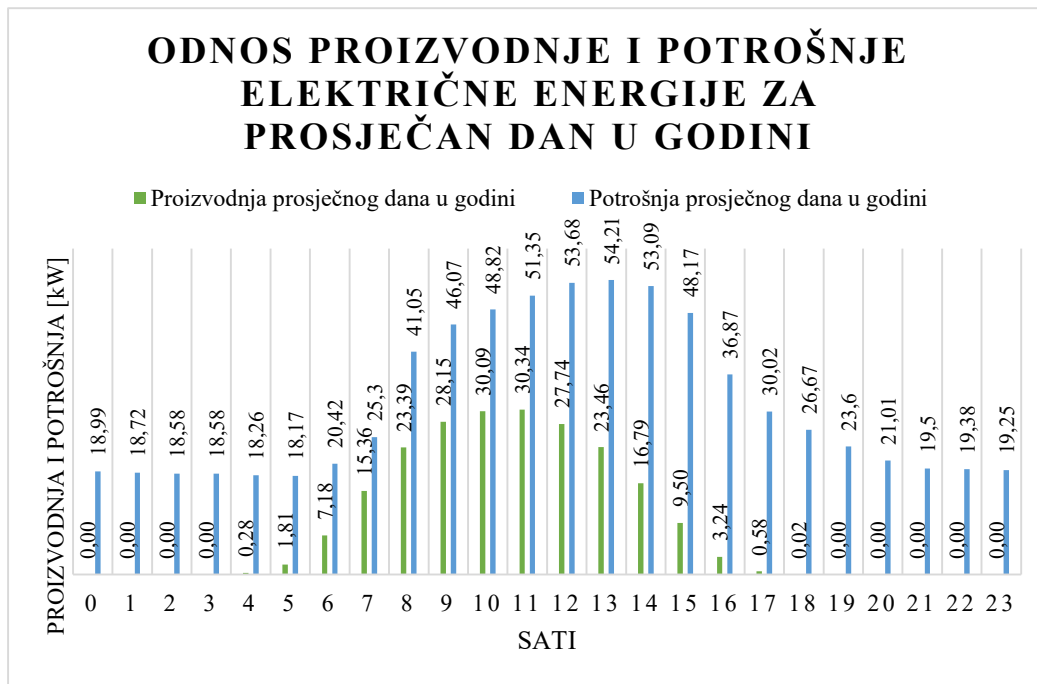
U tablici 4.18. se nalazi prikaz mogućnosti proizvodnje zelenog vodika putem H6m elektrolizatora. Postupak i metode izračuna je jednak kao i za elektrolizator C10, koji je prikazan u tablici 4.15. i opisan ispod tablice. U ovome slučaju elektrolizator H6m većinu svojih energetske potrebe zadovoljava električnom energijom iz mreže te se iz toga zaključuje da je ovaj sustav kao i sustav C10 prevelik za promatranu zgradu. H6m elektrolizator ima mogućnost proizvodnje 0,61 kg zelenog vodika u svakome radnom satu što je ekvivalentno $20,33 \frac{kWh}{h}$ korisne električne energije.

Nakon promatranja četiri navedena slučaje iz svega navedenog se zaključuje kako je elektrolizator H2m najprikladniji za proizvodnju zelenog vodika na Strojarskom fakultetu u Slavanskom Brodu u kolovozu. Ostala tri elektrolizatora su prevelika za promatranu potrošnju zgrade i zahtijevaju više električne energije od viškova električne energije iz instalirane FN elektrane.

Treći promatrani slučaj je slučaj za prosječni dan u godini.

Tablica 4.19. : Odnos proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u godini

Vrijeme/Mjesec	Proizvodnja u prosječnom danu u godini [kW]	Potrošnja u prosječnom danu u godini [kW]	Proizvodnja - potrošnja [kW]
0:10	0,00	18,99	-18,99
1:10	0,00	18,72	-18,72
2:10	0,00	18,58	-18,58
3:10	0,00	18,58	-18,58
4:10	0,28	18,26	-17,98
5:10	1,81	18,17	-16,36
6:10	7,18	20,42	-13,24
7:10	15,36	25,3	-9,94
8:10	23,39	41,05	-17,66
9:10	28,15	46,07	-17,92
10:10	30,09	48,82	-18,73
11:10	30,34	51,35	-21,01
12:10	27,74	53,68	-25,94
13:10	23,46	54,21	-30,75
14:10	16,79	53,09	-36,30
15:10	9,50	48,17	-38,67
16:10	3,24	36,87	-33,63
17:10	0,58	30,02	-29,44
18:10	0,02	26,67	-26,65
19:10	0,00	23,6	-23,60
20:10	0,00	21,01	-21,01
21:10	0,00	19,5	-19,50
22:10	0,00	19,38	-19,38
23:10	0,00	19,25	-19,25



Slika 4.15. : Odnos proizvodnje i potrošnje električne energije za prosječan dan u godini

Iz tablice 4.19. i slike 4.15. je vidljivo kako je potrošnja veća od proizvodnje za prosječni dan u godini u svakome satu, i iz toga se zaključuje kako elektrolizator za proizvodnju zelenog vodika neće raditi u prosječnom danu u godini budući da nema viškova električne energije iz FN elektrane.

Iz sva tri obrađena slučaja i proračuna se zaključuje kako će se proizvodnja zelenog vodika u zgradi Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu događati samo u ljetnim mjesecima kada FN elektrana daje viškove električne energije, dok u zimskim mjesecima neće raditi kao ni u prosječnom danu u godini.

U slijedećoj tablici je prikazana proizvodnja i potrošnja električne energije za prosječni dan u svakome mjesecu u razdoblju od 7:10 do 14:10, budući da bi prema proračunu za kolovoz tada trebalo biti najviše proizvedene električne energije iz FN elektrane. Pretpostaviti će se da će elektrolizator raditi samo u satima u kojima postoji višak električne energije. Također u tablici se nalazi i odlučivanje o radu elektrolizatora. Promatran je slučaj za rad s H2m elektrolizatorom, budući da je iz primjera u kolovozu H2m elektrolizator izabran kao najbolje rješenje za integraciju u javnoj zgradi Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu, temeljeno na potrošnji električne energije promatrane zgrade.

Tablica 4.20. : Pregled rada elektrolizatora po mjesecima u godini

Mjeseci/vrijednosti	Proizvodnja [kW]	Potrošnja [kW]	Elektrolizator [kW]	Postotak iz FN [%]	Rad elektrolizatora	Proizvedeni Vodik [kg]	Električna energija u vodik [kW]
Siječanj	150,88	396,66	116,80	29,39%	NE	0,00	0,00
Veljača	181,03	418,42	116,80	33,82%	NE	0,00	0,00
Ožujak	192,98	396,66	116,80	37,58%	NE	0,00	0,00
Travanj	306,71	396,66	116,80	59,73%	DA	1,6	53,33
Svibanj	215,51	396,66	116,80	41,97%	DA	1,6	53,33
Lipanj	227,10	418,42	116,80	42,43%	DA	1,6	53,33
Srpanj	260,94	329,00	116,80	58,53%	DA	1,6	53,33
Kolovoz	255,84	144,00	116,80	98,10%	DA	1,6	53,33
Rujan	241,51	396,66	116,80	47,04%	DA	1,6	53,33
Listopad	172,81	396,66	116,80	33,66%	NE	0,00	0,00
Studenj	86,83	396,66	116,80	16,91%	NE	0,00	0,00
Prosinac	51,72	396,66	116,80	10,07%	NE	0,00	0,00

U tablici 4.20. se nalaze podaci o proizvodnji električne energije iz FN elektrane za prosječni dan u svakome mjesecu u razdoblju od 7:10 do 14:10, koji su međusobno zbrojeni i nalaze se u stupcu proizvodnja, analogno je kreiran i stupac potrošnja u kojemu su zbrojene potrošnje električne energije u navedenim satima za prosječan dan u svakome mjesecu. U stupcu elektrolizator su prikazane potrebe za električnom energijom H2m elektrolizatora za rad u vremenu od 7:10 do 14:10. U stupcu postotak iz FN prikazan je postotak zadovoljenja ukupne potrošnje električne energije (potrošnja + elektrolizator) proizvedenom električnom energijom iz FN elektrane. U stupcu rad elektrolizatora je prikazana odluka o radu elektrolizatora po mjesecima u vremenu od 7:10-14:10. Uvjet koji je odlučivao o radu je minimalno 40% zadovoljenja potreba za električnom energijom iz FN elektrane. U stupcu proizvedeni vodik je prikazana proizvodnja vodika za prosječni dan u svakome mjesecu, kada elektrolizator radi u vremenu od 7:10 do 14:10, te je proizvodnja ista za svaki prosječni dan u mjesecu u kojemu elektrolizator radi i iznosi 1,6 kg proizvedenog vodika u radu od osam sati. U stupcu električna energija u vodik je prikazana vrijednost proizvedenog vodika u korisnoj električnoj energiji, te se dobije za prosječne dane u mjesecima u kojima elektrolizator radi 53,33 kW korisne električne energije u radu elektrolizatora od 7:10 do 14:10.

Na temelju svega navedenog se zaključuje kako će elektrolizator H2m raditi za prosječne dane u travnju, svibnju, lipnju, srpnju, kolovozu te rujnu u vremenu od 7:10 do 14:10, dok u ostalim mjesecima neće raditi budući da nema viškova električne energije iz FN-elektrane.

5. ZAKLJUČAK

Vodik je plin bez mirisa pri standardnim uvjetima. Vodik proizveden iz različitih izvora služi kao energent te se koristi za proizvodnju, prijenos, distribuciju te skladištenje energije. Podjela vodika prema načinu njegova dobivanja se izražava pomoću boja. Najpoznatije „boje“ vodika su: sivi, plavi, tirkizni i zeleni vodik. Zeleni vodik je vrlo interesantan budući da je to vodik koji se proizvodi iz obnovljivih izvora energije te se njegovom proizvodnjom ne zagađuje okoliš s ugljikovim dioksidom. Prema trenutno dostupnim tehnologijama postoje tri procesa proizvodnje zelenog vodika, a to su: elektroliza vode, parna reformacija bioplina te toplinska konverzija ili rasplinjavanje organskih tvari i otpada. Trenutno je najrazrađeniji i najviše istražen proces elektrolize vode, te se uz taj proces veže najviše trenutno dostupnih tehnologija za proizvodnju zelenog vodika. Sustavi u kojima se odvija proces elektrolize su elektrolizatori i prema trenutnim raspodjelama postoje četiri osnovna tipa elektrolizatora a to su: alkalni elektrolizator, elektrolizator za protone izmjenjivačkom membranom, elektrolizator s krutim oksidima i elektrolizator za anione s izmjenjivačkom membranom.

Postoji tri osnovna tipa skladištenja vodika, a to su: skladištenje u spremnicima pod visokim tlakom, skladištenje u čvrstim materijalima (metalni i kemijski hidridi) te geološko skladištenje vodika (slane špilje i iscrpljene bušotine nafte i prirodnog plina).

Prijenos i distribucija vodika se najčešće odvija putem cjevovoda, kamionima, brodovima i distribucija na vodikovim postajama. Cjevovodi su najčešći način prijenosa i distribucije vodika budući da se vodik već počeo pojavljivati u određenom postotku u mješavini s prirodnim plinom koji se koristi za grijanje kućanstava. Velike količine vodika se također mogu prenositi brodovima i kamionima budući da osim u svrhu grijanja vodik se može koristiti i u svrhu goriva, pa samim time vodikove postaje će biti najčešći oblik distribucije kada na tržište izađu komercijalna vozila s pogonom na vodik.

Zeleni vodik se susreće i s brojnim izazovima na svome putu, a najčešći i najznačajniji izazov je njegova cijena, budući da je trenutno proizvodnja zelenog vodika višestruko skuplja od proizvodnje sivoga vodika. Stoga je važno da zeleni vodik kao energent dobije razumijevanje i prostora za napredak u smislu tehnologija i u smislu poticaja kako bi se otvorilo što više proizvodnih pogona zelenog vodika i time olakšalo implementaciju u energetske i prometni sektor. Zeleni vodik ima puno prostora za napredak u razvoju trenutnih tehnologija u smislu uvođenja novih materijala u tehnologije i smanjenju dimenzija membrana na elektrolizatorima i povećanju učinkovitosti procesa proizvodnje zelenog vodika.

Republika Hrvatska ima potencijala za razvoj proizvodnih pogona zelenog vodika i donesena je i energetska strategija za vodik do 2030. odnosno 2050. Trenutno najveći projekt koji se spominje je „Dolina vodika Sjeverni Jadran“ u kojoj bi sudjelovali osim Republike Hrvatske i Slovenija te Italija i ta bi dolina činila jednu od 36 dolina koje su u planu za integriranje.

U praktičnom dijelu su se usporedili trenutno postojeći PEM elektrolizatori za proizvodnju zelenog vodika, kao i njihove tehničke specifikacije. Također, praktični dio se sastojao i od proračuna u kojemu se računala mogućnost proizvodnje zelenog vodika putem PEM elektrolizatora iz viška električne energije iz FN elektrane na javnoj zgradi Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu. Iz proračuna se zaključilo kako će elektrolizator raditi i proizvoditi zeleni vodik kada postoje viškovi električne energije iz FN elektrane. Napravljen je proračun za prosječni dan u veljači, kolovozu i za prosječni dan u svakom mjesecu. Na osnovu proračuna se zaključilo kako elektrolizator neće raditi za prosječan dan u veljači i za prosječan dan u godini budući da su rezultati pokazali da tada nema viškova električne energije iz FN elektrane. Za prosječan dan u kolovozu će elektrolizator raditi i proizvoditi zeleni vodik 8 sati na dan, budući da ima toliko viškova električne energije iz FN elektrane, te je kao optimalno rješenje iz proračuna izabran H2m elektrolizator za proizvodnju električne energije u javnoj zgradi odgovarajuće potrošnje. Na temelju proračuna se zaključilo kako će elektrolizator H2m raditi i za prosječne dane u travnju, svibnju, lipnju, srpnju, kolovozu te rujnu u vremenu od 7:10 do 14:10, dok u ostalim mjesecima neće raditi budući da nema viškova električne energije iz FN-elektrane.

Literatura

- [1] Nelson, Laura, Lin, J., et al., Green Hydrogen Guidebook, Green Hydrogen Coalition, August 2020. [Education — GREEN HYDROGEN COALITION \(ghcoalition.org\)](https://www.ghcoalition.org/education) (20.4.2022)
- [2] IRENA, Green Hydrogen Certification <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/The-Green-Hydrogen-Certification-Brief> (20.4.2022.)
- [3] A. Kovač, Uloga vodika u energetskej tranziciji, Nafta i plin, Vol 41. No. 170. – 171., 2022.
- [4] IEA, Global Hydrogen review 2021. , <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> (20.4.2022.)
- [5] IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction> (20.4.2022)
- [6] D. Jovičić, Proizvodnja vodika parnim reformiranjem prirodnog plina s hvatanjem CO_2 putem kemijskog izgaranja u petlji, Goriva i maziva, 55, 3 : 200-213, 2016.
- [7] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methane-steam-reforming> (21.4.2022.)
- [8] IEA, The Future of Hydrogen, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (21.4.2022)
- [9] <https://www.toyota.hr/company/news/2020/new-mirai> (8.5.2022.)
- [10] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_03_40_492.html (10.5.2022.)
- [11] <https://www.fuelcellstore.com/> (10.5.2022.)

SAŽETAK

Zadatak ovog završnog rada je usporediti razvoj trenutno dostupnih tehnologija zelenog vodika. U radu je definiran pojam zeleni vodik, navedeni su procesi proizvodnje, prijenosa i skladištenja zelenog vodika, te opisane tehnologije koje se trenutno koriste. Također su opisane mogućnosti korištenja zelenog vodika kao energenta u raznim područjima kao što su grijanje, automobilska industrija, proizvodnja električne energije. Navedeni su izazovi te prostor za napredak trenutno raspoloživih tehnologija zelenog vodika, te je dan pregled strategije Republike Hrvatske za zeleni vodik. U praktičnom dijelu je odrađen proračun proizvodnje zelenog vodika putem elektrolize vode na primjeru javne zgrade Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu, kao i opis te usporedba trenutno dostupnih elektrolizatora za proizvodnju zelenog vodika procesom elektrolize vode.

Ključne riječi: elektrolizator, elektroliza vode, nulta emisija, vodik, zeleni vodik

ABSTRACT

The task of this bachelor's thesis is to compare the development of currently available green hydrogen technologies. In this thesis the term green hydrogen is defined, the processes of production are listed, furthermore the transmission and storage of green hydrogen and the currently used technologies are described. The possibilities of using green hydrogen as an energy source in various areas, such as heating, car industry and electricity generation are also described. Challenges and room for improvement of currently available green hydrogen technologies are listed, and an overview of the strategy of Republic of Croatia for green hydrogen is given. In the practical part of the thesis, the calculation of the production of green hydrogen through water electrolysis was made using the example of public building of the Faculty of Mechanical Engineering in Slavonski Brod, as well as description and comparison of the currently available electrolyzers for the production of green hydrogen through the process of water electrolysis.

Key words: electrolyser, water electrolysis, zero emission, hydrogen, green hydrogen