

Vodik gorivo budućnosti

Biškup, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:117772>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

VODIK GORIVO BUDUĆNOSTI

Završni rad br. 18/MEH/2019

Ivan Biškup

Bjelovar, lipanj 2020.

Zahvala

Zahvaljujem predavačima koji su se na jasan i interesantan način potrudili prenijeti znanje. Također, zahvaljujem mentoru koji mi je puno pomogao vezano uz ovaj završni rad. Najviše od svega želim se zahvaliti svojim roditeljima koji su cijelo vrijeme bili uz mene i poticali me tijekom moga školovanja.



Veleučilište u Bjelovaru
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Biškup Ivan**

Datum: 04.10.2019.

Matični broj: 001524

JMBAG: 0314014765

Kolegij: **OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE**

Naslov rada (tema): **Vodik gorivo budućnosti**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Obnovljivi izvori energije**

Mentor: **Neven Maleš, mag.ing.mech.**

zvanje: **predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. dr.sc. Stjepan Golubić, predsjednik
2. Neven Maleš, mag.ing.mech., mentor
3. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., član

2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 18/MEH/2019

U radu je potrebno:

Opisati načine dobivanja vodika različitim tehnologijama. Na didaktičkoj ploči potrebno je razraditi vježbe dobivanja vodika fotonaponskin sustavom pomoću elektrolizatora.

Opišite PEM Fuel Cell (membranski gorivni članak) kako radi, i na didaktičkoj ploči napravite mjerenja. Opišite kako bi izgledao energetska sustav budućnosti koji bi koristio vodik kao pogonsko gorivo u svim segmentima, kućanstvu, privredi i transportu.

Zadatak uručen: 04.10.2019.

Mentor: **Neven Maleš, mag.ing.mech.**



Sadržaj

1. Uvod	1
2. Uvod u goriva	2
2.1 Energija	3
2.2 Obnovljivi izvori energije	4
2.2.1 Sunčeva energija	4
3. Vodik	7
3.1 Vodik kroz povijest	8
3.2 Svojstva vodika	12
3.2.1 Izotopi	13
3.3 Dobivanje i proizvodnja vodika	15
3.4 Skladištenje i transport vodika	16
3.5 Korištenje vodika	18
4. Elektroliza	19
4.1 Elektroliza vode	20
4.2 Elektrolizator	21
4.2.1 Eksperimenti s elektrolizatorom	22
5. Gorivni članak	26
5.1 PEM gorivni članak	27
5.2 Eksperimenti s gorivim člankom	30
6. Didaktička ploča	33
7. Vodik kao pogonsko gorivo	36
7.1 Princip rada vodikovih vozila i prednosti	38
7.2 Cepelin	41
8. Budućnost vodika	42
9. Zaključak	44
10. Literatura	45
11. Oznake i kratice	47
12. Sažetak	48
13. Abstract	49

1. Uvod

Danas se svuda oko nas uglavnom koriste takve tehnologije koje primjenjuju fosilna goriva da bi se opskrbljivale energijom. Takva goriva (kao što su nafta, plin, ugljen) u velikoj mjeri zagađuju i štete okolišku. Svijet je svjestan povećanja emisije štetnih plinova, te klimatskih promjena koje se događaju. Zbog toga se povećava interes za obnovljivim izvorima energija, a tu dolazi i vodik koji bi mogao postati budućnost.

Cilj ovog završnog rada je približiti pojam vodika i kako, odnosno zašto bi vodik mogao postati gorivo budućnosti. U ovom završnom radu se o vodik, koji je kemijski element, govori kao obnovljivom izvoru energije.

Završnom radu su dodane informacije o gorivu i energiji općenito, te obnovljivim izvorima energije i opisan je jedan od njih kao uvod u ovu temu. Također, opisani su načini dobivanja vodika različitim tehnologijama. Uz odgovarajuće fotografije su opisane razrađene vježbe dobivanja vodika FN sustavom pomoću elektrolizatora na didaktičkoj ploči. Uz to, na didaktičkoj ploči su provedena mjerenja i opisan je PEM Fuel Cell (membranski gorivi članak) kao i njegov rad.

Obnovljivi izvori energije su neograničeni resursi koje daje priroda pa tako se i vodik može dobivati iz vode. Voda (H_2O) se sastoji od dvaju atoma vodika i jednog atoma kisika, te se njihovim razdvajanjem dobiva potreban vodik. Najzaslužniji elektrokemijski uređaji za dobivanje vodika su gorivi članci. Do vodika se dolazi na razne načine, kao što su laboratorijsko dobivanje, industrijsko dobivanje, geološko stvaranje – serpentacija itd.

Vodik kao gorivo ljudi koriste već dugi niz godina za pokretanje raznih vozila, no prvi komercijalni automobil na vodikov pogon je predstavljen 2014. godine, a to bi trebalo postati sve značajnije i raširenije zbog očuvanja okoliša i relativno jeftinog dobivanja goriva kao takvog.

2. Uvod u goriva

Goriva su najzastupljeniji izvor energije u cijelome svijetu, točnije u industriji. Međusobna povezanost svih djelatnosti je nezamisliva bez goriva kao pokretača u proizvodnji ili njegovog korištenja u društvenim djelatnostima. Dva najvažnija sektora ljudske djelatnosti koja koriste gorivo za izvor energije su industrija i promet (gdje pripadaju i razne društvene djelatnosti povezane s transportom). Gorivo je upotrebu pronašlo i u velikim tvorničkim udruženjima i kod pojedinaca. Zbog svakodnevnog korištenja, gorivo je jedan od iznimno važnih resursa za čovječanstvo.

Goriva možemo nazvati tvarima koje izgaranjem, tj. oksidacijom razviju znatnu količinu toplinske energije, koja se kao takva može iskoristiti u različite svrhe. Da bi se za neku tvar moglo reći da je gorivo, ono mora imati dovoljno veliku toplinsku vrijednost, što je omjer topline dobivene izgaranjem te tvari i njezine mase. Važno je da je ta vrijednost postojana i lako je se prenosi, da je dobivanje jeftino i može se dobiti u velikim količinama, te da nema štetne proizvode izgaranja, kao ni one otrovne, a da je temperatura paljenja što niža. U kemijskom smislu, goriva su organske prirode. Prema tome, u njima izgara: ugljik (koji najviše pridonosi toplini), vodik (o njemu ovisi zapaljivost goriva) i sumpor (pridonosi toplini, no smatra se štetnim).

S druge strane imamo goriva čija svrha izgaranja nije da se stvori toplina. Takva goriva su motorna goriva i njihova se kemijska energija iskorištava za pretvorbu u mehanički rad. Motorna goriva služe za pokretanje klipnih motora s unutrašnjim sagorijevanjem (razna vozila). U goriva, kojima je cilj pokretanje, ubrajamo i mlazna, nuklearna i raketna goriva.

Podjela goriva prema:

- vremenu postanka: fosilna
- agregatnom stanju: tekuća, plinovita, čvrsta
- načinu postanka: prirodna ili prerađena (umjetna/oplemenjena)

Prirodna goriva:

- drvo (čvrsta goriva)
- nafta (tekuće gorivo)
- prirodni plin (plinovito gorivo – zemni plin)
- ugljen (čvrsto)

2.1 Energija

Sama riječ dolazi od grčke riječi „ἐνέργεια“ (energia) [1] što bi mogli prevesti kao rad ili učinak. Definirana je kao djelotvorna sila, a u fizici kao sposobnost nekoga tijela ili sustava da obavi određeni rad. Također, energija je veličina koja karakterizira gibanje, mirovanje ili položaj bilo to tijela, tekućine, čestice ili sustava čestica. Ona je i veličina za opis čestica polja koje prenose prirodne sile i međudjelovanja čestica. Može se reći kako energija zajedno s tvari daje pojam materije. Energija se u tehnici, industriji i prirodi pojavljuje u različitim oblicima. Ti oblici se pretvaraju jedan u drugi po načelu očuvanja energije: ona ne može nestati, ni iz čega nastati, već samo promijeniti svoj oblik. Tako je i Shakespeare-ov kralj Lir izjavio "Od ničega samo ništa nastaje". Postoje različite vrste energije, a neke od njih su:

- Kinetička energija
- Potencijalna energija
- Toplinska energija (toplina)
- Unutarnja energija
- Električna energija
- Kemijska energija

Iz literature [2] možemo iščitati sljedeće: „Ljudi, strojevi, morski valovi, vjetar mogu obaviti rad na nekom tijelu zahvaljujući svom gibanju. Energiju koju imaju zbog svog gibanja nazivamo kinetička energija.“

Potencijalnu energiju imaju sva tijela zbog djelovanja neke konzervativne sile. To mogu biti gravitacijska, elastična ili električna (Coulombova) sila.

Inače, tijelo ne može dobiti potencijalnu energiju zbog djelovanja disipativne sile, kao što je trenje ili otpor zraka [2].

2.2 Obnovljivi izvori energije

Obnovljivi izvori energije su dijelovi iz prirode koji se sami po sebi ili zbog nečega konstantno i neiscrpno obnavljaju, a jako su korisni. Ti izvori materijala ili energije su: Sunce, voda, vjetar, biljke i dr.

Cilj je zamijeniti goriva kao što su ugljen, nafta i plin zato što će tih izvora u budućnosti biti sve manje, a njihovo korištenje loše utječe na atmosferu. Dok su, s druge strane, obnovljivi izvori neiscrpivi i takva energija ne zagađuju okoliš.

Svaka od tih energija dolazi iz drugačijeg izvora i dobiva se na drugačiji način, a poznate su sljedeće:

- Sunčeva energija
- hidroenergija
- energija vjetra
- energija biomase
- geotermalna energija
- energija plime i oseke
- energija valova
- vodikova energija

2.2.1 Sunčeva energija

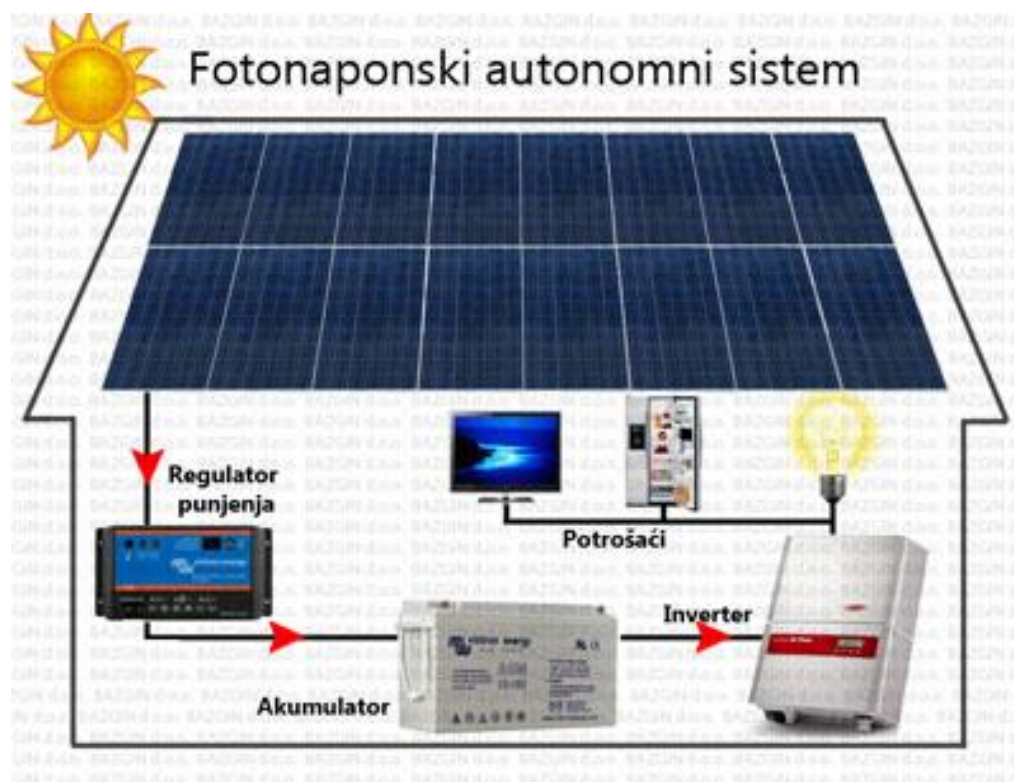
Sunčevu energiju možemo definirati kao zračenje svjetlosti i topline koje daje Sunce. Istu tu energiju ljudi koriste već jako dugo upotrebom raznih tehnologija koje neprestano napreduju. Takve energije ima u izobilju, no koristi se samo neznatna količina. Točnije, dobivamo zapanjujuće ogromnu količinu od 3.846×10^{26} W [3] .

Energija Sunca omogućuje proizvodnju pomoću toplinskih kolektora ili fotonaponskih ćelija. Velika količina toplih plinova, jake gravitacijske sile ubrzavaju atome plinova prema središtu - podiže se unutarnja temperatura (na 107 K) i tlak (na 1014 Pa), pri čemu se kidaju elektroni iz atoma i miješaju s jezgrama u plazmu - termonuklearna fuzija vodika.

Oslobođena energija prenosi se prema površini, te zračenjem u svemir, uz opadanje temperatura (na površini 5760 K). “Mali” dio energije Sunca koji dolazi na Zemlju = 1.5×10^9 TWh (s tim da se od toga 30 % reflektira u svemir, a 70 % na Zemlju = 1.05×10^9 TWh). To znači da je godišnja energija Sunca veća od ukupnih rezervi nafte i ugljena zajedno [12].

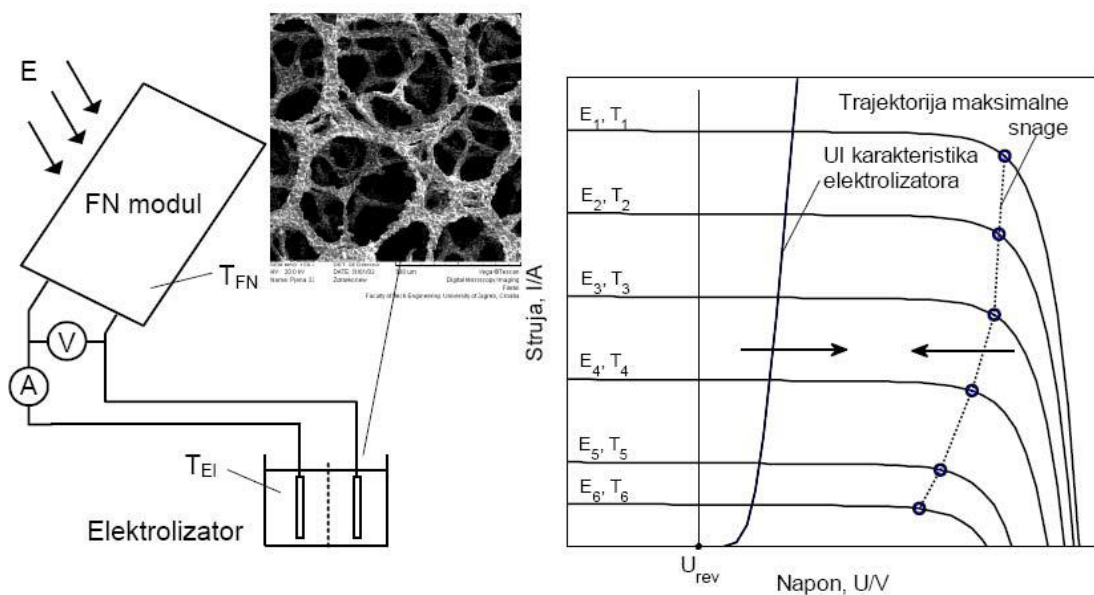
Pretvorba Sunčeve energije u obliku svjetla u električnu energiju je moguća pomoću fotonaponskih (FN) ćelija. Te se ćelije uglavnom koriste za male i srednje velike potrošače, a daju direktnu struju. FN ćelija je pasivan fotokemijski pretvarač jer je za gibanje određenih elektrona potreban vanjski izvor energije (električna energija ovisi o intenzitetu Sunčevog zračenja). Također, poluvodički je element koji se pravi od legure silicija (ili drugog poluvodiča). FN članak je pozitivno - negativni (pn) spoj, odnosno dioda. Razlika potencijala između ta dva sloja ovisi o intenzitetu globalnog Sunčevog ozračenja. Fotoni prilikom pada na površinu FN članka svoju energiju predaju članku i prilikom toga izbijaju negativno nabijene elektrone spremne na vršenje rada ako je električni krug zatvoren. Ova pojava poznata je pod nazivom fotonaponski (FN) efekt.

Spajanje više ćelija daje FN modul, a može biti serijsko i paralelno. Cijeli autonomni (otočni) solarni sistem prikazan je slikom 2.2.



Slika 2.2: Princip rada jednostavnog FN sistema [4]

Ovakav oblik energije bi uvelike pomogao procesu proizvodnje vodika pomoću elektrolize vode. Kako su goriva u svijetu jako potrebna, a njihovo nastajanje je ograničeno, dolazimo do toga da su voda i Sunčeva energija savršen spoj izvora energije kako bi se došlo do vodika (goriva budućnosti). Sunčeva električna energija je prirodna zamjena za električnu energiju koja ima svoju cijenu, a koristi se za elektrolizu vode (dobivanje vodika). Prema tome, elektroliza vode ili fotoelektroliza, bili bi najjeftiniji način proizvodnje vodika. Slika 2.3 prikazuje korištenje sustava elektrolizatora s fotonaponskim modulom.

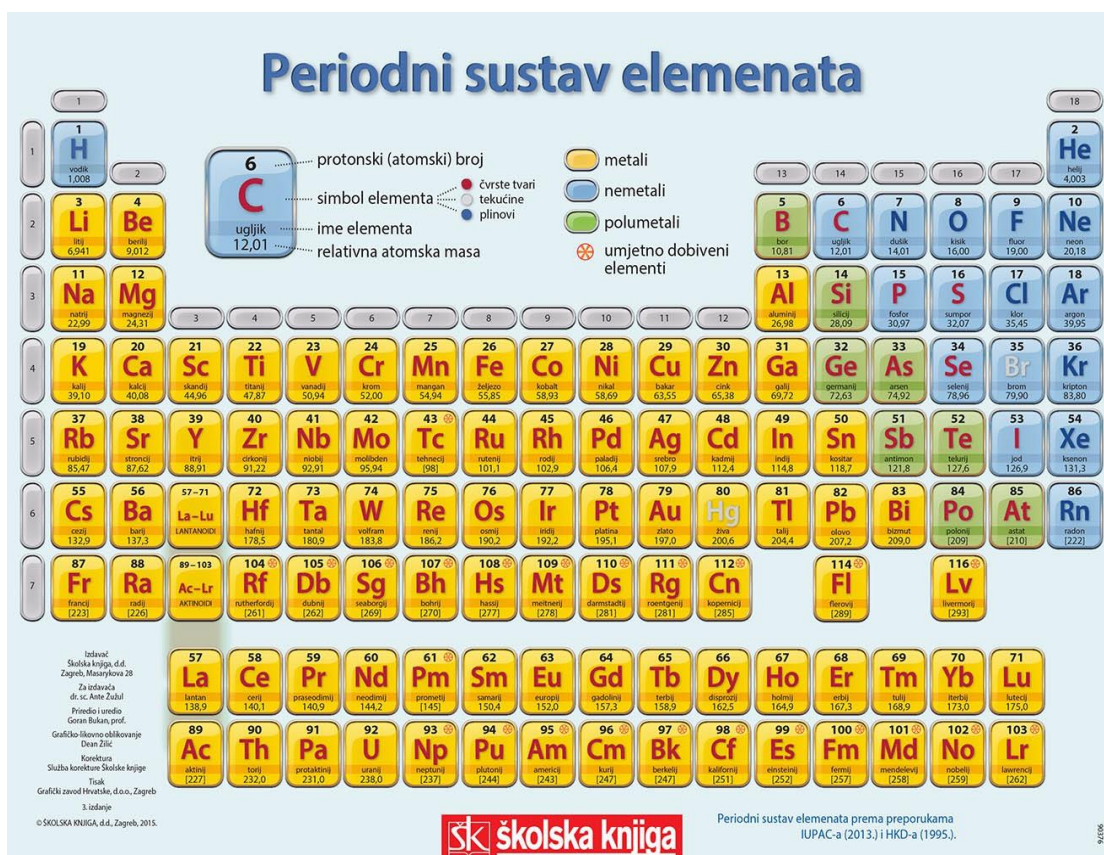


Slika 2.3: Elektroliza vode pomoću FN modula [5]

Također, slika 2.3 prikazuje usklađivanje UI karakteristike elektrolizatora i MPP putanje FN modula u cilju smanjenja gubitaka. Takvo usklađivanje omogućuje povezivanje elektrolizatora i FN modula u sustav za proizvodnju vodika elektrolizom vode pomoću Sunčeve energije i fotonaponskog modula (FNH2).

3. Vodik

O vodiku je puno toga poznato, a najpoznatija, ujedno i najosnovnija činjenica je ta da je vodik kemijski element. Njegova oznaka je H (hydrogenium) i prvi je po redu u periodnom sustavu elemenata (prikazanom na slici 3.1) što znači da je njegov atomski broj 1 (jedan). Prema [6] njegova relativna atomska masa iznosi 1.0080. Vodik (H) je zapaljiva tvar bez boje i bez mirisa, te je najjednostavniji član obitelji kemijskih elemenata u skupini nemetala. Za stabilnu elektronsku konfiguraciju nedostaje mu jedan elektron. Vodik bi se mogao smatrati halogenim elementom, ali od njih ima manju elektronegativnost i afinitet prema elektronu, pa se zbog toga proučava zasebno. Najranije poznato važno kemijsko svojstvo vodika je to da on sagorijeva s kisikom i stvara vodu (H_2O); doista, naziv vodik potječe od grčkih riječi koje znače "vodu stvara".



Slika 3.1: Periodni sustav elemenata [7]

3.1 Vodik kroz povijest

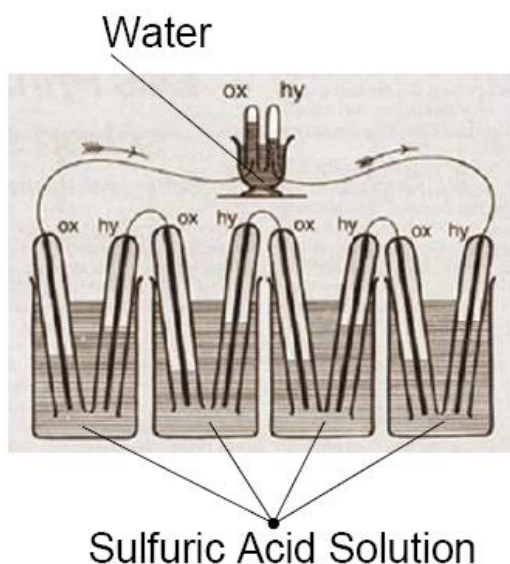
Vodik je kao element 1766. g. prepoznao Sir Henry Cavendish (Engleska). Otkrio ga je nakon što je razvio vodikov plin reakcijom metala cinka sa klorovodičnom kiselinom. Ovo otkriće dovelo je do njegovog kasnijeg otkrića da je voda (H_2O) sačinjena od vodika i kisika.

1788. Gradeći na otkrićima Cavendisha, francuski kemičar Antoine Lavoisier dao je vodiku ime koje je dobiveno od grčkih riječi – „hydro“ i „genes“, što znači „voda“ i „stvoreno od“.

1800. Engleski naučnici William Nicholson i sir Anthony Carlisle otkrili su da se primjenom električne struje na vodu stvaraju plinovi vodik i kisik. Taj se postupak kasnije nazvao "elektroliza".

1838. Švicarski kemičar Christian Friedrich Schoenbein otkrio je efekt gorivnih članaka, kombinirajući plinove vodika i kisika da bi proizveli vodu i električnu struju.

1845. Sir William Grove, engleski znanstvenik i sudac, demonstrirao je Schoenbeinovo otkriće na praktičnoj razini stvarajući „plinsku bateriju“, a može se vidjeti na slici 3.2. Za svoje postignuće stekao je titulu „Otac gorivnih članaka“.



Slika 3.2: Skica Groveovih plinskih baterija, odnosno prvih gorivnih članaka [22]

1874. Jules Verne, engleski autor, proročki je istražio potencijalnu uporabu vodika kao goriva u svom popularnom igranom djelu pod naslovom „Tajanstveni otok“.

1889. Ludwig Mond i Charles Langer pokušali su izgraditi prvi uređaj koji koristi zrak i industrijski plin od ugljena. Uređaj su nazvali gorivnim člankom. Njemački inženjer Rudolf Erren iz 1920. godine preradio je motore s unutarnjim sagorijevanjem kamiona, autobusa i podmornica za uporabu smjesa vodika ili vodika. Britanski znanstvenik i marksistički pisac, J.B.S. Haldane je u svoj rad „Znanost i budućnost“ predstavio koncept obnovljivog vodika sugerirajući da će „postojati velike elektrane u kojima će se tijekom vjetrovitog vremena višak snage koristiti za elektrolitičko raspadanje vode u kisik i vodik.“

1937. nakon deset uspješnih prekoatlantskih letova iz Njemačke u Sjedinjene Države, Hindenburg, „Zeppelin“ napuhan vodikovim plinom, srušio se pri slijetanju u Lakewood, New Jersey. Misterij pada bio je riješen 1997. Studija je zaključila da eksplozija nije nastala zbog plina vodika, već zbog statičkog električnog pražnjenja vezanog za vremenske utjecaje koji je zapalio vanjsku oblogu platna srebrne boje, koja je bila tretirana ključnim sastojkom čvrstog raketnog goriva.

1958. Sjedinjene Države formirale su Nacionalnu upravu za zrakoplovstvo i svemir (NASA). NASA-in svemirski program trenutno koristi najtečniji vodik u svijetu, prvenstveno za raketni pogon i kao gorivo za gorivne članke.

1959. Francis T. Bacon sa Sveučilišta u Cambridgeu u Engleskoj izgradio je prvu praktičnu gorivu ćeliju vodik-zrak. Sustav od 5 kilovata (kW) pokretao je aparat za zavarivanje. Svoj dizajn gorivnih članaka nazvao je "Bacon Cell". Kasnije te godine Harry Karl Ihrig, inženjer tvrtke Allis — Chalmers Manufacturing Company, demonstrirao je prvo vozilo s gorivnim člancima: traktor od 20 konjskih snaga. Vodične gorivne članke, prema dizajnu Francisca T. Bacona, korištene su za proizvodnju električne energije, topline i vode na brodu za astronaute na poznatom svemirskom brodu Apollo i svim sljedećim misijama svemirskih brodova.

1970. Elektrokemičar John O'M. Bockris je skovao pojam vodikove ekonomije tijekom rasprave u Tehničkom centru General Motors (GM) u Warrenu, Michigan. Kasnije je objavio Energiju: Solar-vodikova alternativa, opisujući njegovo predviđeno vodikovo gospodarstvo gdje bi se gradovi u Sjedinjenim Državama mogli opskrbiti energijom dobivenom od Sunca.

1972. „The 1972 Gremlin“ modificiran od Kalifornijskog sveučilišta u Los Angelesu, ušao je u natječaj za dizajn urbanih vozila 1972. i osvojio prvu nagradu za najnižu emisiju

zagađenja ispušnih cijevi. Studenti su Gremlin motor s unutrašnjim sagorijevanjem pretvorili u pogon na vodik koji se dovodi iz ugrađenog spremnika.

1973. Naftni embargo OPEC-a i posljedični šok opskrbe sugerirali su da je doba jeftine nafte završila i da su svijetu potrebna alternativna goriva. Započeo je razvoj vodikovih gorivnih članaka za uobičajene komercijalne primjene.

1974. Nacionalna zaklada za znanost prenosi savezni program za istraživanje i razvoj vodika na američko Ministarstvo energetike. Profesor T. Nejat Veziroglu sa Sveučilišta u Miamiu, FL, organizirao je energetske konferencije „The Hydrogen Economy Miami Energy Conference“ (THEME), prvu međunarodnu konferenciju koja je održala raspravu o vodičnoj energiji. Nakon konferencije, znanstvenici i inženjeri koji su prisustvovali THEME konferenciji osnovali su Međunarodno udruženje za vodikovu energiju „International Association for Hydrogen Energy“ (IAHE).

1974. Međunarodna agencija za energiju „International Energy Agency“ (IEA) osnovana je kao odgovor na poremećaje na globalnom tržištu nafte. Aktivnosti IEA-e uključivale su istraživanje i razvoj tehnologija vodikove energije.

1988. Sovjetski dizajnerski biro Tupolev uspješno je pretvorio komercijalni mlaz 164 putnika TU-154 u pogon jednog od tri mlazna motora na tekućem vodik. „Djevojački let“ (prvi let) trajao je 21 minutu.

1989. Nacionalno udruženje za vodik „The National Hydrogen Association“ (NHA) osnovano je u Sjedinjenim Državama s deset članova. Danas NHA ima gotovo 100 članova, uključujući predstavnike automobilske i zrakoplovne industrije, savezne, državne i lokalne samouprave, te dobavljače energije. Stvoren je i međunarodni tehnički odbor za vodikove tehnologije za normizaciju.

Prva svjetska tvornica za proizvodnju vodika na solarni pogon u Solar-Wasserstoff-Bayernu s istraživačkim i ispitnim pogonom, na jugu Njemačke, počela je s radom 1990-te. Kongres SAD-a Spark M. Matsunaga usvojio je „Vodik, istraživanje, razvoj i demonstraciju“ (PL 101-566), kojim je propisana formulacija petogodišnjeg plana upravljanja i provedbe za istraživanje i razvoj vodika u Sjedinjenim Državama.

Matsunaga je za vrijeme mandata sastavio stručno savjetodavnom vijeću za vodik „The Hydrogen Technical Advisory Panel,“ (HTAP) radi osiguranja, savjetovanja i koordinacije istraživanja vodika. Tu je započet rad na gorivnom članaku s polimernom membranom (PEM) od 10 kilovata (kW)

1994. Daimler Benz demonstrirao je svoje prvo vozilo NECAR I (New Electric CAR) s gorivnim člancima na konferenciji za novinare u Ulmu, Njemačka.

1997. umirovljeni NASA-in inženjer Addison Bain osporio je uvjerenje da je vodik uzrokovao nesreću u Hindenburgu. Bain je dokazao kako vodik nije izazvao katastrofalnu vatru već kombinacija statičkog elektriciteta i lako zapaljivog materijala na omotu zračnog broda. Njemački proizvođač automobila Daimler-Benz i Ballard Power Systems najavili su istraživačku suradnju na vodikovim gorivnim člancima u iznosu od 300 milijuna dolara.

1998. Island je otkrio plan o stvaranju prvog vodikovog gospodarstva do 2030. s Daimler-Benzom i Ballard Power Systems.

1999. Royal Dutch / Shell Company obvezali su se na vodikovu budućnost formiranjem vodikove podjele. Prve europske benzinske postaje otvorene su u njemačkim gradovima Hamburgu i Münchenu.

Konzorcij islandskih institucija, na čelu s financijskom skupinom New Business Venture Fund, u partnerstvu s Royal Dutch / Shell Group, DaimlerChrysler (spajanje Daimler Benza i Chryslera) i Norsk Hydro radi formiranja islandske tvrtke Hydrogen and Fuel Cell za unapređenje vodikove ekonomije na Islandu.

2000 Ballard Power Systems predstavio je prvu svjetsku PEM gorivu ćeliju za automobilsku primjenu na automobilskim izložbama u Detroitu.

Predsjednik 2003. George W. Bush najavio je u svojoj državi „State of the Union 2003.“ inicijativu za gorivo od 1,2 milijarde dolara za razvoj tehnologije komercijalno održivih gorivnih članaka na vodik, tako da „prvi automobil kojim bi upravljalo dijete rođeno danas mogao bi pokretati pogon gorivih ćelija.“

2004. američki ministar energetike Spencer Abraham najavio je više od 350 milijuna dolara posvećenih istraživanjima vodika i demonstracijskim projektima vozila.

2004. Prva podmornica s pogonom na gorivne članke podvrgnuta je duboko vodnim ispitivanjima (njemačka mornarica).

2005. Dvadeset i tri države u Sjedinjenim Državama imaju vodeće inicijative.

3.2 Svojstva vodika

Vodik je u osnovici opisan kao plin koji nema mirisa, niti okus, niti boje, a također je element kojega ima najviše u cijelome svemiru. Atom običnog vodika, sastoji od jednog protona koji se nalazi u jezgri i jednog elektrona u plaštu. Zbog te razmjerno jednostavne strukture se može provjeravati teorija atomske građe. Eksperimentom se potvrdilo što teorija govori, a to je postojanje dviju modifikacija vodika koje se razlikuju po nekim odnosima sastavnog protona i elektrona. Te dvije modifikacije zvane orto-vodik i para-vodik nalaze se u prirodnom vodiku u stalnom omjeru 3:1.

Vodik je 14.4 puta lakši od zraka. Neotrovan je i nije zagušljiv. Slabo je topljiv u polarnim, a bolje u nepolarnim otapalima. Vrelište vodika je 20 K (-252,8 °C), dok je talište 14 K (-259,3 °C). Pri hlađenju ispod -252,8 °C on se zgušnjava u bezbojnu tekućinu, dok pri -259,3 °C vodik iz tekućeg stanja prelazi u čvrsto i tada ima heksagonsku kristalnu strukturu. Vodik se od ostalih elemenata razlikuje u puno razni fizikalnih i kemijskih svojstava. Npr. Vodik se od zraka razlikuje po tome što je njegova toplinska vodljivost 7 puta veća, dok se kroz čvrste stjenke procjeđuje 5 puta brže. Njegova difundacija kroz razne pukotine i spojeve stijenki cijevi i posuda je značajno veća od bilo kojeg drugog plina, no ako iscuri, on se mnogo brže raspršuje u okolinu pa zapaljiva smjesa nastaje samo u blizini tog mjesta.

Tablica 3.3: Fizikalna svojstva i osnovne karakteristike vodika [9]

Donja ogrjevna moć: 10 800 kJ / m _n ³	Specifična toplina (c _p): 14 266 J / kgK (20 °C)
Gornja ogrjevna moć: 12 770 kJ / m _n ³	Gustoća (Plinovito stanje) 0.09 kg / m ³
1 normni kubni metar (m _n ³): ≈ 0.09 kg	Gustoća (tekuće stanje) 70.9 kg / m ³ (-252 °C)
Plinska konstanta: 4 125 J / kgK	

3.2.1 Izotopi

Izotopima, koji su prikazani slikom 3.4, nazivamo atome istoga kemijskoga elementa s različitim brojem neutrona u jezgri. Da atomi istoga kemijskog elementa nemaju jednake mase dokazano je početkom 20. st. Ako je poznato da masa atoma nekog elementa ovisi o broju subatomskih čestica koje čine jezgru, možemo zaključiti da istovrsni atomi imaju različit broj neutrona.

Vodik je najjednostavniji kemijski element i ima tri izotopa, a to su:

- procij
- deuterij
- tricij

Svi izotopi vodika imaju isti protonski broj $Z = 1$, a razlikuju se po nukleonskom broju (nukleonski broj procija je $A = 1$, deuterija je $A = 2$ i tricija je $A = 3$. Z je oznaka za atomski ili protonski broj, dok A označuje maseni ili nukleonski broj.

Također, izotopi se upotrebljavaju za proučavanje značajnih procesa u kemiji, fizici, biologiji, medicini itd.

Procij je najnormalniji i najzastupljeniji izotop vodika, a zove se i „laki vodik“.

Procij se označuje s ^1H . Njegov je maseni broj 1. U jezgri vodika je 1 proton, a neutrona nema.

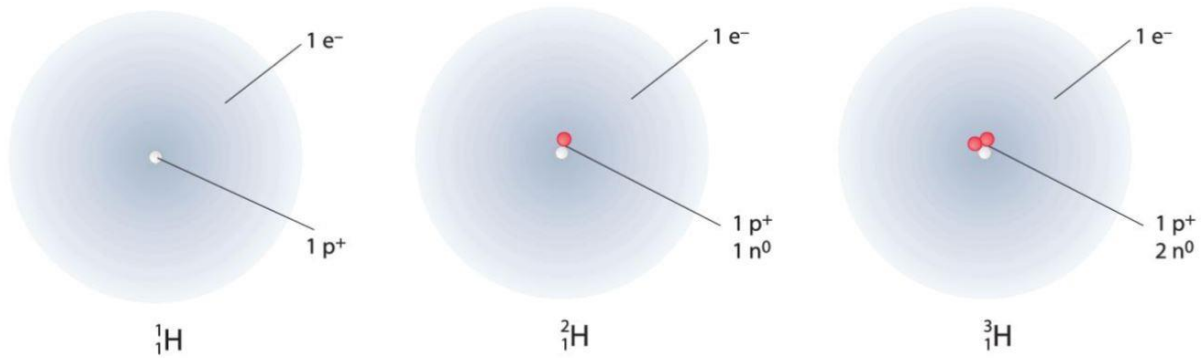
Deuterij možemo nazvati teškim vodikom i ima ga jako malo.

^2H ili D su njegove oznake. U jezgri deutrona ima 1 proton i 1 neutron pa je maseni broj 2.

Ako se u vodi pronađe deuterij umjesto običnog vodika, takvu vodu nazivamo teškom vodom (D_2O). Njezina je gustoća 12,5 % veća od prirodne vode.

Tricij je najteži vodik i on je radioaktivan.

Triton je njegova jezgra i u njoj se nalazi 1 proton i 2 neutrona, a označuje se s ^3H ili T. Maseni broj je 3. U atmosferi ga se može teško pronaći.



Slika 3.4: Shematski prikaz građe triju poznatih izotopa vodika [10]

Iz spoja vodikova izotopa deuterija i kisika (D_2O), koji se još naziva i deuterijev oksid dobivamo tešku vodu, „težu“ od obične vode. Teška voda se izgledom (bojom), mirisom i okusom ne razlikuje od obične vode. Razlika između njih je u gustoći, vrelištu i talištu (Tablica 3.5). Teška voda se u prirodnoj vodi nalazi u omjeru 1:5000 molekula, a odvaja se elektrolizom. Ona nije otrovna, no može biti opasna za zdravlje, jer konzumacijom prevelike količine dolazi do usporavanja kemijskih reakcija u tijelu. Najviše se primjenjuje u nuklearnoj tehnici; rabi se u nuklearnim reaktorima kao moderator, tj. usporivač brzih neutrona. Osim toga, važna je u pripravi deuteriranih (deuterijem obogaćenih) kemijskih spojeva. Prva proizvodnja takve vode pojavila se u hidroelektrani Vemork u Norveškoj 1940-tih godina.

Tablica 3.5: Razlika u svojstvima teške i obične (prirodne) vode [11]

Osobine	D_2O	H_2O
Talište ($^{\circ}C$)	3,82	0
Vrelište ($^{\circ}C$)	101,4	100
Gustoća (na $20^{\circ}C$, g/mL)	1,1056	0,9982
Temp. maksimalne gustoće ($^{\circ}C$)	11,6	4,0
pH (na $25^{\circ}C$)	7,41	7

3.3 Dobivanje i proizvodnja vodika

Vodik je zapravo obnovljivo gorivo, ne i izvor energije, ali se može dobiti iz bilo kakvog izvora energije. Proizvodi se, a zatim i koristi u industriji u cijelome svijetu već jako dugo. Tek se posljednjih nekoliko godina vodik naglašava kao gorivo budućnosti. Iz fosilnih se goriva dobiva najveća količina vodika, a najkorisniji način proizvodnje je elektroliza vode. Kako je problem ograničenost fosilnih goriva te njihova štetnost, a potrebe za energijom su sve veće, sve više se koriste nove tehnologije dobivanja energije.

Dobivanje vodika je moguće korištenjem njegovih spojeva.

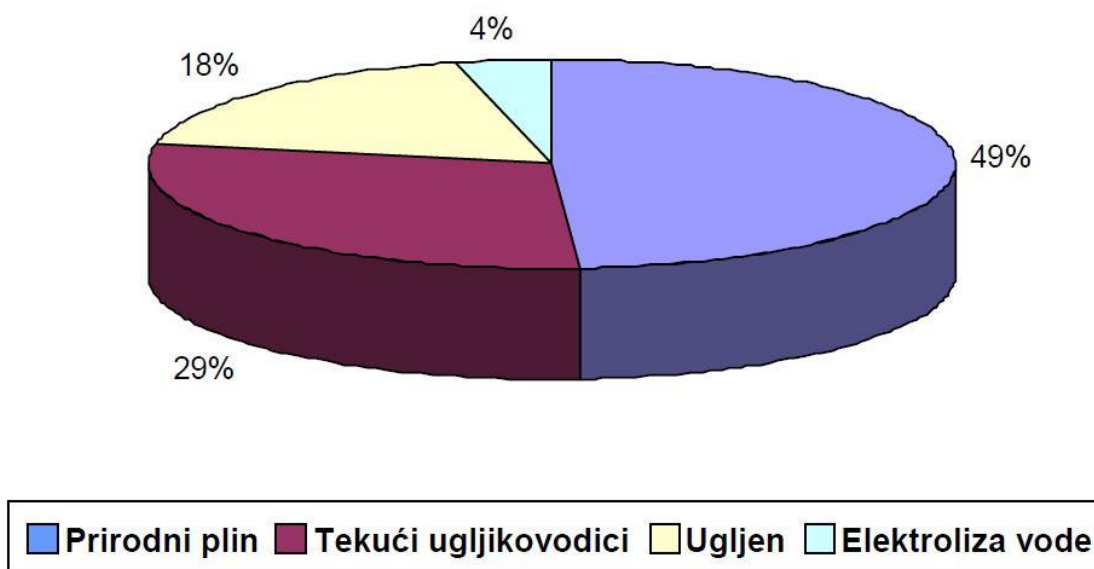
Što se tiče laboratorijskih svrha, do vodika se dolazi na nekoliko načina, a prema [10] to je najčešće otapanjem nekog metala (uglavnom cinka) u razrijeđenoj kiselini (klorovodična/solna ili sumporova). Takav vodik izgara narančastocrvenim plamenom, dok posve čisti vodik izgara gotovo nevidljivim i mirnim plamenom.

Također, vodik se dobiva reakcijom sa metalom negativnog redoks-potencijala (kao što je aluminij), pomoću lužina (KOH/NaOH) ili reakcijom vode i čvrstog hidrida (npr. CaH_2).

Više načina, odnosno metoda dobivanja vodika postoji i u industriji. Najznačajnije metode su: elektroliza vode, redukcija vodene pare sa željezom ili s ugljikom i elektroliza vodene otopine natrijevog klorida.

Kada se govori o procesima proizvodnje vodika iz fosilnih goriva ovo su sljedeće metode: parno formiranje, djelomična oksidacija, autotermalno reformiranje prirodnog plina ili nafte, toplinska disocijacija, kvaernerov proces, reformiranje plazmom, itd. Takvi procesi se temelje na zagrijavanju ugljikovodika i vodene pare, ponekad korištenje zraka ili kisika, te njihovom miješanju u reaktor.

Obnovljivi izvori energije mogu puno pridonijeti očuvanju našega planeta, a pomoću njih se može doći i do vodika. Tri najznačajnije metode proizvodnje vodika pomoću obnovljivih izvora energije su elektroliza vode, fotoelektroliza i rasplinjavanje biomase.



Slika 3.4: Graf proizvodnje vodika u svijetu [5]

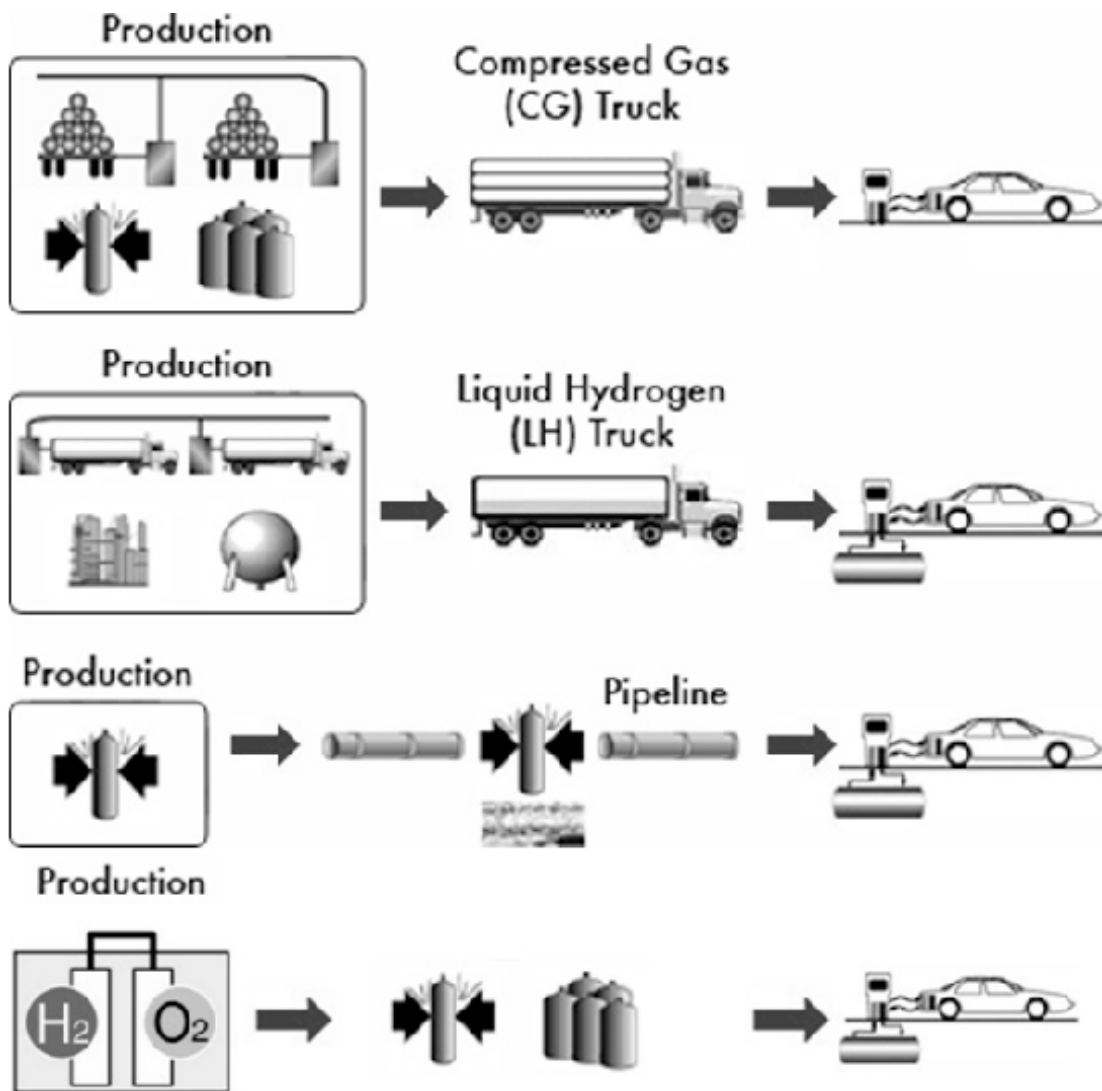
Ukupna proizvodnja vodika u svijetu iznosi 53.8 milijuna tona (7.6 EJ). Slika 3.4 (graf) prikazuje proizvodnju vodika prema načinu dobivanja u postocima.

3.4 Skladištenje i transport vodika

Distribucija, te vodikova primjena kao gorivo ovise o načinu njegova uskladištenja i tehnologijama transporta. Pohrana molekula vodika se ostvaruje pomoću površinskih sila, a otpuštanje vodika iz medija ostvaruje se tlakom i povećanjem temperature metalnog hidrida.

Vodik se u plinovitom, kao i ukapljenom stanju, isporučuje u kamionima poput prirodnog plina, odnosno poput drugih goriva. Za distribuciju vodika su zaslužni i cjevovodi kojih ima preko 1000 kilometara diljem Europe i Amerike. Također, transport je moguć pomoću brodova i vlakova u spremnicima kapaciteta od 3500 do 70000 kg.

Slika 3.5 predstavlja načine transporta sve do crpki u odnosu na način proizvodnje.



Slika 3.5: Načini transporta i skladištenje vodika [23]

3.5 Korištenje vodika

Vodik se na razne načine i u raznim granama koristi već mnogo godina, a u posljednje vrijeme se radi na uporabi vodika kao goriva. On je vrlo važna industrijska sirovina pa se, između ostalog, koristi za sintezu amonijaka i metanola, za zavarivanje i taljenje metala, punjenje zračnih balona i brodova. Koristi se i za redukciju metalnih oksida u metale, hidrogeneriranje ulja u masti. Naravno, vodik se koristi i kao gorivo u motorima s unutrašnjim izgaranjem, ima mogućnost miješanja s prirodnim plinom, koristi se i u plinskim turbinama i spaljiva na gorionicima generatora pare. Također je moguća njegova primjena u kemijskoj industriji, a i u kućanstvima bi mogao služiti za kuhanje posebnim plamenicima, te ako se njegovome plamenu dodaju određene supstance kako bi on bio vidljiv. No, najatraktivnija tehnika je korištenje vodika u gorivnim člancima. Glavni produkt procesa u gorivnom članku je električna energija uz toplinu i vodu kao nusproduktima koja se dalje može koristiti za proces elektrolize u sustavu elektrolizatora – zatvoreni kružni proces vodika u prirodi.

Prednosti uporabe vodika kao gorivo su:

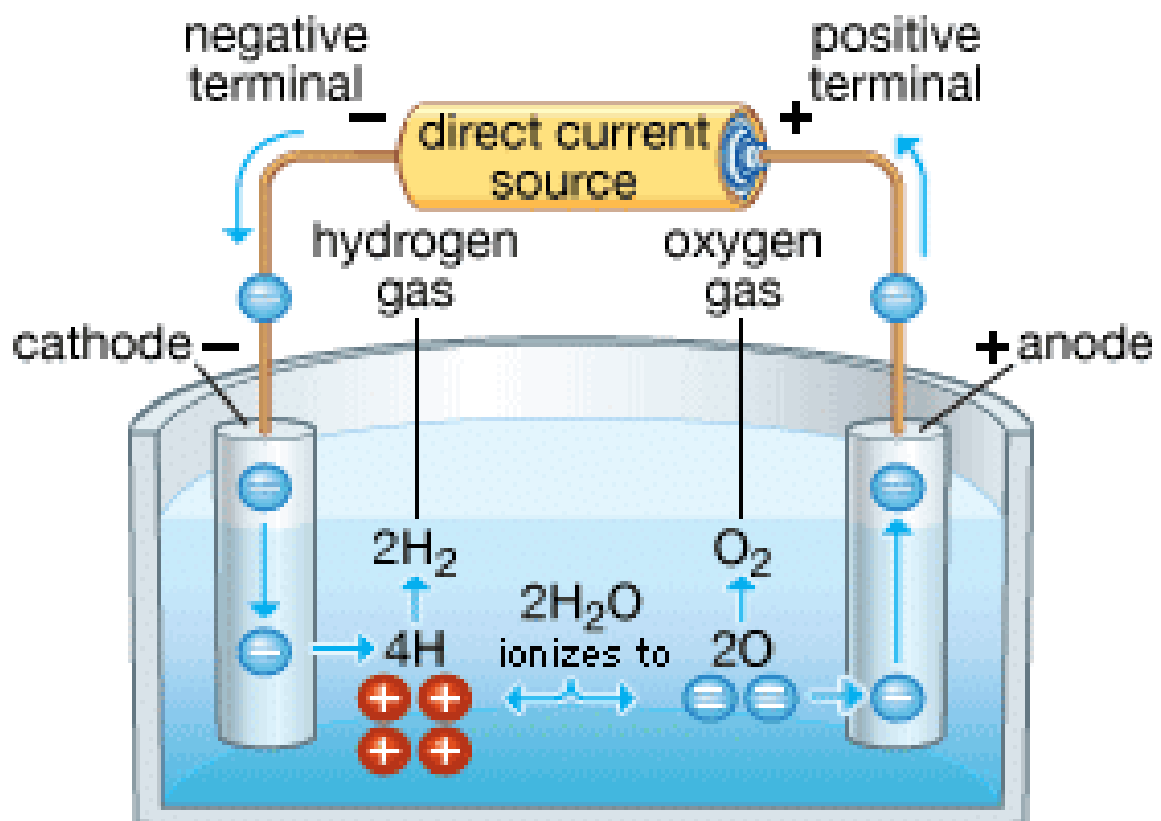
- mogućnost skladištenja (lakše se čuva nego el. Energija)
- transport postojećim infrastrukturama (cjevovodima)
- dostupne neograničene količine
- visoka energetska vrijednost
- korištenje za proizvodnju električne i toplinske energije
- čista voda kao nusprodukt

Nedostaci koji sprečavaju rašireniju uporabu vodika su:

- mala veličina molekula (problem distribucije i skladištenja)
- visoka cijena i često slaba isplativost otpuštanja vodika iz spojeva
- vodik je opasna po metale (čini ih lomljivima)

4. Elektroliza

Kada se radi o dobivanju vodika, koji se može dobiti na razne načine, elektroliza je najzanimljiviji, ali i obećavajući način proizvodnje vodika. Elektroliza (moguće vidjeti na slici 4.1) je elektrokemijski proces pri kojem se uz pomoć vanjskog izvora el. struje na elektrodama (katodi i anodi) vrše reakcije oksidacije i redukcije. Drugim riječima, razlažu se ili razgrađuju elektroliti djelovanjem električne energije (el. struje). Elektroliza se provodi u različitim otopinama za dobivanje različitih atoma ili molekula.



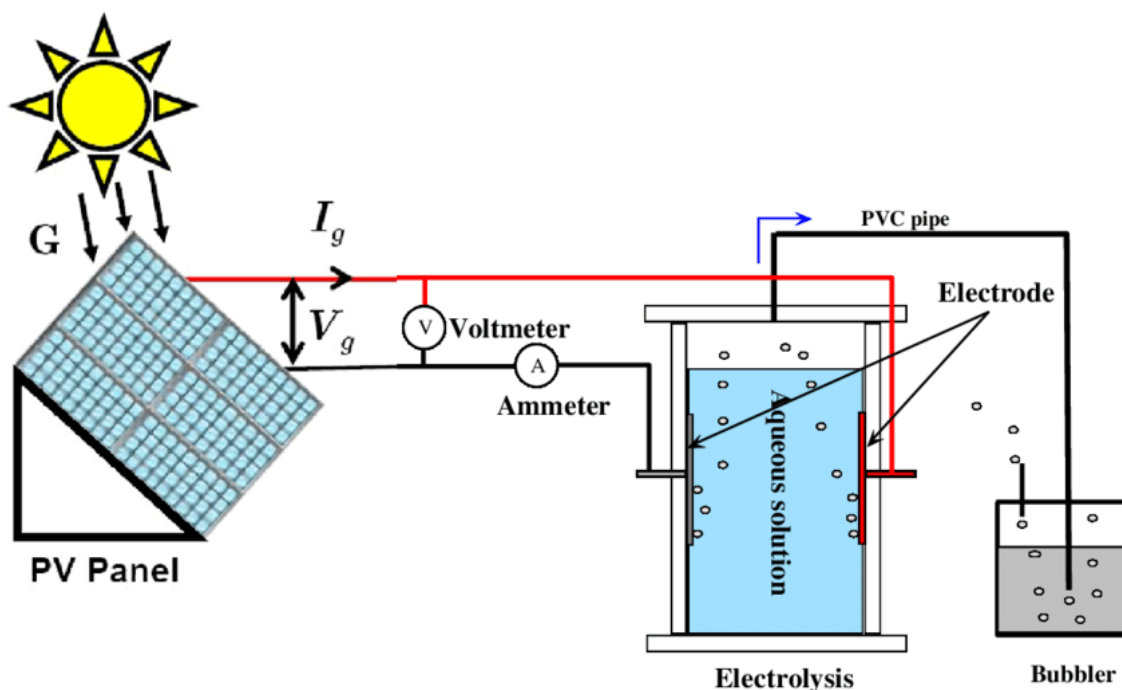
Slika 4.1: Razgradnja vode u stanici elektrolize [13]

4.1 Elektroliza vode

Za dobivanje vodika se radi elektroliza vode na sobnoj temperaturi. Koristi se što slanija voda pa se po mogućnosti u prirodnu vodu dodaje kuhinjska sol. Zbog toga se destilirana voda ne koristi jer ona ne provodi električnu struju. Elektrode se rade uglavnom od platine zato što bi s većinom drugih metala nastali kisik reagirao. Vodik nastaje redukcijom na katodi u plinovitom stanju.

Prema [10] elektroliza vode je najjednostavniji i ekološki najprihvatljiviji. Dakle, proces je ekološki čist što govori da se ne stvaraju staklenički plinovi (što je velika prednost), a i kisik se, koji dolazi nakon procesa, može iskoristiti.

Visoka energetska zahtjevnost je problematika ove tehnologije, ali u budućnosti bi to mogao postati najjeftiniji način dobivanja vodika i goriva općenito. To bi bilo moguće uz povećano korištenje OIE koja bi zamijenila električnu energiju potrebnu za elektrolizu. Slika 4.2 prikazuje način korištenja fotonaponskog panela (solarne energije) za dobivanje vodika pomoću elektrolize vode.



Slika 4.2: Shematski prikaz sustava; Elektroliza pomoću Sunčeve energije [14]

4.2 Elektolizator

Uređaj za elektrolizu (koji je vidljiv na slici 4.3) naziva se elektrolizator i u njemu se odvija sam proces odvajanja vodika i kisika iz vode. Elektrolizator se u pravilu sastoji od istosmjernog izvora električne energije. Te dvije elektrode od plemenitog metala, one su razdvojene elektrolitom. Vodič je elektrolitna, tj. ionska tekućina, npr. provodljiva kaustična otopina kalijevog hidroksida (KOH) za alkalnu elektrolizu. Elektrolizatori se dijele prema mediju kojeg koriste, odnosno elektrolitnom materijalu, te prema temperaturi na kojoj djeluju. Neki od tipova elektrolizatora su sljedeći:

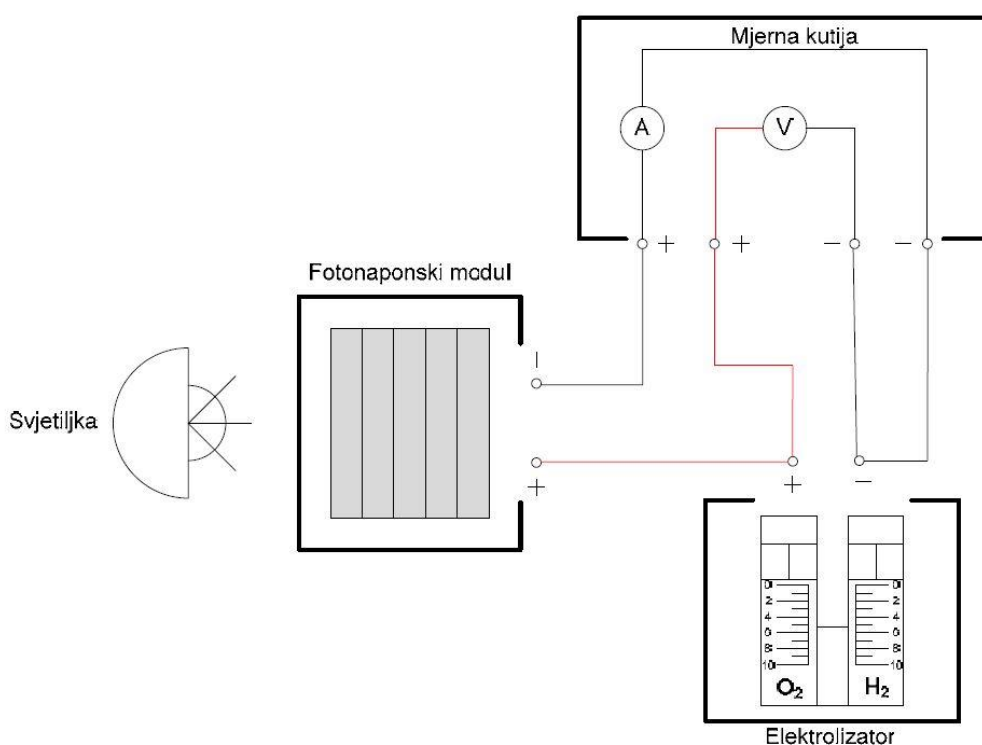
- Elektrolizator s krutim oksidom
- Niskotemperaturna elektroliza
- PEM elektrolizator (Polymer electrolyte membrane)
- Alkalni elektrolizator
- Elektroliza visoke temperature



Slika 4.3: Uređaj za elektrolizu vode [20]

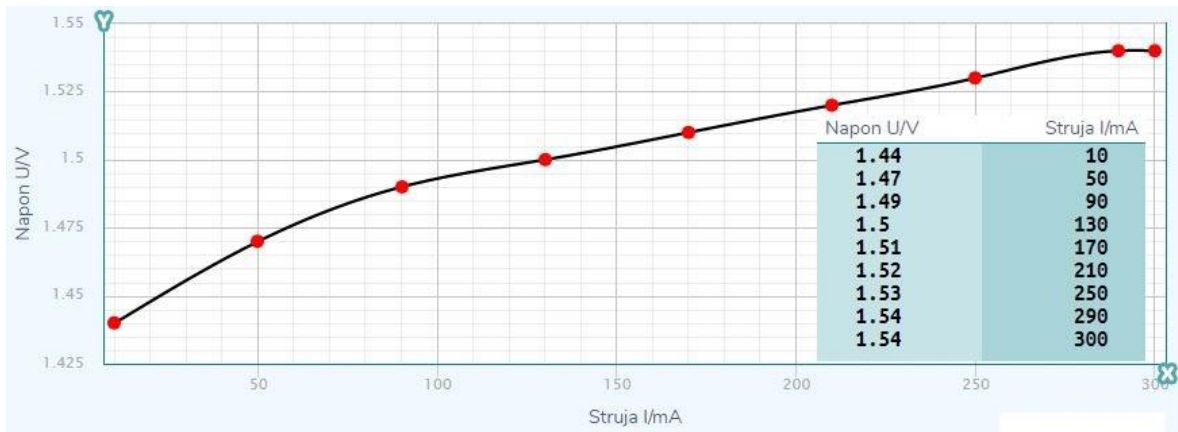
4.2.1 Eksperimenti s elektrolizatorom

Radi dobivanja bolje slike o samim elektrolizatorima, na didaktičkoj se ploči rade mjerenja kako bi se ispitalo njihovo ponašanje. Prvi eksperiment se radi kako bi se utvrdila karakteristična krivulja elektrolizatora (struja u odnosu na napon i obrnuto). Za taj eksperiment je potrebno sljedeće: elektrolizator, solarni modul, mjerni instrumenti, kabeli, destilirana voda, svjetiljka. Elektrolizator se napuni destiliranom vodom, a oprema se spaja prema shemi iz slike 4.4.



Slika 4.4: Shema spajanja – eksperiment broj 1 [8]

Eksperiment započinje s jačinom struje iz solarnog modula od 10 mA i povećava se do otprilike 300 mA, a rezultirajući se napon zapisuje u tablicu po kojoj se zatim crta polarizacijska krivulja (struja na apscisi). Jačina struje ovisi o intenzitetu svjetla, a on se mijenja udaljavanjem ili približavanjem svjetiljke i/ili podešavanjem njenog kuta. Rezultati su prikazani na slici 4.5.



Slika 4.5: Polarizacijska krivulja elektrolizatora s tablicom.

Iako je teoretski napon 1,23 V, za elektrolizu je potreban veći napon zbog različitih gubitaka. Polarizacijska krivulja pokazuje da elektroliza započinje s izvjesnim naponom i da zatim napon raste sa strujom. U početku s malim strujama napon raste brže, a zatim skoro linearno sa strujom. Cilj je konstrukcije elektrolizatora, dakle, smanjiti gubitke i dobiti polarizacijsku krivulju sto položeniju. Oblik i položenost polarizacijske krivulje ovisi o materijalu elektroda, teksturi njihovih površina, vrsti i koncentraciji elektrolita (u ovom slučaju elektrolit je polimerna membrana koja ima sposobnost provođenja protona), otporima u elektrolitičkom članku i temperaturi. Polarizacijska krivulja elektrolizatora se može opisati jednačbom (4.1):

$$U_{\text{cell}} = U_0 + b \cdot \ln i/i_0 + i \cdot R \quad (4.1)$$

gdje je:

U = napon

U_0 = teoretski napon (1,23 V pri 25 °C)

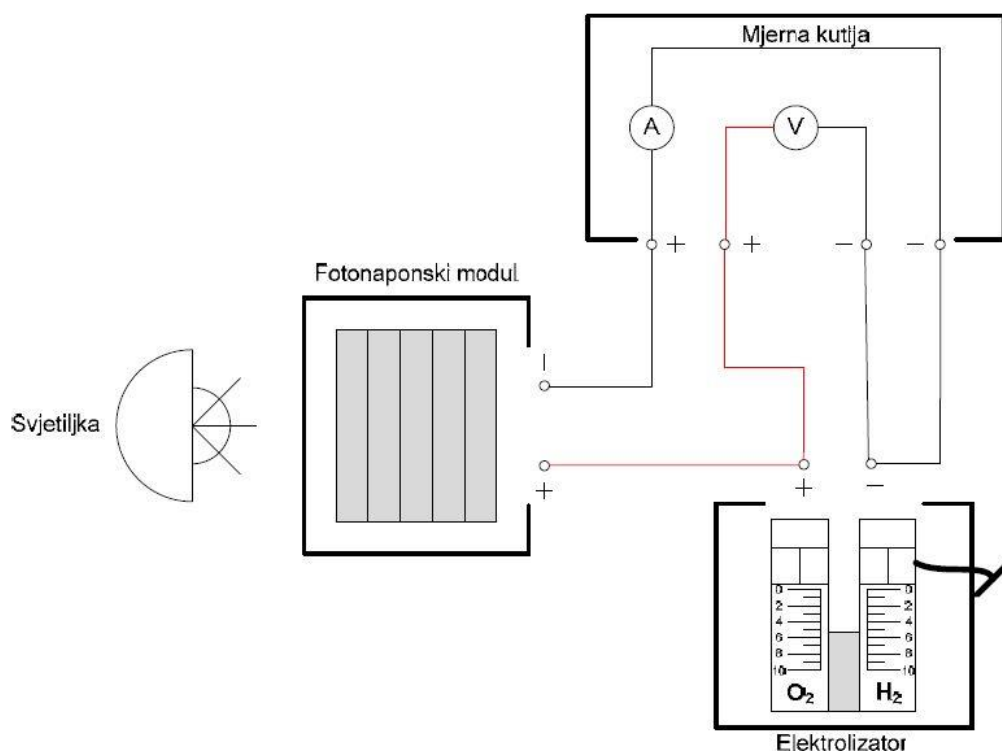
b = konstanta (takozvani Tafelov nagib) – određuje se eksperimentalno

i = gustoća struje (A/cm^2)

i_0 = izmjenjiva gustoća struje (A/cm^2) – funkcija materijala i teksture elektroda, ali i temperature – određuje se eksperimentalno

R = otpori u članku ($Ohm \cdot cm^2$) – određuju se eksperimentalno

Sljedeći eksperiment je eksperiment efikasnosti elektrolizatora (odnos proizvedene energije u vodiku i utrošene električne energije). Uz efikasnost, cilj je usporediti volumen proizvedenog vodika i usporediti ga s očekivanim (teoretskim) volumenom prema Faradeyevom zakonu. Za to je od opreme potrebno: elektrolizator, solarni modul, mjerni instrumenti, kabeli, cijev, čep za cijev, svjetiljka, destilirana voda, štoperica. Kada se ulije destilirana voda u elektrolizator, te se cijev spoji na stranu vodika kod elektrolizatora, a potom začepi čepom, oprema se spaja po shemi koja je prikazana sljedećom slikom:



Slika 4.7: Shema spajanja - eksperiment broj 2. [8]

Struja iz solarnog modula se podešava mijenjajući intenzitet svjetla na konstantnu vrijednost (150 - 200 mA). Potom se mjeri napon i struja na početku i na kraju mjerenja. Nastoji se da je struja konstantna tijekom eksperimenta. Trajanje eksperimenta je 180 s (3 min). Mjeri se količina proizvedenog vodika (utrošene vode) i isto ponavlja 3 puta.

Dolazi se do zaključka da energetska efikasnost varira s naponom. Kada napon raste, povećava se količina proizvedenog vodika, ali energetska efikasnost se smanjuje. Slijedi objašnjenje eksperimenta uz primjer.

Mjerenje 1: $t = 180$ s, $U = 1,55$ V, $I = 250$ mA, $Vol_{srednje} = 5,5$ cm³

Faradayeva ili strujna efikasnost je omjer stvarne količine (volumena) proizvedenog vodika u danom vremenu i teoretske količine (prema Faradayevom zakonu).

Energetska efikasnost je omjer između energije sadržane u količini proizvedenog vodika i utrošene električne energije.

Proizvedeni vodik prema Faradayevom zakonu (4.2):

$$Vol_{H_2}(\text{teor.}) = (0,25 \text{ A} * 180 \text{ s} * 24000 \text{ cm}^3) / 193000\text{C} = 5,59 \text{ cm}^3 \quad (4.2)$$

Faradayeva efikasnost elektrolizatora (4.3):

$$\eta = (5,50 \text{ Vol}_{H_2}(\text{eksp.})) / (5,59 \text{ Vol}_{H_2}(\text{teor.})) = 98,3 \text{ (\%)} \quad (4.3)$$

Ovaj podatak nam govori koliko se električnog naboja pretvara u željenu reakciju. U komercijalnim elektrolizatorima efikasnost je blizu 100 %. Ukoliko je ona znatno manja od 100 % to znači da se odvijaju neke sekundarne reakcije u sustavu (korozija). To je veliki nedostatak elektrolizatora, jer ne samo što će prouzrokovati njegov manji vijek trajanja već i povećati ulaz energije.

Električna energija potrebna za oslobađanje $Vol_{\text{srednje}} = 5,5 \text{ cm}^3$ prema (4.4) iznosi:

$$E_{\text{el}} = 1,55 \text{ V} * 0,25 \text{ A} * 180 \text{ s} = 67,5 \text{ J} \quad (4.4)$$

Energija koja se oslobodi izgaranjem (4.5):

$$E_{H_2} = (5,5 \text{ Vol}_{\text{srednje}} \text{cm}^3 * 286000 \text{ Jmol}^{-1}) / 24000 \text{ cm}^3 \text{mol}^{-1} = 65,54 \text{ J} \quad (4.5)$$

ΔH = ogrjevna vrijednost vodika = 286000 J/mol

Energetska efikasnost (4.6):

$$\eta = E_{H_2} / E_{\text{el}} = 97 \text{ \%} \quad (4.6)$$

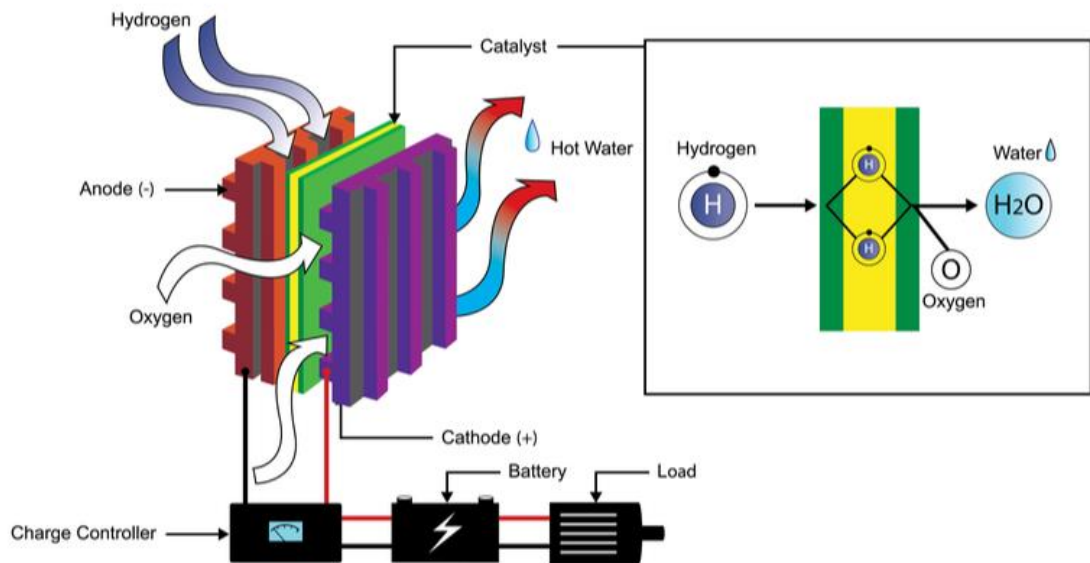
5. Gorivni članak

Iako gorivne članke još nazivamo i gorivim ćelijama, ovaj naziv je pravilniji. Stručnom terminologijom se goriva ćelija može shvatiti kao zatvorska samica ili stanica u biologiji koja može gorjeti. Gorivni članak koristi kemijsku energiju vodika ili drugog goriva za čistu i učinkovitu proizvodnju električne energije. Ako je vodik gorivo, električna energija, voda i toplina jedini su proizvodi. Gorivne stanice jedinstvene su u pogledu raznolikosti njihovih potencijalnih primjena; mogu pružiti napajanje za sustave velike, poput komunalne elektrane i male, poput prijenosnog računala.

Gorivni članci mogu se koristiti u širokom rasponu aplikacija, uključujući transport, rukovanje materijalom, stacionarni, prijenosni i sigurnosni sigurnosni sustavi. Gorivni članci imaju nekoliko prednosti u odnosu na uobičajene tehnologije temeljene na izgaranju koje se trenutno koriste u mnogim elektranama i putničkim vozilima. Gorivni članci mogu raditi s većom učinkovitošću od motora s unutarnjim izgaranjem i mogu pretvoriti kemijsku energiju u gorivu u električnu s učinkovitošću do 60 %. Gorivni članci imaju manju emisiju od motora s izgaranjem. Vodikovi gorivni članci emitiraju samo vodu, tako da nema emisija ugljičnog dioksida i zagađivača zraka koji stvaraju smog i uzrokuju zdravstvene probleme na mjestu rada. Također, gorivni članci su tihi tijekom rada, jer imaju manji broj pokretnih dijelova.

Gorivni članci rade poput baterija, ali ne pokreću se i ne treba ih puniti. Oni proizvode električnu energiju i toplinu sve dok se isporučuje gorivo. Gorivni članak sastoji se od dvije elektrode - negativne elektrode (ili anode) i pozitivne elektrode (ili katode) - upletene oko elektrolita. Na anodu se dovodi gorivo, poput vodika, a na katodu zrak. U vodikovom gorivnom članku katalizator na anodi razdvaja molekule vodika u protone i elektrone koji vode različitim putovima do katode. Elektroni prolaze kroz vanjski krug, stvarajući protok električne energije. Protoni migriraju kroz elektrolit do katode, gdje se ujedanjuju s kisikom i elektronima da bi proizveli vodu i toplinu.

Hydrogen Fuel Cells



Slika 5.1: Princip rada vodikovog gorivnog članka [15]

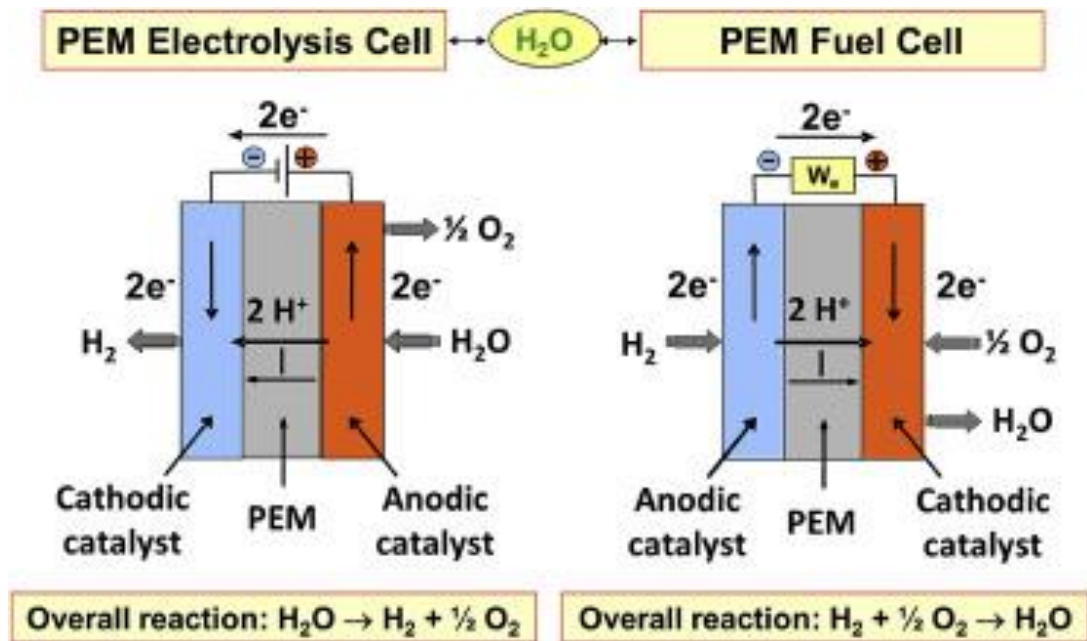
5.1 PEM gorivni članak

Vrste gorivih članaka se obično dijele prema elektrolitu koji koriste. Svaki od tipova zahtijevaju određene materijale i goriva i pogodni su za različite primjene. Uz PEM gorivni članak, postoje sljedeći tipovi:

- Solid Oxide Fuel cells (SOFC) – gorivni članci s čvrstim oksidom
- Alkaline Fuel Cell (AFC) – alkalne gorivne čelije
- Direct Methanol Fuel Cells (DMFC) – gorivni članci s čistim metanolom
- Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC) – gorivni članci fosforne kiseline
- Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC) – gorivni članci od karbonata

PEM je skraćeno od PEMFC (eng. proton exchange membrane fuel cell). Ovaj tip možemo opisati kao gorivni članak s polimernom membranom za izmjenu protona. Gorivo kod PEM gorivnog članka je vodik i nositelj naboja je ion vodika (proton), a kao oksidans se

može koristiti čisti kisik ili kisik iz zraka. PEM gorivni članak je najrasprostranjeniji i pokazao se kao najbolji od ostalih tipova. Ovaj tip gorivnog članka je iskorišten u vozilima. Slika 5.2 prikazuje shematsku razliku između PEM uređaja za elektrolizu i PEM gorivnog članka.



Slika 5.2: Shematski prikaz; PEM elektrolizator i PEM gorivni članak [21]

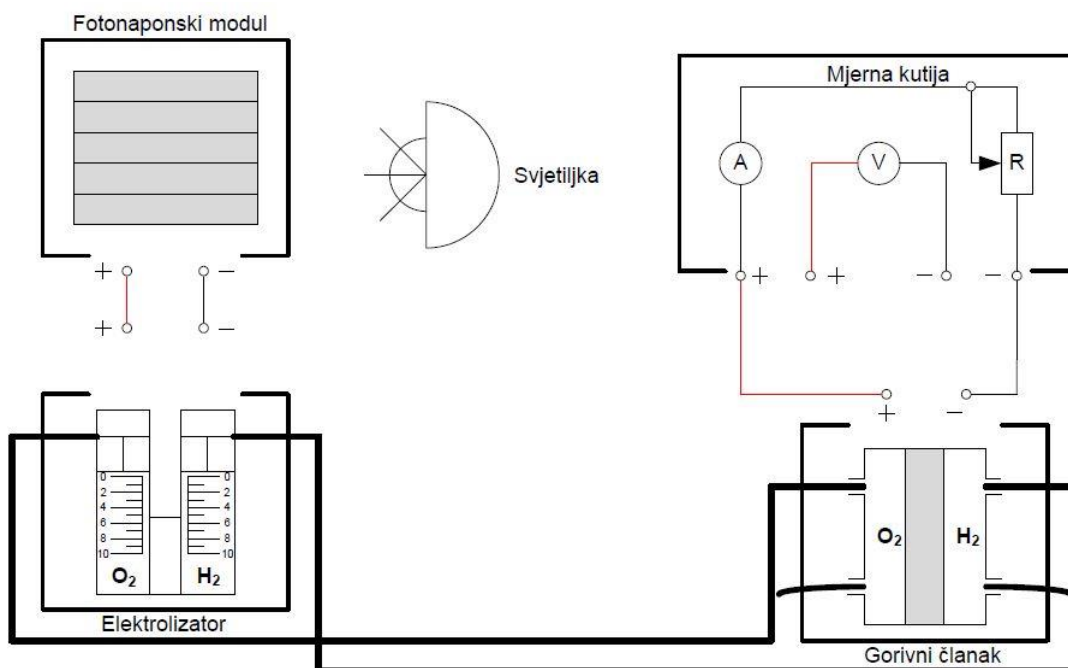
Tablica 5.1: vrste gorivnih članaka, njihove kemijske reakcije i tehničke značajke [16]

Vrsta gorivnih članaka	Elektrolit	Reakcija na anodi	Slobodni ioni	Reakcija na katodi	Radna temperatura	Gorivo	Ciljana korisnost (eL) i područje snaga	Područje primjene
Članci na metanol (DMFC)	Polimerna membrana	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- + \text{CO}_2$	H^+	$3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	60-120°C	Metanol	40% 1W...1kW	Prijenosni izvori
Alkalni članci (AFC)	Kalijeva lužina	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	OH^-	$1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$	60-220°C	Vodik (ne tolerira CO_2)	65% 1kW...100 kW	Transport
Članci s polimernom membranom (PEMFC)	Polimerna membrana	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	H^+	$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	60-120°C	Vodik ($\text{CO} < 50$ ppm)	45 - 60% 1W...100kW	Vrlo široka: -stacionarni izvori - transport
Članci s fosforom kiselinom (PAFC)	Fosforna kiselina	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	H^+	$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	160-220°C	Vodik ($\text{CO} < 2\%$)	40 - 45% 10kW...1 MW	CHP* u javnim zgradama
Članci s rastopljenim karbonatom (MCFC)	Alkaljski karbonati	$\text{H}_2 + \text{CO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	CO_3^{2-}	$1/2\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	650°C	Prirodni ili bio plin	55 - 60% 100kW...1 0MW	CHP* u industriji
Članci s krutim oksidom (SOFC)	Metalni oksid - keramika	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} + 2\text{e}^-$	O^{2-}	$1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$	800-1000°C	Prirodni plin	60 - 65% 1kW - 10MW	CHP* u: -industriji -javnim zgradama -stambenim zgradama

CHP* – *Combined Heat and Power* (Kogeneracijsko postrojenje)

5.2 Eksperimenti s gorivim člankom

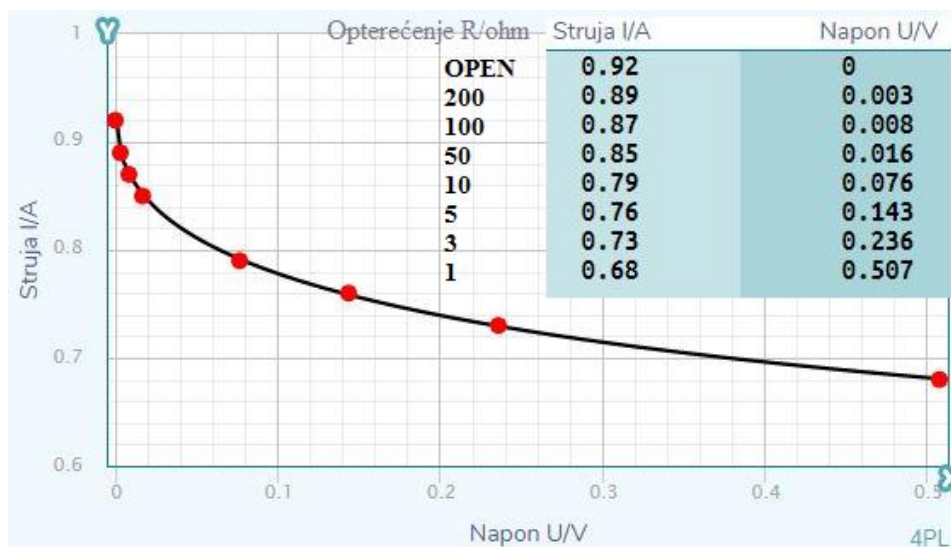
Cilj ovih mjerenja je ispitati ponašanje gorivnog članka i potrebno je naći odnos između struje i napona. Gorivni članak se s elektrolizatorom i ostalom opremom spaja na sljedeći način:



Slika 5.4: Shema spajanja - eksperiment broj 1. [8]

Kada je sustav spojen, a elektrolizator napunjen destiliranom vodom, potrebno je pozicionirati solarni modul na način da se osigura konstantna struja prema elektrolizatoru između 200 - 300 mA. Solarni modul i izvor svjetlosti moraju biti tako postavljeni da se osigura stacionarna proizvodnja vodika. Dalje se radi pročišćavanje sustava, uključujući elektrolizator, gorivni članak i cijevi, barem 5 minuta sa plinovima proizvedenim u elektrolizatoru. Zatim se postavlja izbornik na mjernom instrumentu na otpor od 3 Ω u iznosu od 3 minute. Ampermetar treba pokazivati iznos struje koji protječe. Nakon toga se solarni modul odspaja od elektrolizatora, te se začepe obje kratke cijevi na izlazu iz članka. Ponovno se priključi solarni modul s elektrolizatorom (plinovi se skupljaju u spremnicima). Isključi se napajanje prema elektrolizatoru kada razina vodika u spremniku dostigne oznaku od 10,0 ml. Prati se napun i struja kada opterećenje varira od

„OPEN“ položaja pa sve do krajnjeg položaja „LAMP“ i „MOTOR“. Dobivaju se rezultati koju su slikom 5.5 prikazani u nastavku.



Slika 5.5: Karakteristična krivulja uz izmjerene podatke.

Dalje slijedi eksperiment kojim se uspoređuje stvarni i teoretski volumen vodika te određuje Faradayeva efikasnost. U eksperimentu se i uspoređuje iznos električne energije proizvedene u gorivnom članku i energije koja se oslobađa izgaranjem vodika, te računa energetska efikasnost gorivnog članka. Kada se nakupi dovoljno vodika, provodi se prazno mjerenje kako bi se zabilježili gubitci vodika iz spremnika zbog izvjesnih curenja u sustavu. Radi se bez opterećenja u periodu od 5 minuta (ml/min). S gorivnim člankom se poveže voltmetar, a otpor se postavlja na 3Ω . Zatim se bilježi količina vodika koja se konzumira u gorivnom članku iz spremnika vodika u periodu od 180 sekundi. Također, mjeri se i bilježi napon i struja. Praznog mjerenje: $t = 5 \text{ min}$, $dV = 1,5 \text{ cm}^3$. Prema tome slijedi da je curenje $0,3 \text{ cm}^3/\text{min}$, a to dobijemo tako da količinu dV podjelimo sa vremenom t . Tako je u 180 sekundi količina vodika $0,9 \text{ cm}^3$. Gorivni članak troši Vol_{stvari} : $Vol_{srednje} - \text{curenje} = 5,6 \text{ cm}^3$ u periodu od 180 s i pri struji od 233 mA. Slika 5.6 je dobivena tablica.

$R =$	3Ω	$I =$	233 mA	$Vol_3 =$	$6,4 \text{ cm}^3$
$t =$	180 s	$Vol_1 =$	$6,5 \text{ cm}^3$	$Vol_{srednja} =$	$6,5 \text{ cm}^3$
$U =$	$0,74 \text{ V}$	$Vol_2 =$	$6,6 \text{ cm}^3$		

Slika 5.6: Tablica s rezultatima

Faradayeva efikasnost gorivnog članka (5.1):

$$\eta = \text{Vol}_{\text{H}_2}(\text{teor.}) / \text{Vol}_{\text{H}_2}(\text{eksp.}) \quad (5.1)$$

Faradayeva efikasnost je odnos između teoretskog volumena koji je potrošen u gorivnom članku od strane potrošača pri određenoj struji, te eksperimentalno utvrđenog (stvarnog) volumena. Faradayeva efikasnost bi trebala biti u idealnom slučaju 100 %.

Teoretski volumen se može odrediti prema (5.2):



1 mol vodika daje 2 mola elektrona. 1 mol elektrona ima naboj 96500 C, odnosno 2400 cm³ vodika daje (2 * 96500 C)=193000 C.

U ovom eksperimentu (5.3):

$$\text{Vol}_{\text{H}_2}(\text{teor.}) = (0,233 \text{ A} * 180 \text{ s} * 24000 \text{ cm}^3) / 193000 \text{ C} = 5,2 \text{ cm}^3 \quad (5.3)$$

Faradayeva efikasnost (5.4):

$$\eta = 5,2 \text{ Vol}_{\text{H}_2}(\text{teor.}) / 5,6 \text{ Vol}_{\text{H}_2}(\text{eksp.}) = 93 \% \quad (5.4)$$

Faradayeva efikasnost može biti manja od 100 % radi:

- Simultanih elektrokemijskih reakcija u članku, koje uključuju nekoliko elektrona za istu količinu konzumiranog vodika.
- Kemijskih reakcija između vodika i kisika na katalizatoru (katalitičko izgaranje)
- Curenje vodika i kisika kroz membranu

η = električna energija/teoretska energija konzumiranog vodika

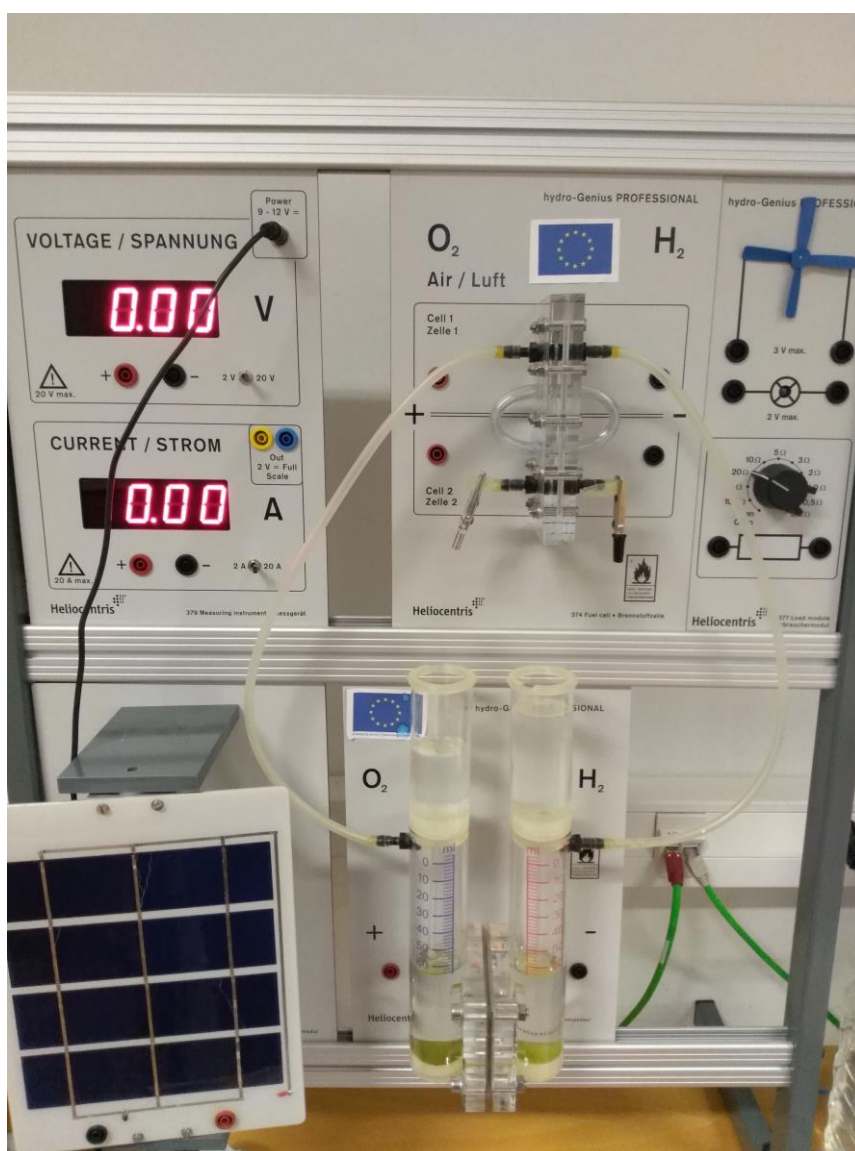
Teoretska energija konzumiranog vodika se dobiva na slijedeći način:

$$E_{\text{H}_2} = (5,6 \text{ Vol}_{\text{stvarni}} \text{cm}^3 * 286000 \text{ Jmol}^{-1}) / 24000 \text{ cm}^3 \text{mol}^{-1} = 66,7 \text{ J} \quad (5.5)$$

$$\eta = (0,74 \text{ V} * 0,233 \text{ A} * 180 \text{ s}) / E_{\text{H}_2} = 0,47 \quad (5.6)$$

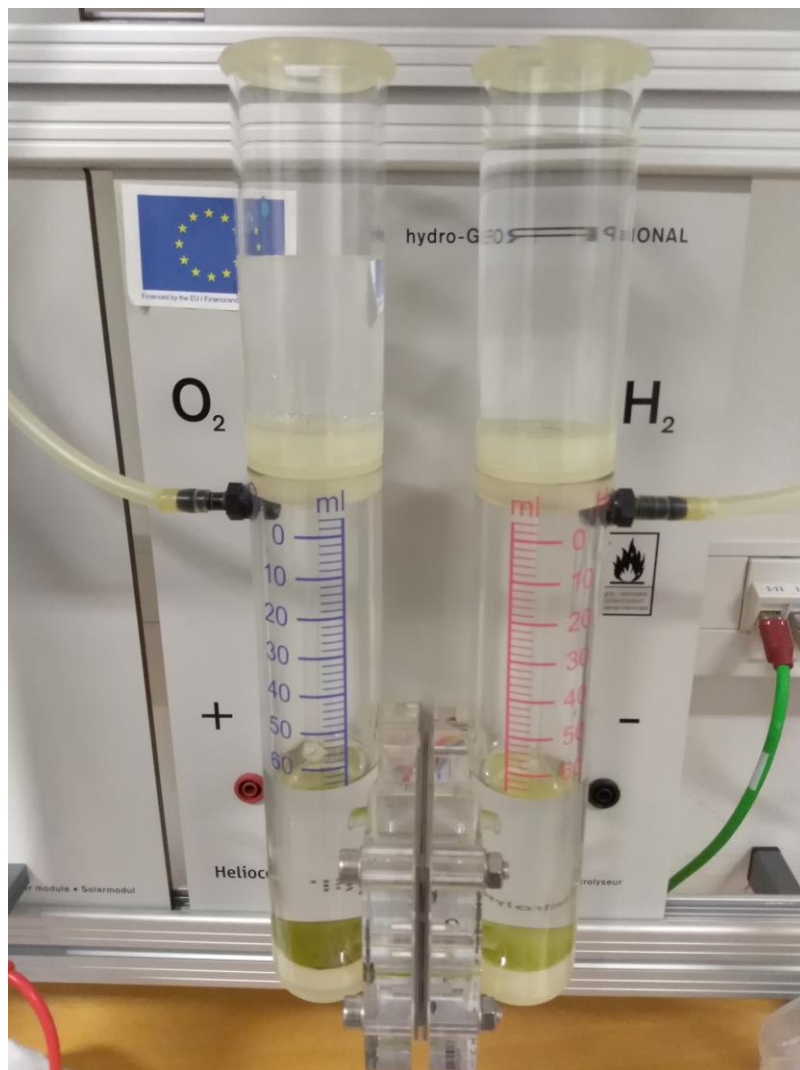
6. Didaktička ploča

Eksperimenti, odnosno mjerenja rađena su na didaktičkoj ploči „Dr. Fuel Cell – Professional“ koja je vidljiva na slici 6.1. Radi se o sustavu za profesionalno osposobljavanje koji reprezentira kompletni solarno-vodikov ciklus. Električnu energiju generira solarna ploča u koju je potrebno usmjeriti svjetlost, električna energija napaja elektrolizator koji odvajanjem iz vode skladišti vodik, te gorivni članci taj isti vodik koriste kako bi napajale trošila.

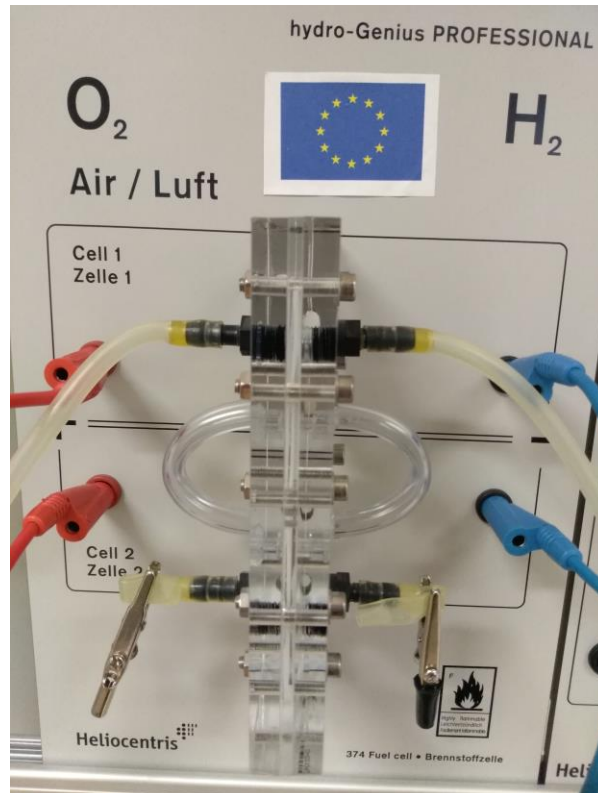


Slika 6.1: Didaktička ploča sustava solar-vodik

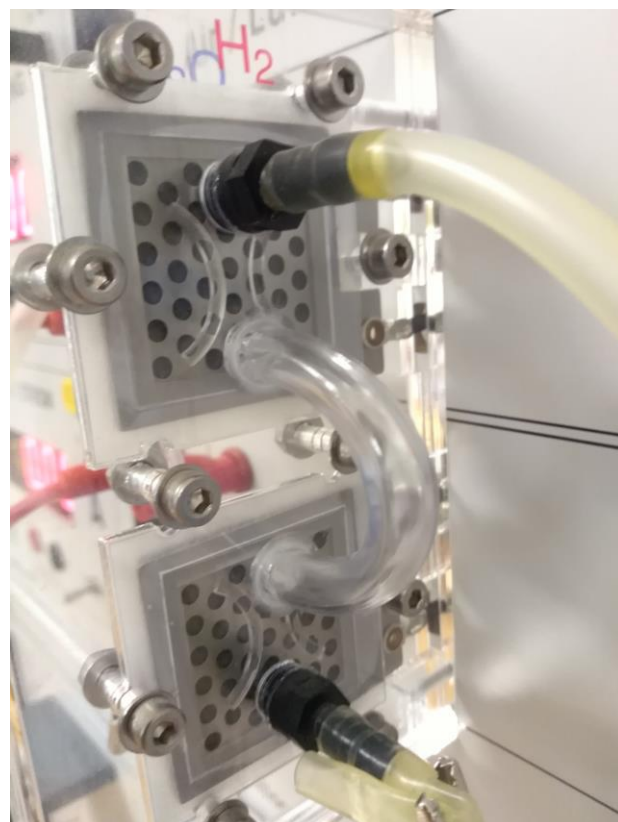
Na ploči za učenje i prezentacije nalazi se četveroćelijska solarna ploča koja se može se okrenuti u svom okviru radi lakšeg poravnjanja prema izvoru svjetlosti. Pomoću nje se proizvodi električna energija potrebna elektrolizatoru iz slike 6.2, koji se također nalazi na ploči. Zahvaljujući PEM tehnologiji, radi s destiliranom vodom i ne zahtijeva kaustične otopine ili kiseline. Tu se nalazi i snažna dvostruka gorivna ćelija koju predstavljaju slika 6.3 i slika 6.4. Dvije gorivne ćelije mogu se povezati paralelno i u seriju. Također, koristila su se trošila, te mjerni instrumenti koji se nalaze na didaktičkoj ploči.



Slika 6.2: Elektrolizator



Slika 6.3: Gorivni članci – prednja strana



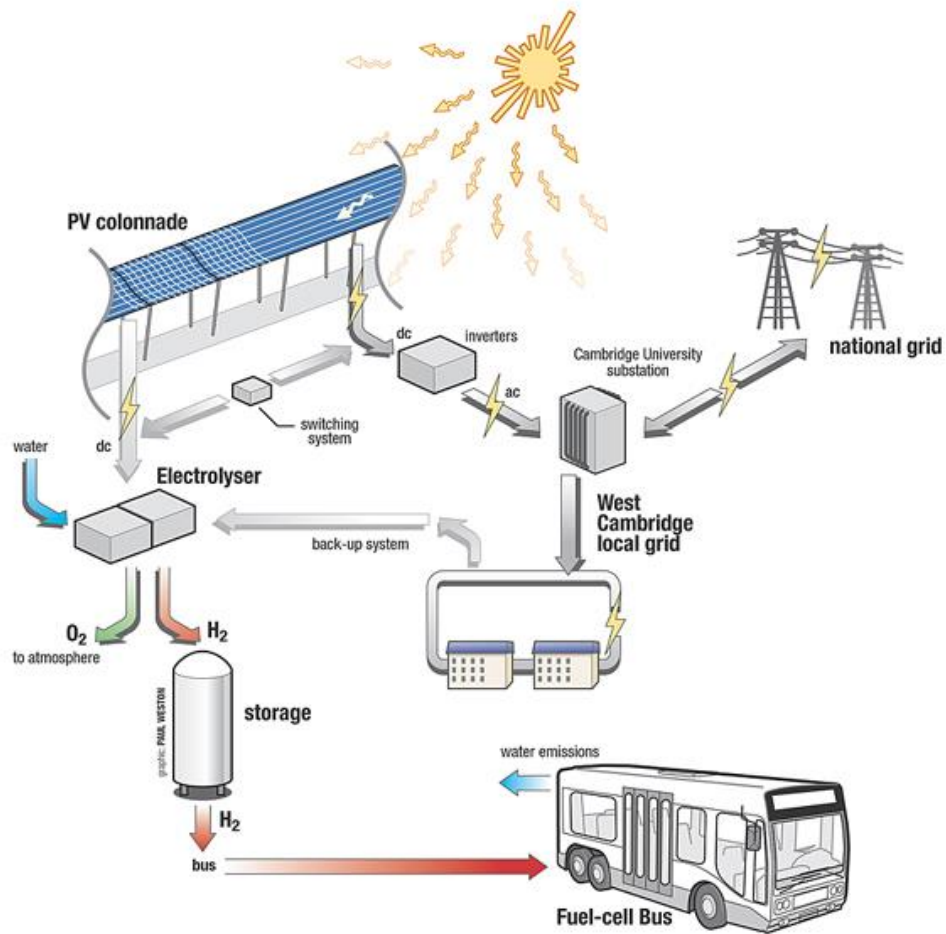
Slika 6.4: Gorivni članci – bočna strana

7. Vodik kao pogonsko gorivo

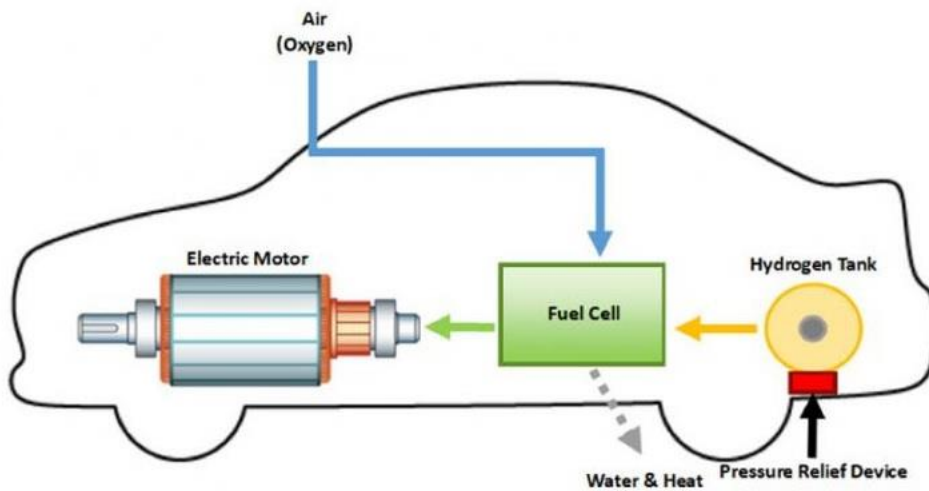
U vozilima kojima je vodik gorivo koriste se gorivni članci koji služe za dobivanje električne energije iz vodika smještenog u spremniku. Što se današnjega prijevoza tiče, vodik ima ulogu zamijene današnjih energenata: benzina, dizela i slično. Ta goriva služe za pogone mnogih vrsta vozila kao i plovila, no njihova je efikasnost mala, štetnost velika, a i njihova se količina u svijetu smanjuje. Vodik se iz spremnika, koji je smješten u vozilu, pušta u gorivni članak. Gorivni članak tada daje električnu energiju i napaja elektromotor na pogonskim kotačima, odnosno pokreće propelera ako je u pitanju plovilo.

Područje prijevoza je danas prvi među svim zagađivačima zraka zbog čega se sve više radi na razvoju električnih automobila koji bi koristili vodik kao gorivo. Ako bi se koristili obnovljivi izvori energije za elektrolizu vode, te bi se dobiveni vodik dalje koristio u gorivnim člancima, tada bi cijeli proces imao emisiju zagađenja 0. Takav vodik se može nazvati „zeleni vodik“. Stupanj korisnog djelovanja gorivih ćelija je oko 60 % što je oko 2 puta je veće od stupnja djelovanja motora s unutarnjim izgaranjem (do 30 %). Cijena gorivnih članka je još jako velika, no cijene im polako padaju. S druge strane, ulaganje se isplati jer se mnogo i dobiva. Elektrane vodikovih vozila pretvaraju kemijsku energiju vodika u mehaničku energiju ili spaljivanjem vodika u motorima s unutarnjim izgaranjem, ili reakcijom vodika i kisika u ćeliji za pokretanje elektromotora. Zanimljiva je činjenica da su svi poznati proizvođači automobila predstavili svoja vozila koja će koristiti vodik kao pogonsko gorivo. Također, danas je već mnogo autobusa koje u javnome prijevozu pokreće vodik. Vodik koriste mnoge svemirske letjelice za raketni pogon, mnogi zrakoplovi, te neke podmornice. Problem za vozila koja koriste vodik danas je taj što još uvijek nisu razvijene stanice za proizvodnju i transport, odnosno postaje i punionice vodikom.

Slika 7.1 prikazuje korištenje fotonaponskih panela i vodika za prijevoz, dok slika 7.2 prikazuje kako se koristi gorivni članak u automobilu.



Slika 7.1: Sustav solarne energije i vodika [17]



Slika 7.2: Pokretanje električnog motora u automobilu pomoću vodika [18]

7.1 Princip rada vodikovih vozila i prednosti

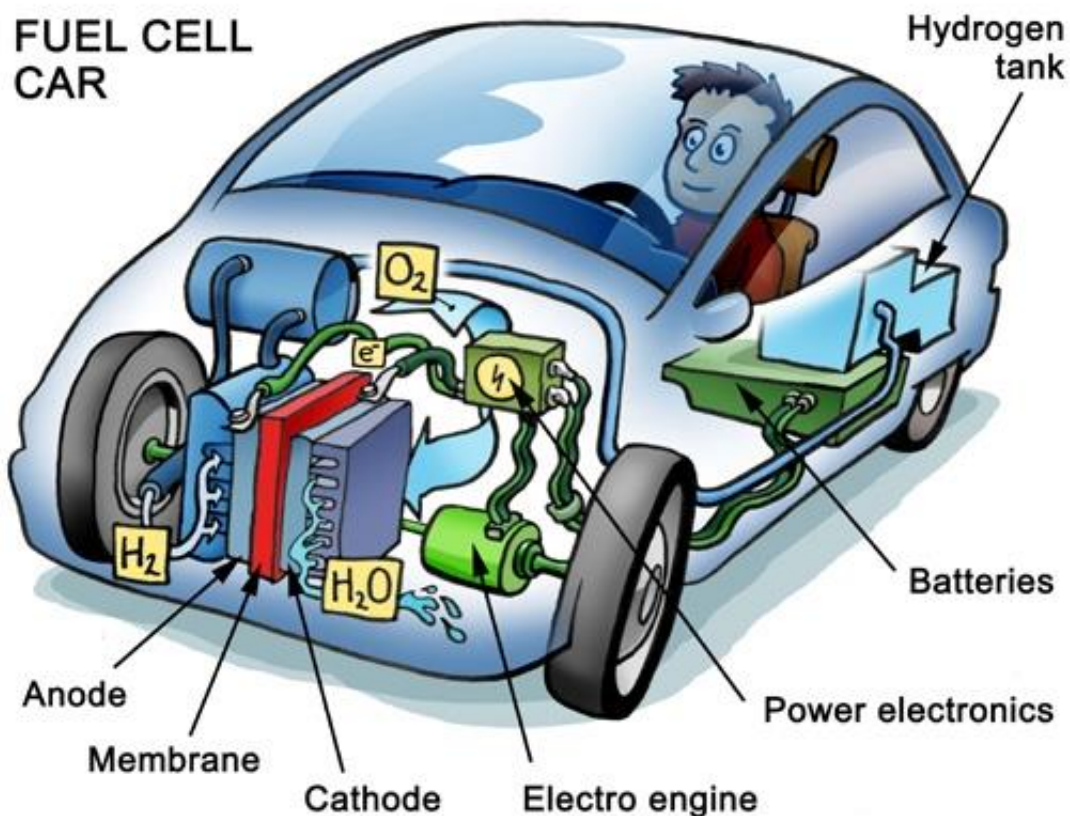
Automobili s vodikovim gorivnim ćelijama pokreću se električnim motorom i stoga se klasificiraju kao e-automobili. Uobičajena kratica je FCEV, skraćena od „Fuel Cell Electric Vehicle“ (električno vozilo s gorivim ćelijama), za razliku od BEV ili „Battery Electric Vehicle“ (električno vozilo na baterije).

Jedna je presudna razlika između automobila s vodikovim gorivnim ćelijama i ostalih električnih vozila - automobili s vodikom sami proizvode električnu energiju. Dakle, za razliku od potpuno električnih ili priključnih hibridnih vozila, vozilo ne dobiva snagu iz ugrađene baterije koja se može puniti iz vanjskog izvora napajanja. Umjesto toga, automobili s vodikom učinkovito imaju svoju vlastitu učinkovitu elektranu: gorivu ćeliju.

Kako je već objašnjeno, u tehnologiji gorivih ćelija odvija se proces poznat kao reverzna elektroliza, u kojem vodik reagira s kisikom u gorivoj ćeliji. Vodik dolazi iz jednog ili više spremnika ugrađenih u FCEV, dok kisik dolazi iz okolnog zraka. Jedini rezultati ove reakcije su električna energija, toplina i voda koja se kroz ispuh emitira kao vodena para. Tako su automobili na vodikov pogon lokalno bez štetnih emisija.

Električna energija koja se generira u gorivoj ćeliji vodikovog motora može proći dva puta, ovisno o zahtjevima određene situacije u vožnji. Ili teče prema električnom motoru i izravno napaja FCEV ili puni bateriju koja pohranjuje energiju dok ne zatreba za motor. Ova baterija, poznata kao Peak Power Battery, znatno je manja i samim time lakša od baterije potpuno električnog automobila, jer se gorivom ćelijom neprestano puni.

Kao i drugi e-automobili, i vozila s vodikom mogu povratiti energiju kočenja. Elektromotor pretvara kinetičku energiju automobila natrag u električnu energiju i napaja je u rezervnu bateriju.



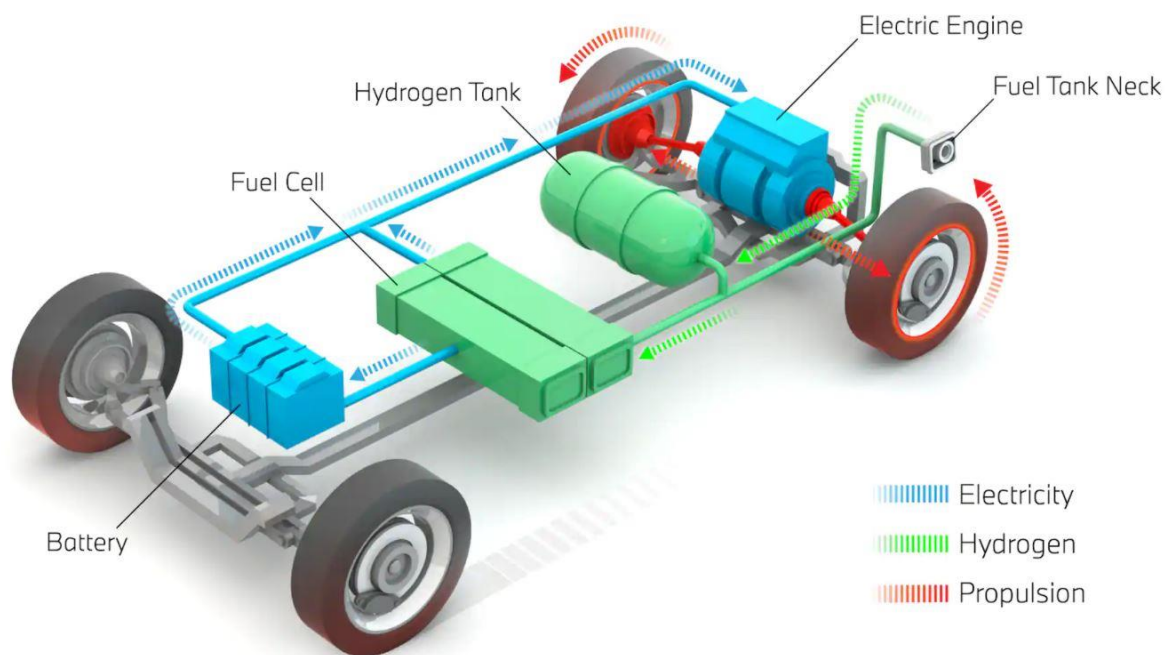
Slika 7.3: Shematski prikaz vozila s gorivnim člankom [24]

Prednosti za korisnike ovakvih automobila ima mnogo, a u nastavku će biti opisane neke od njih. Prva prednost je da pogon u automobilima s vodikovim gorivnim ćelijama je isključivo električni. Praktički nema buke motora i živahnog su starta, jer elektromotori pružaju puni okretni moment čak i pri malim brzinama.

Još jedna prednost je brzo vrijeme punjenja. Ovisno o punionici i kapacitetu baterije, potpuno električnim vozilima trenutno je potrebno između 30 minuta i nekoliko sati za potpuno punjenje. S druge strane, spremnici za vodik automobila s gorivim ćelijama puni su i spremni za polazak za manje od pet minuta.

Za sada automobili s vodikom imaju i dalje veći domet od čisto električnih automobila. Pun spremnik vodika trajat će oko 300 milja (približno 480 kilometara). Automobili na baterije mogu to usporediti s vrlo velikim baterijama - što će pak dovesti do povećanja težine vozila i vremena punjenja. Doseg vozila s gorivim ćelijama ne ovisi o vanjskoj strani temperatura. Drugim riječima, ne pogoršava se u hladnom vremenu.

Alternativni pogonski sustavi dizajnirani su za smanjenje emisije onečišćujućih tvari, posebno CO₂ koji šteti klimi, ali i drugih štetnih plinova poput dušikovog oksida. Ispušni plinovi s vodikovim motorom sastoje se od čiste vodene pare. Stoga je tehnologija vodikovih gorivnih ćelija lokalno bez emisija. To znači da održava zrak čistim u gradovima, ali štiti li istovremeno klimu? To ovisi o uvjetima pod kojima je proizveden vodik za vozila s gorivim ćelijama. Za proizvodnju vodika potrebna je električna energija. Ova električna energija koristi se za razgradnju vode na sastavne elemente, vodik i kisik, postupkom elektrolize. Ako se električna energija koristi iz obnovljivih izvora energije, proizvodnja vodika ima neutralni ugljični otisak. Ako se, pak, koriste fosilna goriva, to će u konačnici imati utjecaj na ugljični otisak automobila s gorivim ćelijama koji koriste vodik. Koliko je snažan taj učinak ovisi o korištenoj mješavini energije. U tom se pogledu automobili s vodikovim gorivnim ćelijama ne razlikuju od ostalih električnih vozila.



Slika 7.4: Princip rada električnog vozila s gorivim člankom [25]

7.2 Cepelin

Cepelinovo ime dolazi od Ferdinanda von Zeppelina koji je bio prvi konstruktor takvog zrakoplova. Naziva se i dirižabl što dolazi od francuske riječi „dirigeable“ (upravljiv). To je zapravo zračni brod koji je moguće vidjeti na slici 7.5. Cepelin je zračna letjelica koja je lakša od zraka, a s vlastitim pogonom za upravljanje. Radi se o ogromnome tijelu (ovojnici) aerodinamičkoga vretenasta oblika napravljenog od tkanine ili lima. Puni se helijem ili vrućim zrakom, no u početku je to bio vodik pa se zapravo radi o prvom vozilu, tj. letjelici koja koristi vodik. Stalan oblik se može održavati krutom konstrukcijom ili stalnim nadtlakom plina unutar ovojnice. Zračni brod u suštini je opremljen i motorom koji ima propeler. Tu je i sustav za upravljanje aerodinamički oblikovanim pokretnim ploham, kao i gondola s prostorom za putnike i posadu. Od 1900. do 1940. godine bio je korišten putnički prijevoz, no i u vojne svrhe. Zbog njegove veličine, u današnje se vrijeme koristi za razgledavanja i promoviranja tvrtki u vrijeme velikih događanja kao što su manifestacije, koncerti i dr. Za takvu letjelicu se može reći da je to aerostat zato što uz lebdenje koristi motorni pogon za upravljanje, inače bi to bio obični balon. Jedan od zračnih brodova koji je bio punjen vodikom zvao se Hindenburg. Vodikom su se prestale puniti takve letjelice nakon što se Hindenburg 1937. godine zapalio i srušio.



Slika 7.5: Cepelin u letu 1933. [19]

8. Budućnost vodika

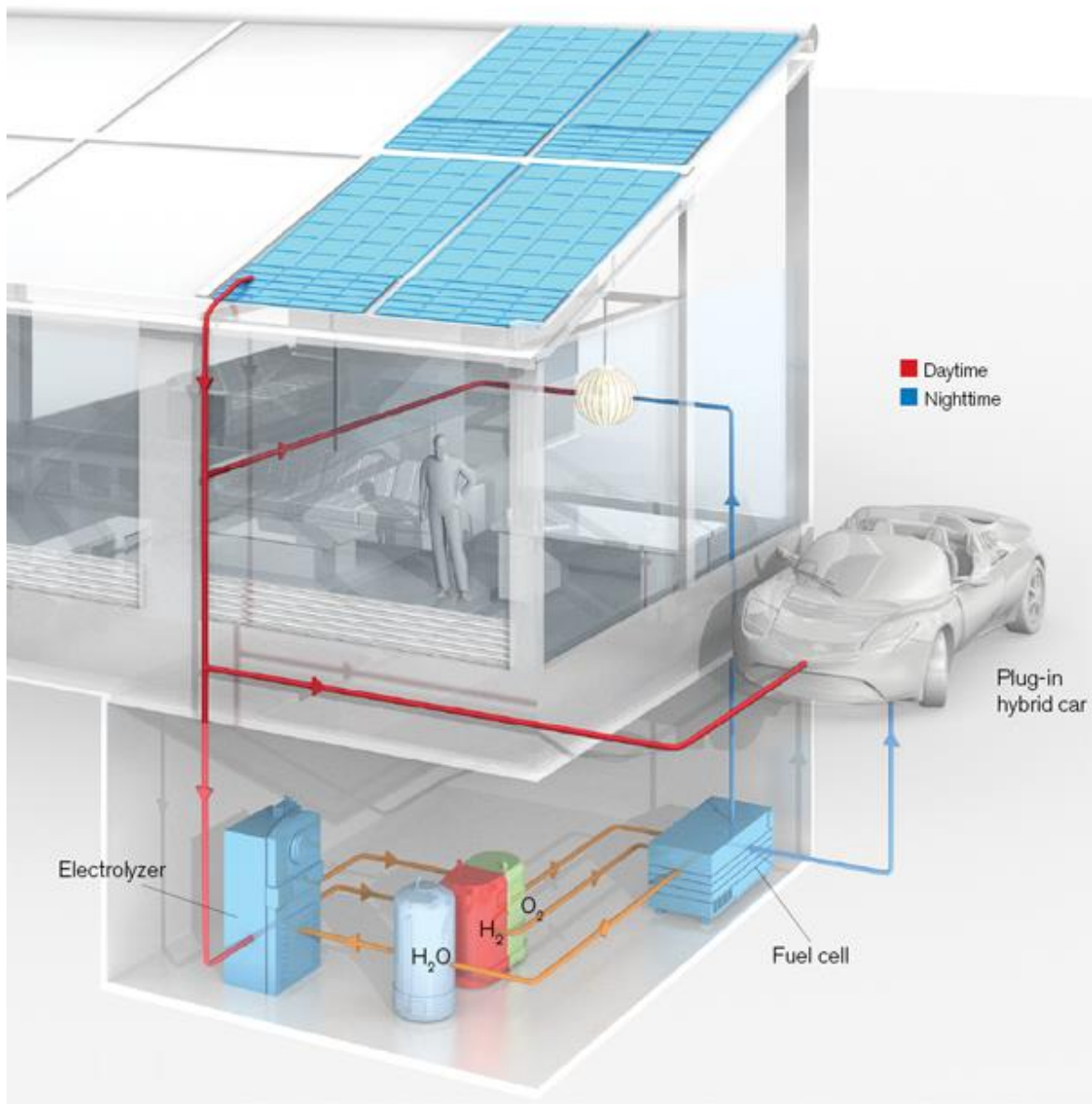
Vodik ima potencijal dekarbonizirati proizvodnju električne energije, transport i toplinu. To je zato što se proizvodi elektrolizom - koristeći se električnom energijom za razdvajanje vode (H_2O) na vodik i kisik - vodik ne stvara nikakve onečišćujuće tvari.

Možda je trenutno najpoznatija upotreba vodika u transportu. Kod električnih vozila vozače često brine njihov dolet i vrijeme potrebno za punjenje. Električna vozila s gorivim ćelijama, koja rade na vodik, izbjegavaju ove probleme, jer imaju duži dolet, puno brže vrijeme punjenja gorivom i zahtijevaju malo promjena u ponašanju. Automobilske industrije su uvjerenе da vodik može u budućnosti dati važan doprinos održivoj mobilnosti uz BEV - pod uvjetom da postoji potrebna vodikova infrastruktura koja nudi dobru cijenu vodika, a cijena vozila padaju. U tim okolnostima, automobili s vodikovim gorivnim ćelijama mogu biti tehnologija nulte emisije koja omogućava korisnicima da održe fleksibilne navike vožnje na koje su navikli.

U to je uvjerenо i Vijeće za vodik, globalna inicijativa vodećih energetske, transportne i industrijske tvrtke. Vijeće ne vidi vodik samo kao održivo buduće sredstvo za pogon vozila na gorivne ćelije, već i kao čisti izvor energije za grijanje, električnu energiju i industriju.

Vodik se također može koristiti za grijanje naših domova. Može se miješati s prirodnim plinom ili spaljivati samostalno. Za njezin transport mogla bi se koristiti postojeća plinska infrastruktura, čime bi se izbjegli mrežni troškovi povezani s većom elektrifikacijom topline. Jednom proizveden, vodik bi mogao djelovati i kao kratkoročno i kao dugoročno skladište energije. Pristalice sugeriraju da se višak obnovljive energije - proizveden, na primjer, kad vjetar puše noću - može iskoristiti, a vodik proizveden tom električnom energijom može se pohraniti u slane kaverne ili visokotlačne spremnike.

Slika 8.1 dočarava ideju kako bi se u kućanstvu mogao proizvoditi i koristiti vodik. Ako se na kuću dodaju solarne ploče i eventualno spremnici za prikupljanje kišnice, a unutra pretvarači, baterije, elektrolizator, gorivne ćelije, spremnici za vodik, te crijeva, ventili i priključci, dobije se savršeni sustav koji korištenjem Sunčeve energije i vode može dom napajati električnom energijom tijekom cijele godine. Isto vrijedi i za zgrade, tvrtke i razna postrojenja.



Slika 8.1: Ilustracija kuće budućnosti [26]

9. Zaključak

Kako vrijeme odmiče, s razvijanjem industrije, tehnologije i gospodarstva, potražnja za gorivima je sve veća i veća. Zbog sve manjih zaliha najkorištenijih goriva, koja su također i sve skuplja, te su najveći zagađivači, raste zainteresiranost za obnovljive izvore energije, a tu nastupa i vodik. Uzmemo li u obzir sve prednosti i nedostatke vodika kao goriva, vodik bi bez sumnje mogao postati novi i najbolji oblik goriva. Alternativno gorivo mora biti tehnički izvedivo, ekonomski isplativo, lako pretvorljivo u drugi oblik energije kada sagorijeva, biti siguran za upotrebu i potencijalno neškodljiv za okoliš. Vodika ima u izobilju. Iako vodika nema slobodnog u prirodi, može se proizvesti iz različitih izvora poput reformacije prirodnog plina, plinifikacije ugljena i elektrolize vode. Korištenjem energije Sunca, odnosno energije svjetlosnog zračenja za dobivanje vodika, u budućnosti imamo korisno gorivo s 0 štetne emisije. Vodikov plin može se koristiti u tradicionalnom benzinskom pogonu motora s unutarnjim izgaranjem (ICE). Međutim, vozila s PEM gorivnim člancima pružaju veću učinkovitost. Oni u osnovi kombiniraju energetske gustoću i praktičnost tekućih goriva s čistim i učinkovitim radom električnih vozila. Iako određeni aspekti tehnologije, poput učinkovitog skladištenja ili transporta, još uvijek trebaju određena poboljšanja, nema razloga zašto vodik ne bi mogao postati jednako prikladno i atraktivno gorivo za transport kao što su to danas dizel i benzin. Osim u prometu, vodik bi se mogao sve više početi koristiti i u kućanstvima, poljoprivredi i drugdje. Iz samih mjerenja, koja su rađena kako bi se prikazalo dobivanje vodika i njegova daljnja upotreba, može se vidjeti kako je efikasnost proizvodnje vodika elektrolizom preko 98 %, a energetska učinkovitost gorivnog članka oko 93 %.

10. Literatura

- [1] <https://enciklopedija.hr/> (25.06.2020.)
- [2] Edutorij e-škole. Fizika 1 – Energija. Dostupno na: https://edutorij.e-škole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/8b109d99-b37e-4aa4-821c-ab1d3c48e3d6/html/1738_Energija.html (25.06.2020.)
- [3] UT Institute of Agriculture. Solar and Sustainable Energy [Online]. Dostupno na: <https://ag.tennessee.edu/solar/Pages/default.aspx> (18.06.2020.)
- [4] Bazgin d.o.o. Autonomni otočni solarni sistemi. Dostupno na: http://www.bazgin.hr/autonomni_otocni_fotonaponski_solarni_sistemi.html (19.06.2020.)
- [5] Frano Barbir. Gorivi članci – Dio 2 – Vodikove tehnologije. Prezentacija (.pdf dokument). 2010. (07.07.2020.)
- [6] Encyclopedia Britannica. Science/hydrogen. Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/hydrogen> (25.06.2020.)
- [7] Goran Bukan. Periodni sustav elemenata. Plastificirana tablica. 2015. Dostupno na: <https://shop.skolskknjiga.hr/periodni-sustav-elemenata.html> (25.06.2020.)
- [8] Frano Barbir. Vodik i gorivni članci. Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu. Radna knjiga. (25.09.2020.)
- [9] Franković Bernard, Jedriško Claudia, Lenić Kristian, Trp Anica. Istraživanja i razvoj tehnologije vodika. Radovi u zbornicima skupova, cjeloviti rad. 2000. Str.2 (07.07.2020.)
- [10] Sanja Lukić, Ivana Marić Zerdun, Nataša Trenčevska, Marijan Varga, Sonja Rupčić Petelinc. Kemija 7 - udžbenik kemije s dodatnim digitalnim sadržajima u 7. razredu osnovne škole. 2019. Dostupno na: <https://www.e-sfera.hr/prelistaj-udzbenik/a0123dec-d412-4aff-9df2-7a082813da27> (26.06.2020.)
- [11] Wikipedija. Teška voda. 2015. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Te%C5%A1ka_voda (26.06.2020.)
- [12] Šljivac Damir, Šimić Zdenko. Obnovljivi izvori energije s osvrtom na štednju. Elektrotehnički fakultet Osijek. (2007). (07.07.2020.)

- [13] https://www.researchgate.net/figure/Water-decomposing-in-an-electrolysis-cell-8_fig3_317000023 (07.07.2020.)
- [14] https://www.researchgate.net/figure/Experimental-system-for-the-alkaline-water-electrolysis-coupled-with-solar-PV-energy_fig1_272015073 (31.07.2020.)
- [15] <https://www.power-technology.com/comment/standing-at-the-precipice-of-the-hydrogen-economy/> (31.07.2020.)
- [16] <https://www.ieee.hr/download/repository/DR09MSinko.pdf> (31.07.2020.)
- [17] <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/toplinska-energija/gorivni-lanci.html> (01.08.2020.)
- [18] <https://www.firehouse.com/rescue/article/12385113/hydrogen-fuel-cell-vehicles-what-first-responders-need-to-know-firehouse> (01.08.2020.)
- [19] <https://www.nbcnews.com/mach/science/zeppelins-stopped-flying-after-hindenburg-disaster-now-scientists-want-bring-ncna1043911> (01.08.2020.)
- [20] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/4874fe79-8302-4ea2-b516-4657ea249026/kemija-7/m02/j03/index.html> (31.08.2020.)
- [21] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319916304232> (31.08.2020.)
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/William_Robert_Grove (31.08.2020.)
- [23] <https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/1dfb994c6994a20539bb4a57038fd23bc487b007/3-Figure1-1.png> (31.08.2020.)
- [24] <https://www.moneyshake.com/shaking-news/miscellaneous/battery-vehicles-vs-hydrogen-fuel-cell-cars> (31.08.2020.)
- [25] https://www.bmw.com/content/dam/bmw/marketBMWCOM/bmw_com/categories/Innovation/wasserstoff/neu/ws-02-media-hd-en.png.asset.1593417739288.png (25.09.2020.)

11. Oznake i kratice

FN – fotonaponski

PEM – eng. Proton-exchange membrane

H₂O – voda

itd. – i tako dalje

dr. – drugo

W – vat

kWh – kilo vat po satu

m² – metar kvadratni

TWh – tera vat po satu

TJ – tera džul

°C – stupanj celzijus

K – Kelvin

UI – napon - struja

MPP – točka maksimalne snage (Maximum Power Point)

EJ – eksa džul (10¹⁸)

Pa – pascal

OIE – obnovljivi izvori energije

ICE - internal combustion engines

12. Sažetak

Naslov: Vodik gorivo budućnosti

Što se tiče teme ovog završnog rada, ona je izrečena u samome naslovu. Radi se o kemijskom elementu koji je najrasprostranjeniji, a jednostavan za dobivanje. Jedan od ciljeva ovoga rada je stvoriti sliku o energiji, odnosno gorivima općenito. No, najbitniji cilj je objasniti zašto je vodik toliko koristan i kako bi on mogao postati gorivo budućnosti u kućanstvu, prometu itd. U radu se spominju obnovljivi izvori energije, vozila pogonjena vodikom, kao i prva letjelica koja je koristila vodik. Objasnjeno je dobivanje vodika i opisana elektroliza vode, što je potkrijepljeno eksperimentima. Uz to, napravljeni su eksperimenti i za, u radu opisane, gorivne članke. Podaci su većinom preuzeti s interneta ili pročitani u e-udžbenicima, dok su eksperimenti rađeni na didaktičkoj ploči u Tehničkoj školi Ruđera Boškovića, u Zagrebu.

Ključne riječi: vodik, gorivo, energija

13. Abstract

Title: Hydrogen as fuel of the future

As for the topic of this final paper, it is stated in the title itself. It is a chemical element that is the most common and easy to obtain. One of the goals of this paper is to create an image of energy, ie fuels in general. But the most important goal is to explain why hydrogen is so useful and how it could become the fuel of the future in households, transport, etc. The paper mentions renewable energy sources, hydrogen-powered vehicles, as well as the first aircraft that used hydrogen. Hydrogen production is explained and water electrolysis is described, which is supported by experiments. In addition, experiments were performed for the fuel cells which are described in the paper too. The data were mostly downloaded from the Internet or read in e-textbooks, while the experiments were done on a didactic board at the Ruđer Bošković Technical School, in Zagreb..

Keywords: hydrogen, fuel, energy

IŽJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>28. 09. 2020.</u>	IVAN BIŠKUP	<i>Biškup</i>

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

IVAN BIŠKUP

ime i prezime studenta/ice

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 28.09.2020.

Biškup
potpis studenta/ice