

# Primjena i razvoj vozila na vodik

---

**Rajić, Danijel**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:801484>

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

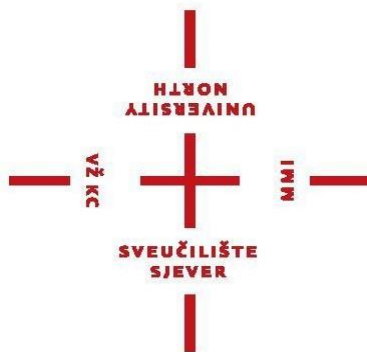
*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-15**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





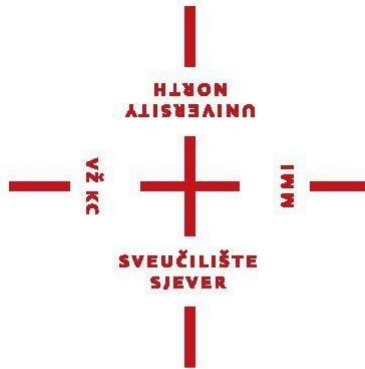
# Sveučilište Sjever

Diplomski rad br. 190/OMIL/2024.

## Primjena i razvoj vozila na vodik

Danijel Rajić, 0135080912

Koprivnica, siječanj 2024. godine



# Sveučilište Sjever

**Diplomski rad br. 190/OMIL/2024**

## **Primjena i razvoj vozila na vodik**

**Student:**

**Danijel Rajić, 0135080912**

**Mentor:**

**Izv. prof. dr. sc. Siniša Vilke**

Koprivnica, siječanj 2024. godine

Sveučilište Sjever  
Sveučilišni centar Varaždin  
104. brigade 3, HR-42000 Varaždin



## Prijava diplomskog rada

### Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za logistiku i održivu mobilnost		
STUDIJ	sveučilišni diplomski studij Održiva mobilnost i logistika menadžment		
PRISTUPNIK	Danijel Rajić	MATIČNI BROJ	0135080912
DATUM	4.1.2024.	KOLEGIJ	Promet i okoliš
NASLOV RADA	Primjena i razvoj vozila na vodik		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Application and development of hydrogen vehicles		
MENTOR	Izv. prof. dr. sc. Siniša Vilke	ZVANJE	Izvanredni profesor
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Izv. prof. dr. sc. Predrag Brlek, predsjednik		
	2. Izv. prof. dr. sc. Miroslav Drijača, član		
	3. Izv. prof. dr. sc. Siniša Vilke, član		
	4. Doc. dr. sc. Saša Petar, zamjenski član		
	5.		

### Zadatak diplomskog rada

BROJ 190/OMIL/2024

#### OPIS

Zadatak diplomskog rada je protumačiti osnovne značajke primjene vodika kao alternativnog goriva, analizirati njihove prednosti i nedostatke, te analizirati razvoj i korištenje cestovnih vozila koje kao gorivo koriste vodik.

U sklopu diplomskog rada zadan je prikaz koristi vozila s vodikovim gorivim stanicama u prijevozu te analiza primjene takvih vozila naročito s aspekta sigurnosti i zaštite okoliša.

Nadalje, zadatak diplomskog rada je obrazložiti primjenu vozila na vodik u urbanim sredinama te analizirati tendencije razvoja korištenja autobusa na vodik u javnom gradskom prijevozu putnika.

ZADATAK URUČEN

15.1.2024.

POTPIS MENTORA

Siniša Vilke

SVEUČILIŠTE  
SJEVER



## **Predgovor**

Želio bih iskoristiti priliku te se zahvaliti na mentorstvu poštovanom profesoru Izv. prof. dr. sc. Siniši Vilke, na susretljivosti i danim uputama potrebnim prilikom pisanja ovog diplomskog rada. Želim se zahvaliti na izuzetnom trudu i znanju koje mi je preneseno tijekom predavanja na kolegijima kojima je poštovani profesor Izv. prof. dr. sc. Siniša Vilke bio nositelj. Na znanju i iskustvu koje je stekao dugogodišnjim radom ne samo u znanstvenom području već i šire, a koje je s radošću podijelio s nama studentima kako bi nam ukazao na ono što nas čeka po završetku studija. To znanje uvelike mi je pomoglo kod pisanja diplomskog rada, a isto tako će mi koristiti i u daljnjoj karijeri u području logistike.

Zahvaljujem se svojim kolegicama i kolegama uz koje je studiranje bilo interesantnije, zanimljivije, lakše i zabavnije.

Na kraju bih se zahvalio svojoj obitelji, a posebno svojoj supruzi i kćeri koji su za vrijeme mogeg školovanja bili strpljivi i najveća mi podrška.

## Sažetak

Urbani razvoj ima važan utjecaj na potrošnju energije u prometu. Razvoj javnog prijevoza jedan je od važnih načina smanjenja potrošnje energije gradskog prijevoza. Vrlo je hitno unaprijediti tehnologiju kako bi se konstantno smanjivala potrošnja energije i emisije vozila. Popularizacija vozila na vodikove gorive ćelije trend je buduće automobilske industrije, koja može učinkovito smanjiti potrošnju energije u prometu i ublažiti gradsko onečišćenje.

Ovaj rad analizira primjenu i razvoj vozila s vodikovim gorivim ćelijama u prijevozu i gradskom javnom prijevozu.

Rast stanovništva uvelike će povećati potrošnju energije prijevoza, dok veći gradovi s razumnom prostornom gustoćom mogu smanjiti potrošnju energije u prometu. Štoviše, vozila na vodikove gorive ćelije mogu učinkovito smanjiti potrošnju energije i emisije onečišćenja u gradskim urbanim područjima.

**Ključne riječi: javni prijevoz, vozila na vodik, emisije onečišćenja, inovativna tehnologija, čišći okoliš, vodikove ćelije.**

## Summary

Urban development has an important impact on energy consumption in transport. The development of public transport is one of the important ways of reducing the energy consumption of urban transport. It is very urgent to improve technology in order to constantly reduce energy consumption and vehicle emissions. The popularization of hydrogen fuel cell vehicles is the trend of the future automobile industry, which can effectively reduce energy consumption in traffic and alleviate urban pollution.

This paper analyzes the benefits of vehicles with hydrogen fuel cells in urban public transport.

Population growth will greatly increase public transport energy consumption, while larger cities with reasonable spatial density can reduce transport energy consumption. Moreover, hydrogen fuel cell vehicles can effectively reduce the energy consumption and pollution emissions of urban transport during operation.

**Keywords: public transport, hydrogen vehicles, greenhouse gases, innovative technology, cleaner environment, hydrogen cells**

## **Popis korištenih kratica i stranih pojmova**

SUS – sa unutrašnjim sagorijevanjem

HHO - Hydrogen-Hydrogen-Oxygen (vodik-vodik-kisik)

PEM - Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Goriva ćelija s membranom za izmjenu protona)

CO – ugljikov oksid

CO<sub>2</sub> – ugljični dioksid

NO<sub>x</sub> – Natrij oksid

SO<sub>2</sub> – sumpor dioksid

CNG - Compressed Natural Gas (Komprimirani prirodni plin)

LH<sub>2</sub> Liquid hydrogen (Tekući vodik)

LOHC - Liquid Organic Hydrogen Carriers (Tekući organski nosači vodika)

HIICE - Hydrogen Internal Combustion Engines (Motori s unutarnjim izgaranjem na vodik)

OBD - On-board diagnostics (Ugrađena dijagnostika)

NaOH - Natrijev hidroksid

PWM -Pulse Width Modulator (Modulator širine pulsa)

PEM - Proton Exchange Membrane Fuel Cell

FCV - Fuel Cell Vehicles (vozila na gorive ćelije)

HRS - Hydrogen Refueling Station (stanice za punjenje vodikom)

BEV – Battery Equiped Vehicle ( vozilo sa pogonom na baterije)

## Sadržaj:

1. Uvod.....	1
1.1. Predmet istraživanja .....	1
1.2. Svrha i cilj istraživanja .....	2
1.3. Metode istraživanja.....	2
1.4. Kompozicija rada.....	2
1.5. Istraživačka hipoteza .....	2
2. Vodik .....	3
2.1. Svojstva i karakteristike vodika .....	3
2.2. Proizvodnja vodika .....	7
2.3. Skladištenje i transport vodika.....	10
3. Motori SUS na vodik .....	12
3.1. Karakteristike sagorijevanja vodika u motoru SUS .....	12
3.2. HHO sistem u vozilu .....	17
4. Vozila na gorive ćelije .....	23
4.1. PEM goriva ćelija .....	23
4.2. Vrste, prednosti i nedostaci gorivih ćelija.....	31
4.3. Primjena gorivih ćelija .....	37
4.4. Konstrukcija vozila na gorive ćelije .....	39
4.5. Parametri efikasnosti gorive ćelije .....	44
4.5.1. Termodinamički aspekt rada gorive ćelije.....	44
4.5.2. Strujni i naponski aspekt rada gorive ćelije i kinetika reakcija u gorivoj ćeliji .	46
4.6. Cijena i budući razvoj vozila na gorive ćelije .....	49
4.7. Budući razvoj vozila na gorive ćelije.....	50
4.8. Stanica za punjenje vodikom .....	51
5. Komparativna analiza različitih pogonskih motora.....	56



6. Sigurnost i ekologija vozila na vodik.....	64
6.1. Ekološka razmatranja vozila na vodik.....	64
6.2. Sigurnost vozila na vodik.....	68
7. Budućnost vodika kao goriva u javnom prijevozu.....	72
8. Zaključak.....	81
9. Literatura.....	834
10. Popis slika.....	87
11. Popis tablica.....	88
12. Popis grafova.....	89

# 1. Uvod

Do kraja prve četvrtine 2022. godine u svijetu je bilo 1.45 milijardi vozila, otprilike jedno vozilo dolazi na svakih sedam osoba. Isto tako po najnovijim istraživanjima, dokazano je da je količina nafte koja će biti dostupna ograničena. Današnja situacija se smatra vrhuncem iskorištenja naftnih derivata, pa će se u budućnosti dostupna količina fosilnih goriva znatno smanjiti. Radi toga je potrebno razmotriti alternativne izvore pogonskih energija u sustavu koji je troši najviše, a to je promet. Rješenje je svakako poboljšanje iskoristivosti motora s unutrašnjim izgaranjem, ali treba razvijati neke druge opcije za pogon motornih vozila. Rješenje budućnosti je zacijelo pogon vozila na vodik. Stoga ću u ovom radu pokušati predstaviti konstrukciju i varijante pogona vozila na vodik.

Kroz cjelokupni diplomski rad analizirat će se prednosti i nedostaci primjene alternativnih goriva kao i usporedba Otto vozila s vozilima na vodik, potrebna infrastruktura kojom bi se povećala njihova prisutnost u urbanom prometu te način na koji utječe njihova primjena i utjecaj na okoliš uvođenjem mjere pojedinih država.

Puno je prednosti vozila na vodik u odnosu na klasične sa unutrašnjim sagorijevanjem: nulta emisija stakleničkih plinova, smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima, povećana učinkovitost motora, manja količina buke i slično.

Za daljnji razvoj i globalnu primjenu vozila na vodik postoji još nekoliko značajnih prepreka koje je potrebno riješiti od kojih je najveća cijena proizvodnje vodika i proizvodnja vodika iz obnovljivih oblika energije. Napredak energetske učinkovitosti, materijali od kojih se izrađuju vozila, dizajn i poboljšana aerodinamičnost sigurno će omogućiti vozila na vodik u svakodnevnoj primjeni, a kada će vozila na vodik u potpunosti biti konkurentna klasičnim vozilima sa unutarnjim izgaranjem samo je pitanje vremena.

## 1.1. Predmet istraživanja

Predmet istraživanja ovog diplomskog rada odnosi se na vozila koja koriste vodik kao gorivo, te primjenu i razvoj vozila na vodik u prometu. Po svemu sudeći vozila na vodik su vrlo bitna tema u sadašnje vrijeme, te se za smanjenje zagađenja okoliša pokušava razviti veća učinkovitost i manja cijena samih motora a i dobivanja vodika kako bi se u budućnosti smanjila

emisija štetnih plinova. Ova tema je važna za cijeli prometni sektor, pa tako i održivi razvoj kako prometa tako i industrije u svijetu.

## **1.2. Svrha i cilj istraživanja**

Svrha i cilj rada je prije svega upoznati se sa samim pojmom „vozila na vodik“. U radu se želi saznati koje su prednosti i nedostaci vozila na vodik. Također, pokušava se saznati kada i na koji način su se vozila na vodik pojavila i kako su ona prihvaćena kao svakodnevno prijevozno sredstvo. Zatim će se analizirati i usporediti vozila na vodik sa konvencionalnim vozilima te utvrditi način razmišljanja u budućnosti u vezi primjene vozila na vodik.

## **1.3. Metode istraživanja**

Za pisanje ovog rada korištene su metode istraživanja koje se odnose na proučavanje i prikupljanje informacija iz literature. Prilikom pisanja rada činjenice i informacije do kojih se došlo i koje su vezane uz sam rad pokušalo se iznijeti na način kako bi bile što objektivnije i točnije. Neke od metoda korištenih za izradu ovog rada su: komparativna metoda, metoda analize i sinteze, te metoda generalizacije.

## **1.4. Kompozicija rada**

Ovaj rad podijeljen je na osam poglavlja. Rad započinje Uvodom. U Uvodu je opisan problem i predmet istraživanja, svrha i ciljevi istraživanja, struktura rada, iznesena je hipoteza rada te su navedene znanstvene metode koje su primijenjene prilikom izrade rada.. Drugo poglavlje odnosi se na informacije o vodik. Treće poglavlje nosi naslov Motori SUS na vodik, a četvrto poglavlje nosi naslov Vozila na gorive ćelije.

Peto poglavlje daje komparativnu analizu različitih pogonskih goriva. Šesto poglavlje bazirano je na Sigurnosti i ekologiji vozila na vodik. Sedmo poglavlje obuhvaća budućnost vodika kao goriva u javnom prijevozu. U devetom poglavlju nalazi se Zaključak.

## **1.5. Istraživačka hipoteza**

Hipoteza ovog istraživanja zasniva se na činjenici da je upotreba vozila na vodik područje

gdje postoje velike i dugoročne mogućnosti smanjenja emisije stakleničkih plinova. Da bi se to postiglo potrebno je stalno unapređenje, korištenje novih tehnologija i analiziranje procesa vezanih uz proizvodnju vodika kao i tehnologije gorivih ćelija. Samo uz takav pristup moguće je ostvariti maksimalni učinak uz minimalan utrošak resursa. Temeljna hipoteza ovog rada je: „Primjena vozila na vodik značajno bi smanjila emisiju stakleničkih plinova, a najviše u urbanim gradskim područjima“

## 2. Vodik

Vodik je kao element 1766. g. prepoznao Sir Henry Cavendish (Engleska). Ime mu daje Lavoisier iz riječi grčkog podrijetla -> *hydro genes* - "vodu stvara". Slobodan je vrlo raširen u prirodi, ali se u malim količinama nalazi u atmosferi, zemnom plinu, ekshalacijama vulkana i dr. Vezan je u sastojcima vode i hidrata, svih kiselina i baza, hidrida i ugljikovodika, kao i gotovo svih drugih organskih spojeva. Na zemlji je po težini deveti najrasprostranjeniji element, a po broju atoma drugi. Slobodni vodik je plin bez boje, mirisa i okusa. [26]

### 2.1. Svojstva i karakteristike vodika

**Vodik**, simbol **H** (lat. *hydrogenium*), najlakši kemijski element, prvi po redu u periodnom sustavu elemenata (atomska masa 1,0079). Vodikova izotopna smjesa sastoji se od dvaju prirodnih, stabilnih izotopa (tzv. laki vodik ili procij,  $^1\text{H}$ , obilnost u izotopnoj smjesi 99,985%; teški vodik ili deuterij,  $^2\text{H}$ , obilnost 0,015%) te od prirodnoga radioizotopa tricija,  $^3\text{H}$ . Vodikov atom najjednostavnije je građe među atomima svih poznatih elemenata jer se sastoji samo od jednog protona (jezgre) i jednog elektrona. Vodik je najrašireniji kemijski element u svemiru (maseni udio 75%), gdje u nuklearnim reakcijama fuzije, koje se zbivaju u zvijezdama, od vodika nastaju helij i energija. Na Zemlji je u plinovitom stanju raširen u neznatnim količinama (u atmosferi, prirodnom plinu, ekshalacijama vulkana i dr.), ali se pojavljuje u cijelom nizu spojeva: sastojak je vode i hidrata, kiselina i baza, hidrida, te ugljikovodika i gotovo svih ostalih organskih spojeva. Vodik je 1766. otkrio → [H. Cavendish](#). – Slobodan, nevezan vodik plin je koji se sastoji od dvoatomskih molekula ( $\text{H}_2$ ). Dvije su izomerne vrste vodika, koje se međusobno razlikuju po spinovima (unutarnjim impulsima

vrtnje) dvaju protona u molekuli. To su orto-vodik (paralelni spinovi) i para-vodik (anti paralelni spinovi). Vodik nema boje, mirisa ni okusa, vrelište mu je  $-252,87\text{ }^{\circ}\text{C}$ , talište  $-259,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Najlakši je od svih plinova, 14,4 puta lakši od zraka. Među kemijskim elementima pokazuje najveću sposobnost difuzije, pa ga neki elementi, posebno platinski metali, mogu apsorbirati u golemim količinama (paladij može na visokoj temperaturi apsorbirati 935 puta veći volumen vodika od vlastita volumena). Vodik je lakozapaljiv; smjesa vodika i kisika (plin praskavac), dovoljno zagrijana, reagira eksplozivno, spajajući se u vodu uz razvijanje velike količine topline. Smjesa vodika i klora eksplodira čim se izvrgne svjetlosti, a smjesa s fluorom eksplodira i u mraku. S ostalim elementima vodik reagira tek uz zagrijavanje ili uz prisutnost katalizatora. Sa sumporom se lako spaja u sumporovodik ( $\text{H}_2\text{S}$ ), s dušikom daje amonijak ( $\text{NH}_3$ ). Mnogim oksidima vodik na povišenoj temperaturi oduzima kisik (redukcija), spajajući se s njime u vodu. Nezasićeni i aromatski organski spojevi mogu se s vodikom spajati u njime bogatije spojeve (hidrogenacija). Binarni spojevi vodika s drugim elementima, među kojima je najvažnija voda, nazivaju se *hidridi*. Među molekulama u kojima postoje skupine H–O, H–N, H–F i sl. pojavljuju se *vodikove veze*, uzrokovane velikom razlikom u elektronegativnosti između vodikovih atoma i atoma tih drugih elemenata pa zbog toga i stvaranjem jakoga dipola. Te su veze mnogo jače od van der Waalsovih, ali još uvijek bitno slabije od kovalentnih, i o njima ovise svojstva vode i mnogih biološki važnih sustava. – Vodik se u industrijskom mjerilu dobiva katalitičkom reakcijom vodene pare s ugljikovodicima prirodnoga plina pri visokoj temperaturi i visokom tlaku ili reakcijom teškog ulja i drugih ostataka destilacije nafte s kisikom, a samo rijetko i rasplinjavanjem ugljena u plinskom generatoru. Tako nastaje smjesa vodika i ugljikova monoksida (sintezni plin), koja služi kao sirovina za proizvodnju amonijaka, metanola i drugih spojeva. Razmjerno čisti vodik (volumni udjel 97 do 99,5%) iz te se smjese dobiva uklanjanjem ugljikova monoksida katalitičkom oksidacijom, a u trgovinu dolazi u čeličnim bocama pod tlakom. Vrlo čisti vodik ( $> 99,5\%$ ) jednostavno se proizvodi elektrolizom vode, ali se elektroliza u tu svrhu primjenjuje rijetko (češće kao metoda za dobivanje teške vode,  $\text{D}_2\text{O}$ ), jer na cijenu tako proizvedenoga vodika jako utječe cijena električne energije. U laboratoriju se vodik najlakše dobiva djelovanjem mineralnih kiselina na cink. U posebnim uvjetima može se dobiti i vrlo nestabilni, *atomski vodik*, koji se, za razliku od molekularnoga, sastoji od pojedinačnih atoma. Najveće količine vodika rabe se za sintezu amonijaka i metanola te za proizvodnju motornih goriva hidrogenacijom ugljena, nafte i katrana. Osim toga, vodik služi u proizvodnji masti (margarina) hidrogenacijom ulja, za dobivanje klorovodika, cijanovodične kiseline, mnogih ugljikovodika i alkohola, aldehida i ketona, kao rashladno sredstvo (zbog velikoga toplinskoga kapaciteta), u metalurgiji za dobivanje metala iz ruda

redukcijom metalnih oksida, u smjesi s kisikom za zavarivanje (temperatura plamena pri kontroliranom izgaranju do 2700 °C), ukapljeni vodik služi kao gorivo za pogon raketa (npr. raketa nosač *Saturn V*, u okviru programa leta na Mjesec svemirskih brodova s ljudskom posadom) i dr. Zbog mogućnosti proizvodnje vodika elektrolizom vode, koje na Zemlji, za razliku od fosilnih goriva, ima u praktički neograničenim količinama, istraživanja su usmjerena na moguću primjenu vodika kao izvora energije, ponajprije kao motornoga goriva.[1]

**Tablica 1.** Fizikalna svojstva i osnovne karakteristike vodika [2]:

Donja ogrjevna moć: 10 800 kJ/mn	Specifična toplina (cp): 14 266 J/kgK (20°C)
Gornja ogrjevna moć: 12 770 kJ/mn	Gustoća (plinsko) stanje: 0,09 kg/m <sup>3</sup>
1 normni kubni metar (mn 3 ): ≈ 0,09 kg	Gustoća (tekuće stanje) 70,9 kg/m <sup>3</sup> (-252°C)
Plinska konstanta: 4 125 J/kgK	

U usporedbi sa drugim gorivima, vodik pokazuje izrazitu energetska superiornost, što se može najbolje vidjeti iz vrijednosti toplotnih moći vodika, benzina, dizel goriva i prirodnog plina prikazanih u tabeli 2. Uspoređujući podatke iz tabele zapaža se da vodik ima između 2 i 3 puta veću toplotnu moć od drugih tehničkih goriva. Uz činjenicu da sagorijevanjem vodika nastaje čista voda, a kod svih drugih goriva, nezaobilazni produkti sagorijevanja su, pored vode, i štetni plinovi CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, itd. u ovisnosti od tipa i čistoće goriva, vodik je jedino gorivo koje ekološki ni malo ne opterećuje planetu.

**Tablica 2.** Toplotna vrijednost najvažnijih tehničkih goriva [3]

Toplotna Moć	Goriva				
	Vodik	Benzin	Diesel D-2	Propan	Prirodni plin
<b>Gornja toplotna moć, MJ/kg</b>	141,9	43,8 - 47,5	44,6 – 46,5	50,2	54,9
<b>Donja toplotna moć, MJ/kg</b>	119,0	41,9 – 44,2	41,9 – 44,2	46,1	49,6

**Tablica 3.** Usporedba gustoće energije vodika i diesel goriva [4]

Jedinica energije vodika	Ekvivalent diesel gorivu
1 Nm <sup>3</sup> vodika	0,30 l diesela
1 litra tekućeg vodika	0,24 l diesela
1 kg vodika	2,74 kg diesela

**Tablica 4.** Usporedni prikaz energetske moći tipičnih goriva za termo cikluse i cikluse gorivih ćelija

Gorivi medij (p-plin; fl-fluid)	GUSTOĆA ENERGIJE	
	Prema zapremnini (kWh/l)	Prema težini (kWh/kg)
BENZIN (FL)	9,43	13,33
METAN (g/250bara)	11,06	15,42
METANOL (fl)	5,05	6,37
VODIK (MgH <sub>2</sub> )	4,42	3,06
VODIK (MetalHidrid)	0,60	0,20
VODIK (fl/-273°C)	2,78	40
VODIK (g/300 bara)	0,88	0,66
OLOVNI AKUMULATOR	0,06	0,03
<b>1 kg vodika sadrži otprilike istu energetska vrijednost kao i 1 galon benzina.</b>		

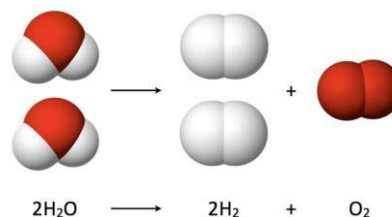
Vodik je supstanca sa najmanjom molekulskom težinom, najmanjom gustoćom i najnižim temperaturama topljenja i ključanja (sa izuzetkom helija). [1]

U zemljama s jeftinom električnom energijom, dobije se elektrolizom vode, zalužene alkalijским hidroksidom zbog povećanja vodljivosti :

katoda (-):  $4 \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2(\text{g}) + 4 \text{OH}^-$  anoda (+):  $4$

$\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

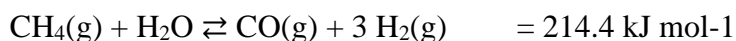
$2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$



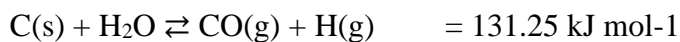
Jedna od najraširenijih i najjeftinijih metoda jest piroliza ugljikovodika, naprimjer etana :

$$\text{C}_2\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$$

Kada je lako dostupan metan, koristi se njegova reakcija s vodenom parom na 1100 °C :



Kada je lako dostupan i jeftin ugljen, koristi se redukcija vodene pare :



## 2.2. Proizvodnja vodika

Vodikova ekonomija ili ekonomija vodika je ideja promjene svjetske ekonomije energije ovisne o nafti u onu temeljenu na vodik. Kada se govori o vodikovoj ekonomiji, u prvom redu se misli na ekološki prihvatljivu proizvodnju vodika u velikim količinama i primjenu u dva velika područja: prijevozu i energetici. Ideja o vodikovoj ekonomiji nije tako nova. Još 1875. francuski pisac Jules Verne preurekao je da komponente vode, vodik i kisik, mogu osigurati neograničene količine električne energije i topline. Ali sve do danas, to je ostala naučna fantastika. Čovječanstvo ipak postaje sve svjesnije da put kojim ide u energetici ne vodi nikuda. Korištenje pretežno fosilnih goriva za dobivanje energije dovelo je već do velikih globalnih problema (globalno zatopljenje, povećanje stakleničkih plinova, porast razine mora), rješenje kojih već sada traži visoku cijenu. [10]

Velike količine H<sub>2</sub> se koriste u naftnoj i kemijskoj industriji. Najveća primjena je kod poboljšanja fosilnih goriva i u proizvodnji amonijaka. U petrokemiji H<sub>2</sub> se koristi u procesima kao što su: hidrokrekiranje, katalitičko reformiranje benzina, izomerizacija i alkilacija. Vodik se isto koristi u povećanju zasićenja nezasićenih masti i ulja (koristi se za dobivanje margarina). Također je sirovina za dobivanje klorovodične kiseline, a koristi se i kao reducens za mineralne sirovine ili rude. [11]

Za masovniju proizvodnju vodika na principu elektrolize danas se koriste elektrolizeri, uređaji koji su po principu i konstrukciji jako slični gorivim ćelijama, ako ne čak i isti kada je goriva ćelija reverzibilna (tada goriva ćelija može da radi u oba smjera – dovođenjem vodika i kisika generira se struja, a također i povezivanjem njenih krajeva na izvor električne energije generira se vodik i kisik). [1]

Zanimljivo je da se za proizvodnju 1 kg vodika treba utrošiti oko 9 litara vode, a da je 1 kg vodika dovoljan za 100 km vožnje automobilom. [11]



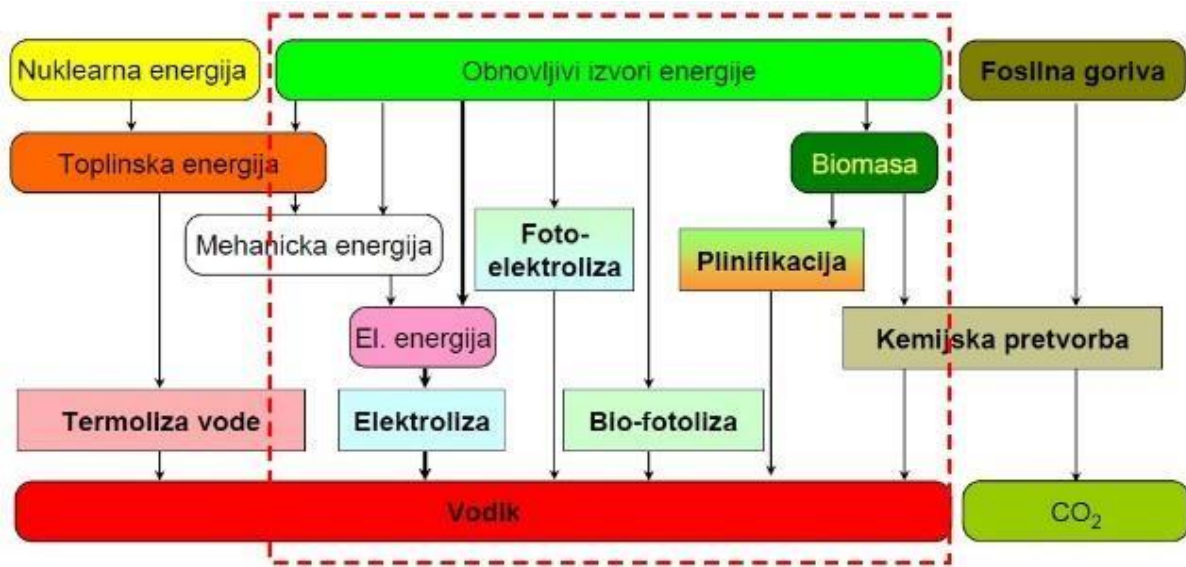
Vodik kao gorivo se ne pojavljuje prirodno na Zemlji, a time nije izvor energije, već je energent. Od 2014. godine, 95% vodika se radi od metana. Može biti proizveden korištenjem obnovljivih izvora, ali to je skup proces. [7]

Prvi veliki korak u ekonomiji vodika je organizacija njegove ekonomične proizvodnje u velikim količinama. S jedne strane to i nije tako velik problem, jer su postupci poznati, a vodik se danas proizvodi između 500 i 600 milijardi kubnih metara godišnje za potrebe kemijske industrije, istina pretežito iz fosilnog goriva – prirodnog plina. Bolji način od toga je dobivanje vodika iz vode poznatim postupkom elektrolize. Predviđa se da će to biti glavni način, jer se može, a to se zahtijeva, koristiti ekološki proizvedena električna energija iz obnovljivih izvora. [10]

Za dobivanje 1 kg vodika elektrolizom potroši se otprilike oko 50 kWh sa

efikasnošću od 70%. Također se dosta energije potroši i za komprimiranje dobivenog vodika. Pritisak od 5.000 psi se pokazao kao najbolji balans između cijene i efikasnosti. Za sabijanje 1 kg vodika na taj pritisak potrebno je uložiti 5 - 7.5 kWh električne energije, a za sabijanje još na 7.000 psi potrebno je 15% više električne energije. [1]

Danas se većina vodika proizvodi od fosilnih goriva . Najveći dio godišnje količine vodika na svjetskom tržištu, potječe od fosilnih goriva, a udio od 38% svjetske proizvodnje čini vodik, nus proizvod u kemijskoj industriji. Povećanje potreba za energijom te zahtjevi za smanjenjem štetnih emisija u bliskoj će budućnosti zahtijevati napuštanje klasičnih procesa proizvodnje vodika te uvođenje novih tehnologija njegove proizvodnje, naročito onih koje koriste obnovljive izvore energije (sunce, vjetar, biomasa). [15]



Slika 1. Načini proizvodnje vodika [27]

Među konvencionalne tehnologije proizvodnje vodika ubrajaju se: proizvodnja vodika katalitičkom oksidacijom ugljikovodika, proizvodnja iz rafinerijskih plinova i metanola, parcijalna oksidacija teških ugljikovodika i ugljena te elektroliza vode. [10]

Napredne tehnologije najvećeg potencijala za proizvodnju vodika, s ciljem zadovoljenja predviđenih potreba, dijele se u tri osnovne kategorije [10]:

- **Foto biološke** (korištenje sposobnosti nekih živih organizama (alge) da izloženi svjetlosti proizvode vodik),
- **Foto elektrokemijske** (koristi sunčevu svjetlost za disocijaciju (kemijska reakcija u kojoj jedna kemijska veza u molekuli vode puca, pa se molekula raspada na vodikov ion i hidroksidni ion) vode na vodik i kisik i
- **Termo kemijske** (korištenje topline u proizvodnji vodika).

Do sada je samo proces dobivanja vodika rasplinjavanjem biomase razvijen do stupnja koji će u narednih nekoliko godina omogućiti stvaranje tržišno kompetitivnog proizvoda. Foto biološka i foto elektrokemijska proizvodnja u početnom su stadiju razvoja i predviđa se da će komercijalne aplikacije biti dostupne tek za koje desetljeće. [10]

Električna energija danas je jedini sekundarni energent koji služi za proizvodnju vodika, najčešće elektrolizom vode, a koristi se u aplikacijama koje traže ekstremno čisti vodik. Istraživanja na polju elektrolitičkih procesa usmjerena su ka optimizaciji i poboljšanju iskoristivosti procesa dobivanja vodika iz vode. Drugo rješenje je tzv. solarni vodik, dobiven procesom elektrolize uz upotrebu električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora.

Predviđa se da će, uz električnu energiju, drugi važni sekundarni energent za proizvodnju vodika u bliskoj budućnosti biti metanol, naročito primjenjiv u transportnim aplikacijama. [10]

**Tablica 5.** Količina vodika dobivena pretvaranjem goriva [11]

<b>PRIBLIŽAN IZNOS, KG VODIKA / KG GORIVA</b>		
<b>Goriva</b>	<b>Vodena para</b>	<b>Parcijalna oksidacija</b>
<b>Metanol (CH<sub>3</sub>OH)</b>	0,189	0,126
<b>Etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)</b>	0,263	0,219
<b>LNG (CH<sub>4</sub>)</b>	0,503	0,377
<b>LPG (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)</b>	0,456	0,316
<b>Benzin (C<sub>8</sub>H<sub>15,4</sub>)</b>	0,430	0,284
<b>Diesel (C<sub>14</sub>H<sub>25,5</sub>)</b>	0,424	0,279

### **2.3. Skladištenje i transport vodika**

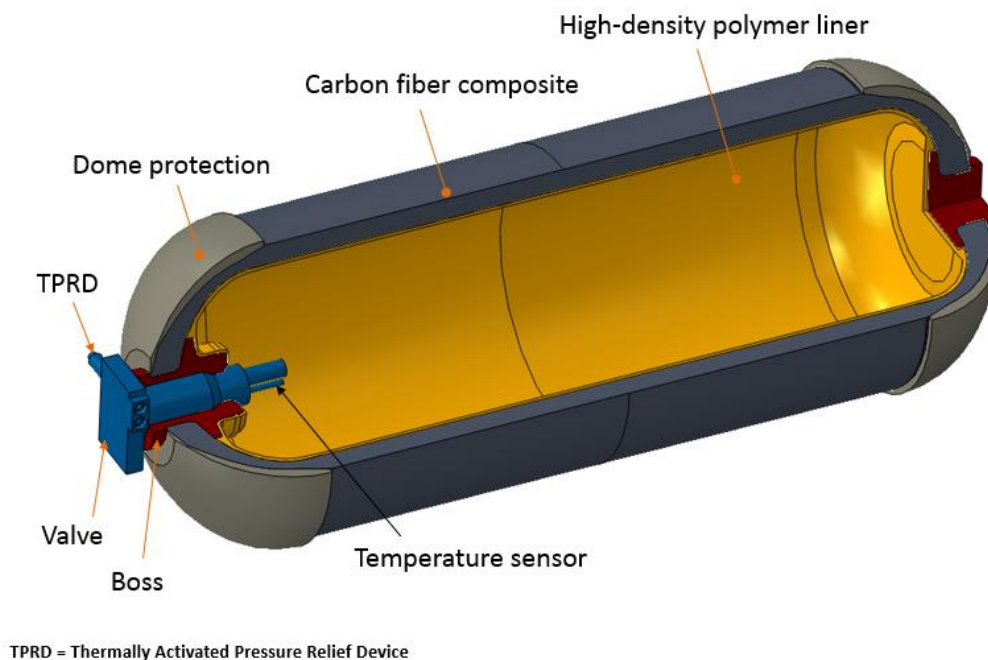
Skladištenje i transport vodika su ključni aspekti korištenja vodika kao energenta, budući da je vodik plinovit, lako zapaljiv i ima tendenciju difuzije kroz većinu materijala. Evo nekoliko metoda i tehnologija koje se koriste za skladištenje i transport vodika:

1. **Kompresija:** Vodik se može skladištiti u obliku komprimiranog plina (CNG - Compressed Natural Gas) s visokim tlakom, obično od 350 do 700 bara (bar). Ovo je često korišteno za transport vodika u cilindrima ili u kompozitnim spremnicima
2. **Kriogeničko skladištenje:** Vodik se može skladištiti u tekućem stanju pri vrlo niskim temperaturama (oko -253°C) pod nazivom tekući vodik (LH<sub>2</sub>). Ovo zahtijeva posebne izolirane spremnike. Kriogeničko skladištenje omogućava veliku gustoću energije, ali zahtijeva znatne energetske napore za održavanje niskih temperatura
3. **Metalni hidridi:** Vodik se može apsorbirati u metalnim hidridima, čime se stvara stabilan spoj. Ova metoda omogućava pohranu vodika pri nižem tlaku i sobnoj temperaturi. Prilikom oslobađanja vodika iz hidrida, koristi se toplina ili neki drugi poticaj.
4. **Tekući organski nosači:** Tekući organski nosači (LOHC - Liquid Organic Hydrogen Carriers) su tvari koje mogu apsorbirati vodik pri blagim uvjetima i otpustati ga kada je potrebno. To omogućava lakše i sigurnije skladištenje i transport vodika.

5. Sinteza amonijaka: Vodik se može kombinirati s dušikom kako bi se stvorio amonijak (NH<sub>3</sub>). Amonijak se može skladištiti pod pritiskom i temperaturom sličnim onima pri kojima se skladišti propan. Nakon transporta, amonijak se može razgraditi kako bi se oslobodio vodik.

6. Pipelines: Za transport vodika na velikim udaljenostima često se koriste cjevovodi. Međutim, vodik ima tendenciju prigovaranja metala, pa su potrebni posebni materijali i postupci za izgradnju vodikovih cjevovoda.

7. Kamioni i vozila: Vodik se često koristi kao gorivo za vodikove gorive ćelije (HFCV) u vozilima. Ova vozila koriste vodik koji se skladišti u posebnim spremnicima i pretvara se u električnu energiju putem gorivih ćelija za pokretanje motora.



Slika 2. Rezervoar za skladištenje vodika u vozilu [25]

Skladištenje i transport vodika predstavljaju izazove, uključujući sigurnost, energetske gubitke i infrastrukturne potrebe. Izbor metoda ovisi o konkretnim potrebama i uvjetima, a istražuju se i nove tehnologije kako bi se poboljšala učinkovitost i sigurnost ovih procesa.

Prednosti vodika kao goriva su [1]:

- Čist i ekološki prihvatljiv
- Visoka gustoća energije
- Univerzalnost
- Niski emisijski potencijal

Nedostaci upotrebe vodika [1]:

- Visoki troškovi proizvodnje
- Skladištenje i transport
- Nestabilnost i sigurnost
- Nedostatak infrastrukture
- Niski energetska učinak elektrolize

### **3. Motori SUS na vodik**

Tehnologija motora s unutarnjim izgaranjem koji koriste vodik kao gorivo daje gotovo nultu emisiju uz zadržavanje zvučnih i osjetilnih podražaja tipičnih za motore s unutarnjim izgaranjem. To je vrsta motora koja koristi vodik kao gorivo za izgaranje unutar cilindra motora. Ovi motori su slični konvencionalnim motorima sa unutrašnjim izgaranjem na benzin ili dizel, ali su prilagođeni za korištenje vodika kao goriva

#### **3.1. Karakteristike sagorijevanja vodika u motoru SUS**

Vodik ima relativno visoku temperaturu samozapaljenja. Ovo je bitno prilikom kompresije smjese. Temperatura samo zapaljivosti smjese je važan podatak za određivanje potrebnog stupnja kompresije, jer se sa povećanjem stupnja kompresije povećava i temperatura.

Temperatura u cilindru ne smije prelaziti temperaturu samozapaljenja vodika kako ne bi izazvalo prerano paljenje. Apsolutna krajnja temperatura određuje granicu stupnja kompresije. Visoka temperatura samozapaljenja dopušta veći stupanj kompresije u vodikovom SUS motoru. Veći stupanj kompresije je važan zbog toga što je povezan sa većom efikasnošću procesa. Promatrajući navedeno, zbog potrebne visoke temperature samozapaljenja primjena vodika u dizel motorima ima manju primjenu nego kod Otto motora. [11]

Vodik ima veoma nisku (malu) potrebnu energiju za paljenje smjese (ignition energy). Količina energije potrebna za zapaljenje vodika je za jedan red veličine manja nego potrebna za benzin. To osigurava vodik u motoru da se zapali u siromašnoj smjesi. Međutim, niska potrebna energija za paljenje smjese znači i to da vreli plinovi i vrela žarišta u klipu mogu poslužiti kao izvor paljenja, tj. mogu stvoriti prerano paljenje. Prevencije ovog je jedan od

izazova povezanih sa korištenjem vodika kao goriva u SUS motoru. Visok front plamena vodika znači da bilo koja smjesa može biti zapaljena pomoću žarišta u cilindru. [11]

Velika brzina širenja plamena. Vodik ima veću brzinu širenja plamena nego kod nekih ostalih goriva. To znači da je realan proces sagorijevanja vodika bliži idealnom procesu, nego što je to slučaj kod ostalih vrsta goriva. Kod siromašne smjese brzina plamena značajno opada. [11]

Visoka difuznost (koeficijent širenja). Ova sposobnost širenja (difuzije) u zraku u odnosu na benzin ima prednost iz dva razloga. Prvi je što stvara homogenu smjesu zraka i goriva. Drugo, ukoliko dođe do curenja vodika vodik brzo ispari. [11]

Osobine sagorijevanja vodika u motoru SUS su slijedeće [11]:

- visoka brzina širenja plamena (flame speed)
- niska energija paljenja smjese (ignition energy)
- mala razdaljina gašenja (quenching distance)
- visoka temperatura samopaljenja (autoignition temperature)
- visoka difuznost (diffusivity)
- širok domet zapaljivosti (wide range of flammability)
- veoma niska gustoća (density).

**Tablica 6.** Karakteristike sagorijevanja vodika, metana i benzina [11]

	Vodik	Metan	Benzin
Granica zapaljivosti (% po zapremini)	4 – 75	5,3 – 15	1,2 – 6
Minimalna energija sagorijevanja (mJ)	0,02	0,28	0,25
Brzina širenja plamena (m/s)	1,90	0,38	0,37 – 0,43
Temperatura samozapaljenja (°C)	585	540	227 – 477

Prednosti korištenja vodika kao gorivo u motoru SUS je to što je vodik moguće dobiti iz obnovljivih izvora energije, manje zagađuje, neotrovan, bez mirisa i ima širok raspon zapaljivosti. Neki nedostaci su: niska energija zapaljivosti, niska gustoća i dr. [11]

Motori sa unutrašnjim izgaranjem na vodik (HIICE - Hydrogen Internal Combustion Engines) su vrsta motora koja koristi vodik kao gorivo za izgaranje unutar cilindra motora. Ovi motori su slični konvencionalnim motorima sa unutrašnjim izgaranjem na benzin ili dizel, ali su prilagođeni za korištenje vodika kao goriva

Prednosti motora sa unutrašnjim izgaranjem na vodik:

1. Niska emisija: Motori sa unutrašnjim izgaranjem na vodik proizvode jako nisku emisiju štetnih plinova. Glavni nusproizvod izgaranja vodika je voda ( $H_2O$ ), što znači da nema emisije  $CO_2$ ,  $CO$  (ugljen monoksida) ili čestica.
2. Efikasnost: Vodik ima širok raspon zapaljivosti i može sagorijevati brže od drugih goriva, što može dovesti do visoke efikasnosti motora.
3. Brzo punjenje gorivom: Poput benzina i dizela, vodik se može brzo točiti u rezervoar, što olakšava punjenje goriva.
4. Tihi rad: Motori na vodik obično proizvode manje buke u usporedbi s konvencionalnim motorima sa unutrašnjim izgaranjem.

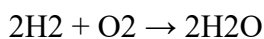
Nedostaci motora sa unutrašnjim izgaranjem na vodik:

1. Skladištenje i transport vodika: Kao što je ranije spomenuto, skladištenje i transport vodika može biti izazov zbog njegove niske gustoće u plinovitom stanju. To zahtijeva posebnu infrastrukturu.
2. Potrebna infrastruktura: Postavljanje infrastrukture za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika je skupo i zahtijeva znatne napore.
3. Nedostatak vodika: Vodik nije široko dostupan kao benzin ili dizel, što može ograničiti praktičnost upotrebe ovih motora, posebno izvan regija s razvijenom infrastrukturom za vodik.
4. Izgaranje na visokim temperaturama: Izgaranje vodika u motorima može generirati visoke temperature, što može dovesti do problema s termičkim opterećenjem motora i potrebom za dodatnim sistemima hlađenja.
5. Troškovi: Trenutno, proizvodnja motora sa unutrašnjim izgaranjem na vodik i pripadajuće infrastrukture može biti skupa u usporedbi s drugim alternativnim tehnologijama, kao što su električni automobili.

Motori sa unutrašnjim izgaranjem na vodik imaju svoje prednosti u smislu brze punjenosti gorivom i niske emisije, ali se suočavaju s izazovima u vezi s proizvodnjom, skladištenjem i distribucijom vodika. U budućnosti će ovi motori možda igrati važnu ulogu u specifičnim primjenama, ali će električna vozila i gorive ćelije vjerojatno dominirati tržištem čistih transportnih rješenja.

Stehiometrijski omjer između zraka (kisika) i vodika u prostoru za sagorijevanje označava idealnu količinu kisika potrebnu da se potpuno sagori određena količina vodika. Za sagorijevanje vodika u zraku i postizanje potpune oksidacije, stehiometrijski omjer je 2:1, što znači da za svake dvije molekule vodika (H<sub>2</sub>) je potrebna jedna molekula kisika (O<sub>2</sub>). [11]

Kemijska reakcija sagorijevanja vodika (H<sub>2</sub>) u prisustvu kisika (O<sub>2</sub>) može se prikazati kako slijedi:



Ova reakcija pokazuje da se dvije molekule vodika kombiniraju s jednom molekulom kisika da bi stvorili dvije molekule vode (H<sub>2</sub>O). Ovo je idealna reakcija sagorijevanja vodika bez nepotrebnog viška kisika ili vodika.

Važno je napomenuti da u stvarnim uvjetima često postoji višak zraka kako bi se osiguralo potpuno sagorijevanje vodika i da se minimiziraju emisije nepotpune oksidacije. Stvarna količina kisika koja je potrebna za potpuno sagorijevanje vodika može varirati ovisno o različitim čimbenicima, uključujući tlak, temperaturu i sastav zraka. [11]

U praktičnim primjenama, kako bi se osiguralo potpuno sagorijevanje vodika i održao siguran rad, često se koristi malo viši omjer kisika u odnosu na vodik. Ovaj višak kisika pomaže u sprječavanju pojave zapaljivih smjesa iznad stehiometrijskog omjera, što može biti potencijalno opasno.

Vodik kao gorivo se u motoru SUS može koristiti kao dodatak (aditiv) ugljikovom gorivu. Vodik se najčešće miješa sa komprimiranim prirodnim plinom (CNG), a oba goriva mogu biti uskladištena u istom rezervoaru. Ukoliko se vodik miješa sa nekim drugim gorivima obično se skladišti odvojeno od tih goriva prije procesa paljenja u komori za sagorijevanje. Nepraktično je koristiti vodik u kombinaciji sa nekim drugim gorivima koji također zahtijevaju veliki prostor za skladištenje, kao što je propan. [11]



Vodik u plinskom stanju ne može biti uskladišten u istoj posudi sa tekućim gorivom. Vodikova niska gustoća uzrokuje da se plinoviti vodik kreće prema vrhu i ne miješa se sa tekućim gorivom. Nadalje, tekuća goriva su uskladištena pri relativno niskom pritisku, pa se veoma malo vodika može skladištiti zajedno sa tekućim gorivom. Tekući vodik se ne može skladištiti u istoj posudi sa drugim gorivima iz razloga što tekući vodik ima nisku točku ključanja, pa bi došlo do zamrzavanja drugog goriva u toj posudi. [11]

Međutim, vodik može biti korišten u kombinaciji sa zbijenim tekućim gorivima kao što su: benzin, alkohol ili dizel, gdje su goriva međusobno odvojeno skladište. U vozila koja koriste konvencionalna goriva može se dodatno ugraditi sistem za pogon pomoću vodika, gdje bi se u određenom neiskorištenom prostoru ugradio rezervoar za vodik. Ovakva vozila obično koriste jednu vrstu goriva ili obje vrste ali ne u istom trenutku. Prednost ovog rješenja je u tome da vozila mogu raditi i ako nema vodika (ako ga je nestalo u rezervoaru). [11]

Vodik se ne može koristiti direktno u dizel motorima, zbog toga što je temperatura samozapaljenja vodika previsoka. Stoga, kod dizel motora se koristi svjećica ili se dodaje mala količina dizel goriva u radnu smjesu (poznato kao pilot paljenje). Međutim, pilot paljenje se obično ne koristi za vodik, nego za prirodan plin. [11]

Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem na vodik (HICE - Hydrogen Internal Combustion Engines) su slični konvencionalnim motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem, ali su prilagođeni za korištenje vodika kao goriva.

Vozila opremljena motorom s unutrašnjim sagorijevanjem koja koriste vodik kao gorivo predstavljaju sličnu alternativu kao i vodikova vozila s gorivim ćelijama, to jest smanjuju ovisnost o fosilnim gorivima, te imaju znatno sniženu emisiju štetnih plinova. Ovakav tip vozila može se gledati kao korak koji bi premostio prepreke između trenutne situacije i moguće buduće vodikove ekonomije. Vodikova vozila s unutrašnjim sagorijevanjem većinom se svrstavaju u sredinu između efikasnije varijante vodikovih vozila s gorivim ćelijama i standardnih vozila s unutrašnjim sagorijevanjem. Također, vodikova vozila s motorom s unutrašnjim sagorijevanjem još uvijek su većinom samo prototipovi, izuzev BMW-ove serije 7. [12]

### 3.2. HHO sistem u vozilu

HHO sistem je uređaj koji na bazi elektrolize proizvodi HHO plin i ubacuje ga u usisni vod motora gdje se miješa sa usisnim zrakom i pogonskim gorivom i tako dospijeva u cilindar motora. Na ovaj način se povećava snaga motora i smanjuje potrošnja goriva. [13]

Sva poznata goriva: benzin, nafta, plin, metan, etan, propan, butan, su ugljikovodici, tako da se vodik već nalazi u ovim gorivima. Iskorištenost ovih goriva u motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem ide od 50-60% do 80-90%, u ovisnosti od tehničke suvremenosti i ukupnog broja radnih sati datog motora. Stupnjem nedovoljnog sagorijevanja raste i zagađenje zraka jer onaj dio goriva koji ne sagori stvara štetne ispušne plinove. Jedino vodik ima 100% iskorištenost energije i jedino vodik sagorijeva 100%, do posljednjeg atoma i ujedno je potpuno čist i ekološki zdrav. [13]

Kada u usisnu granu dizel ili benzinskog motora, zajedno sa zrakom iz atmosfere uvedemo HHO plin, onda u trenutku paljenja goriva u kompresijskom prostoru cilindra, imamo situaciju da vodik preuzima paljenje ostalog goriva, jer ima veću brzinu sagorijevanja od svih poznatih goriva. U kompresijskom prostoru motora, svojim osobinama, pomaže sagorijevanje glavnog goriva tako što povećava ukupan učinak iskorištenosti postojećeg goriva. Ovo za rezultat ima povećanje snage motora i konačno smanjenu potrošnju goriva, odnosno povećava se iskorištenost postojećeg goriva i daje efekt prelaska dužeg puta sa istom količinom goriva. [13]

Utvrđeno je da poslije 3000 do 4000 prijeđenih kilometara sa ugrađenim HHO sistemom, ventili, površina klipa i kompletan kompresijski prostor u motoru su potpuno čisti. Ovo se dešava zbog povećanja iskorištenosti energije i boljeg sagorijevanja postojećeg goriva. Uvođenjem vodika štetni ispušni plinovi se smanjuju u znatno većem postotku nego sama ušteda goriva. U skladu sa novim EURO 5 i EURO 6 standardima u automobilskoj industriji, HHO sistem, smanjenjem štetnih ispušnih plinova povećava standard vozila u koji je ugrađen. [13]

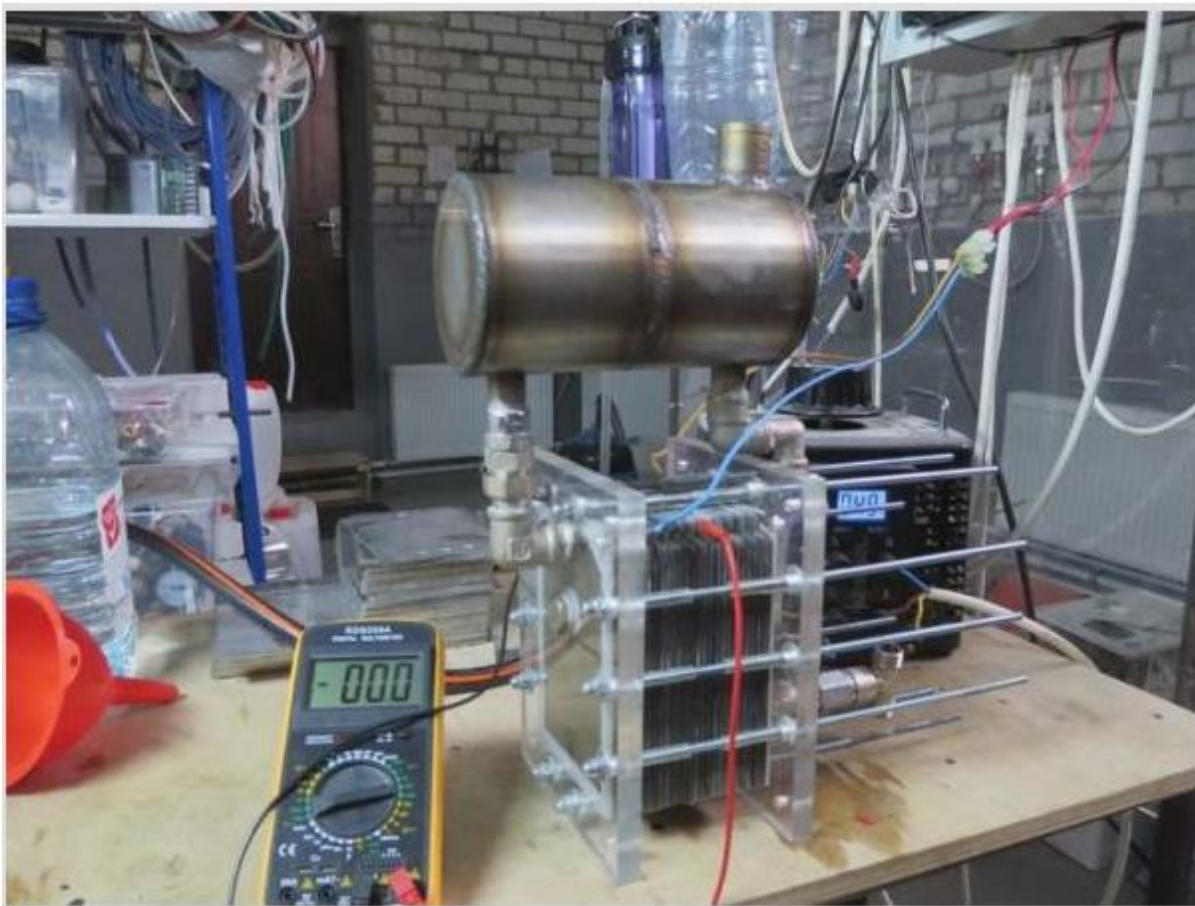
HHO sistem se sastoji iz sljedećih komponenata [14]:

- vodik generator,
- vodeni osigurač,
- pulsni modulator,

- relejni prekidač,
- topljivi osigurač,
- OBD ili Mikrokontroler,
- naravno, uz ove komponente spadaju i armirana crijeva kao i bakreni provodnici koji povezuju spomenute komponente.

**Vodik generator ili „suha ćelija (Dry Cell)** je uređaj u kome se odvija elektrokemijska reakcija elektroliza vode. Princip novog načina elektrolize vode je zasnovan na što manjoj uloženoj energiji za što veću količinu dobivenog HHO plina. Tehnička primjena novog načina elektrolize zasniva se na velikoj površini elektroda u malom prostoru uređaja. [14]

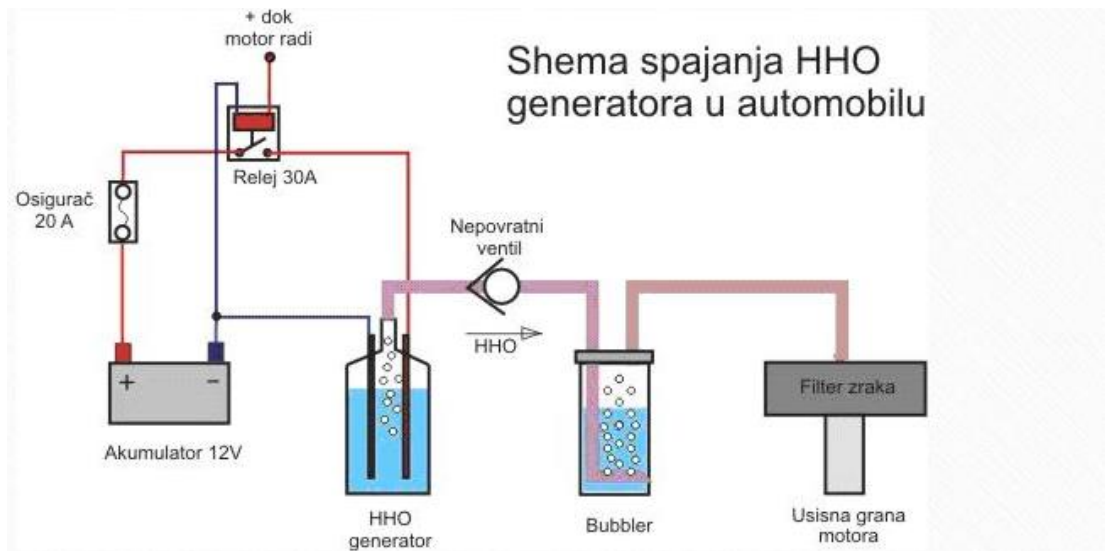
Sastoji se od 8 ili više nehrđajućih, magnetno otpornih čeličnih ploča debljine oko 1,5 mm koje su spojene redno na 14V struje akumulatora. Odvojene su međusobno dihtajućom gumom (kružnog ili četvrtastog oblika) debljine oko 3 mm. Na krajevima se nalaze dvije ploče debljine oko 1,5 mm napravljene od tvrde plastike, odnosno polietilena. Za proračun dimenzija ćelija treba koristiti podatak da 1 cm<sup>2</sup> ćelije vuče oko 0,08 – 0,1 a pri 20% rastvora NaOH koja služi kao elektrolit u vodi. Obzirom da sve ćelije, vezane redno, ne bi smjele da vuku struju veću od 15A (da ne bi došlo do oštećenja kablova i alternatora), tako bi njihove dimenzije trebale da iznose oko 15x15 cm<sup>2</sup>. [14]



Slika 3. Suha ćelija [28]

Da bi imali proces elektrolize vode u „suhoj ćeliji“ potrebno je na uređaj dovesti sa jedne strane pozitivan a sa druge negativan napon akumulatora od 14V. Ova ćelija se konstruira tako da može dugo i sigurno da radi u svim uvjetima u vozilu. [14]

**Vodeni osigurač – ili Bubbler** služi kao rezervoar za vodu koju koristi “suha ćelija” i onemogućava da se proizvedeni HHO plin vrati unazad kroz crijevo i na taj način sprječava eventualnu mogućnost da se plin zapali ili eksplodira. On je sastavljen od plastičnog cilindra napunjen vodom, gdje sa donje strane postoji izvod kojim se sprovodi voda do ćelije, a sa gornje strane postoji uvodnik kroz koji dolazi HHO plin od ćelije. Iz uvodnika spušteno je crijevo do samog dna “bubblera” kroz koje prolazi HHO plin i dalje u vidu mjehurića prolazi kroz vodu sve do vrha posude gdje se dalje odvodi u usisnu granu motora. [14]



Slika 4. Prikaz spajanja HHO generatora [14]

**Pulsni modulator – PWM (Pulse Width Modulator)** postavlja se između akumulatora i „suhe ćelije“ i utječe na napon koji dobiva „suha ćelija“. Ako uzmemo u razmatranje jednu ćeliju i spojimo je na pozitivan i negativan napon od 12V, ona će dobivati tih 12V konstantno, dakle nema prekida u napajanju. Usporedimo je sa drugom ćelijom koja dobiva 12V preko pulsno modulatora. Druga ćelija će dobivati impulsno 12V razdvojenih sa 0V. Ovi impulsi se mogu slati sa određenom širinom impulsa i sa određenom frekvencijom koja je ponekad ista a ponekad promjenljiva. [14]

Da bi definirali pojam „širina impulsa“ uzmimo za primjer da pulsni modulator šalje signale takvom frekvencijom da se cijeli „radni ciklus“ odvija na svake dvije sekunde. Znači da ćelija dobiva 12V na jednu sekundu ali naredne sekunde je napajanje prekinuto. „Radni ciklus“ obuhvaća cjelokupan period između početka impulsa do početka sljedećeg impulsa. U ovom slučaju to je jednom u svake dvije sekunde. Ako bi smanjili vrijeme za pola, dobili bi da se cijeli radni ciklus odvija za jednu sekundu. Može se reći i da radni ciklus zapravo predstavlja odnos vremena kada traje impuls u odnosu na vrijeme kada je isključen. U prethodnim primjerima je taj odnos bio 50%. Bez obzira na vrijeme radnog ciklusa, impuls je trajao isto vrijeme koliko i isključenje. Kada ne bismo mijenjali vrijeme radnog ciklusa, a povećamo dužinu trajanja impulsa na 0.75 sekundi, onda bi prekid trajao 0.25 sekundi. Tada bi radni ciklus iznosio 75%. Dakle radni ciklus opisuje dužinu trajanja impulsa tokom vremena ili „širinu impulsa“ u postotcima. [14]

Uloga pulsno modulatora jeste da mijenja širinu impulsa i na taj način neposredno mijenja struju kroz HHO ćeliju, u zavisnosti od režima rada motora. Na ovaj način sa 85%

„širine impulsa“ i dodavanjem 15% elektrolita u vodu se može dobiti ista količina HHO plina kao kod konstantnog napajanja ćelije, samo što sa modulatorom možete kontrolirati proizvodnju plina. [14]



Slika 5. Pulsni modulator [29]

Neki pulsni modulatori imaju fiksnu frekvenciju, a kod nekih postoji opcija da se podešava frekvencija u određenom opsegu. Uglavnom svi modulatori rade između 100Hz i 500Hz, odnosno šalju od 100 do 500 impulsa u sekundi. Dakle, pulsni modulator je električni uređaj koji prekida jednosmjerni napon u impulse koji se mogu mijenjati u odnosu na potrebe. Može se postaviti u kabini vozila na dohvat ruke vozača koji mijenja proizvodnju plina preko potencijometra, očitavajući na ekranu parametre. [14]

**OBD II mikrokontroler** – prati nivo kisika u ispušnoj smjesi, količinu usisanog zraka, temperaturu motora i tako sakupljene informacije šalje upravljačkoj jedinici motora (ECU) za ubrizgavanje optimalne količine goriva. Kod starijih modela automobila, koji nemaju ugrađene sisteme za mjerenje protoka zraka i vrijeme ubrizgavanja, dodatni zrak u vidu HHO plina u usisnoj grani motora ne predstavlja problem, pa je ugradnja lakša i jeftinija. Ali kod novijih modela, upravljačka jedinica „vidi“ HHO plin kao dodatni, ne izmjereni zrak u usisnoj grani motora i konstatira grešku. Upravljačka jedinica određuje količinu goriva koju treba ubrizgati u cilindar koristeći informacije od MAF (Mass Air Flow) senzora, koji mjeri količinu usisanog zraka i MAP (Manifold Absolute Pressure) senzora, koji mjeri potpritisak u usisnoj grani. Zbog toga je potrebno izmijeniti signale koji se šalju upravljačkoj jedinici sa ova dva senzora kako se ne bi konstantno pojavljivala greška o lošem sagorijevanju smjese. [14]



Slika 6. OBD mikrokontroler [30]

OBD II mikrokontroler prilagođuje količinu HHO plina, vrijeme ubrizgavanja i količinu goriva za ubrizgavanje radi najoptimalnije potrošnje goriva. Mikrokontroler je izuzetno sofisticiran i ima brz odaziv, a komunikaciju sa računalom vozila (ECU) ostvaruje preko serijskog ulaznog i izlaznog OBD II priključka na vozilu. [14]

**Relejni prekidač** se ugrađuje radi lakšeg i sigurnijeg upravljanja sistemom. Veže se između kontakt brave i akumulatora a treba da radi od 30A do 70A. Između releja i akumulatora postavlja se topljivi osigurač (40A - 80A) kako ne bi došlo do oštećenja dijelova sistema. [14]

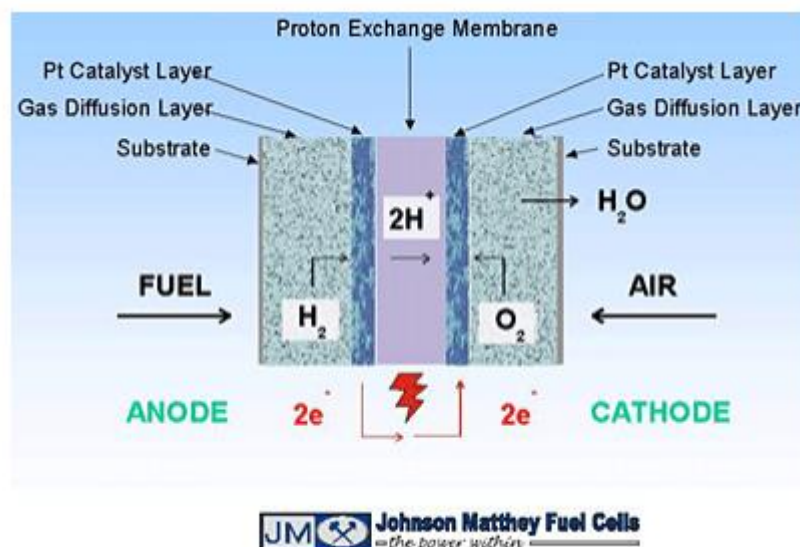
## 4. Vozila na gorive ćelije

Vozila na gorive ćelije funkcioniraju poput motora s unutarnjim izgaranjem, osim što sustav ne sagorijeva vodik koji crpi iz spremnika pod tlakom, već ga spaja s kisikom kako bi proizveo električnu energiju za pogon električnog motora. Postoji nekoliko vrsta gorivih ćelija a razlikuju se prema vrsti elektrolita.

### 4.1. PEM goriva ćelija

PEM goriva ćelija (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), također poznata kao PEMFC, je elektrokemijski uređaj koji pretvara kemijsku energiju vodika i kisika u električnu energiju, a pritom proizvodi samo vodu i toplinu kao nusproizvode. Ova tehnologija često se koristi za proizvodnju čiste i učinkovite električne energije u različitim aplikacijama, uključujući vozila, stacionarne izvore energije i prijenosne uređaje. Evo pojma i principa rada PEM gorive ćelije:

Goriva ćelija je elektrokemijski uređaj za konverziju energije sličan bateriji. Za razliku od baterije, goriva ćelija je predviđena za kontinuiran rad tj. proizvodi električnu energiju zahvaljujući stalnom dotoku goriva i kisika. U motornom vozilu, naročito automobilu, najviše se upotrebljava PEM goriva ćelija, stoga ćemo nešto opširnije napisati o njoj u ovom diplomskom radu.

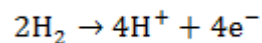


Slika 7. Princip rada PEM gorive ćelije [31]

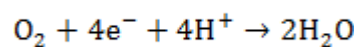


Postoji više vrsta gorivih ćelija, no sve vrste se baziraju na istome principu rada. Sam princip rada je sličan klasičnim baterijama (vrši se pretvaranje iz kemijske u električnu energiju), no zahtjeva stalan dotok reaktanata: goriva i kisika. Kemijski proces koji se odvija suprotan je elektrolizi vode. Goriva ćelija sastoji se od tri dijela: anode, elektrolita i katode. Elektrolit se nalazi između elektroda, na koje se priključuje uređaj koji se napaja. Elektrode su prekrivene slojem katalizatora koji pospješuje reakciju. Na anodu se dovodi gorivo, što može biti vodik, metanol, prirodni ili sintetički plin, a na katodu se dovodi oksidans, što je gotovo uvijek kisik. Reakcije koje se odvijaju na elektrodama su:

anoda:



katoda:



Na anodi katalizator oksidira gorivo, pretvarajući ga u pozitivno nabijene ione i negativno nabijene elektrone. Elektrolit je tvar koja propušta ione, ali ne i elektrone. Oslobođeni elektroni putuju kroz žicu tako stvarajući električnu struju. Ioni putuju kroz elektrolit do katode. Na katodi se ioni ponovno spajaju s elektronima i reagiraju s trećom kemikalijom (kisikom), tako stvarajući vodu ili ugljikov dioksid (ovisno od toga šta je gorivo). Dakle, konačan rezultat tih reakcija je stvaranje jednosmjerne električne struje, topline i nusprodukta u obliku vode ili ugljikovog dioksida. Tipična vrijednost napona koje goriva ćelija može dati je između 0.6 V do 0.7 V. Kao i klasične baterije, gorive ćelije se mogu spajati serijski u svrhu dobivanja željenog većeg napona, ili paralelno u svrhu dobivanja željene veće struje. [15]

Goriva ćelija funkcionira na sličan način kao punjiva baterija. Gorive ćelije i baterije su uređaji koji generiraju električnu energiju kroz kemijske reakcije. Te kemijske reakcije u baterijama i gorivim ćelijama su u potpunosti kontrolirane i ne emitiraju gotovo nikakve štetne nusprodukte. Razlika između te dvije tehnologije leži u načinu spremanja goriva. Baterije pretvaraju točno određeno spremljenu količinu kemijskih spojeva u električnu energiju. Kemijski spojevi koji se troše u procesu eksploatacije baterije regeneriraju se prilikom punjenja baterije. Potpuno suprotno od toga, goriva ćelija pretvara kemijske spojeve koji su spremljeni izvan same ćelije u električnu energiju. Kemijski spoj koji tvori električnu energiju je vodik koji je spremljen u rezervoaru na samom vozilu. [12]

Blok gorivih ćelija, poznat i kao gorivoćelijski stog (engl. fuel cell stack), je sustav sastavljen od više pojedinačnih gorivih ćelija spojenih u seriju ili paralelu kako bi se proizvela veća

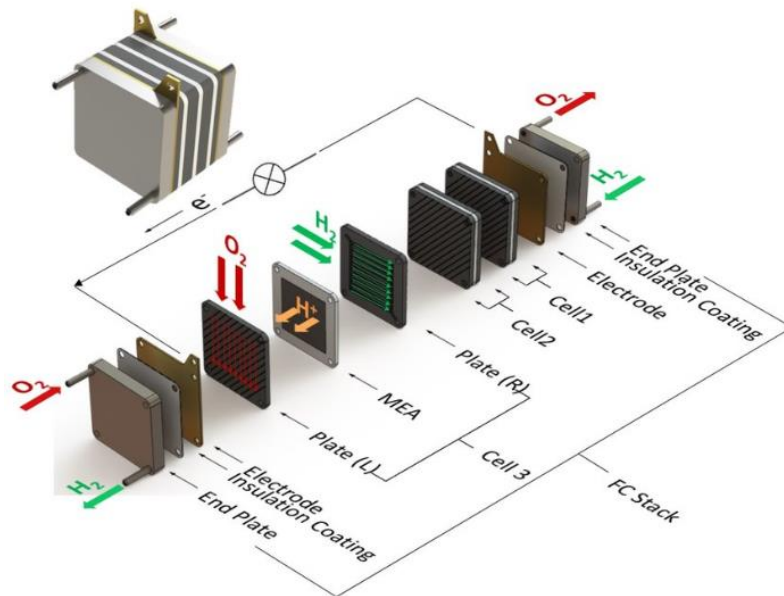
električna snaga. Ovaj stog ili blok obično je osnovna jedinica koja se koristi u aplikacijama gdje je potrebno proizvesti značajnu električnu energiju putem gorivih ćelija.

Goriva ćelija proizvodi jednosmjernu struju, a kako većina elektronskih naprava i transmisionih sistema zahtijevaju izmjeničnu struju, koriste se odgovarajući pretvarači da jednosmjernu struju konvertiraju u izmjeničnu. U terminološkom pogledu, pojam goriva ćelija često podrazumijeva, ne samo pojedinačnu ćeliju, nego i bateriju ćelija u kojoj ona radi, a koja uključuje neophodne pomoćne agregate: reformer, sistem za iskorištenje otpadne topline i strujni pretvarač. [15]



Slika 8. Goriva ćelija [32]

Individualna goriva ćelija zbog skromnih karakteristika, sama, nema primjenu. Radni napon efikasnih ćelija rijetko prelazi 1V, a pri značajnim vrijednostima gustoće struje u radu ćelije, napon zbog polarizacija najčešće pada na 0,5 – 0,6 V, pa je za tehničku primjenu, pojedinačne gorive ćelije potrebno povezati u grupe – baterije. [15]



Slika 9. Shematski prikaz gorivih ćelija [33]

Vezivanjem dovoljnog broja ćelija u bateriju, postižu se željene karakteristike izvora električne energije, s tim što pri tome postoje i mnoga tehnička ograničenja. Imajući u vidu da svaka goriva ćelija u sebi sadrži čitav niz konstruktivnih elemenata strogo određene funkcionalnosti, način slaganja pojedinačnih ćelija u bateriju, odlučuje o krajnjim gabaritima, a samim tim i o specifičnim karakteristikama izvora struje. Svaka goriva ćelija se sastoji od elektrodne grupe sa membranom, koju čine anoda, katoda, elektrolit i katalizator, a smještena je između grafitnih ploča sa kanalima kroz koje se sa različitih strana elektrodne grupe, dovode gorivo i oksidans. [14]

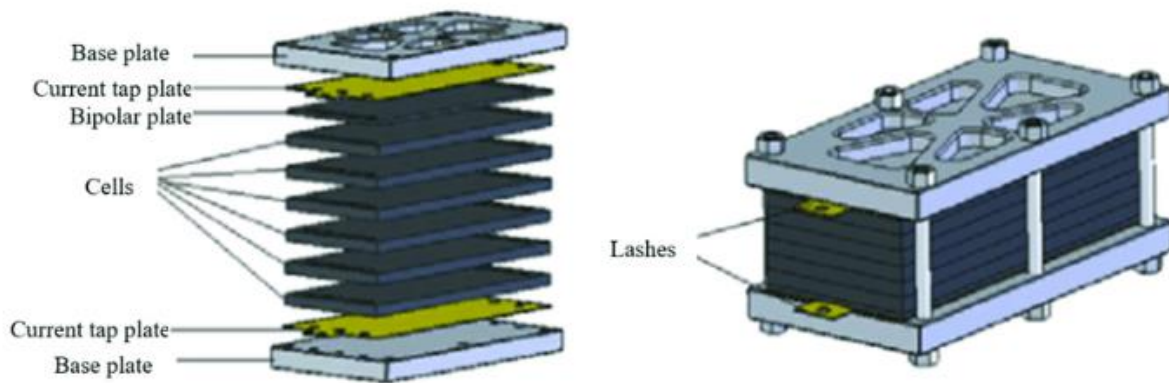
Istovremeno, da bi se kontrolirala radna temperatura, ćeliju je potrebno hladiti (neke tipove ćelija pri startanju treba i zagrijavati), što se ostvaruje posebnim grafitnim pločama koje razdvajaju susjedne ćelije u bateriji, a u sebi sadrže kanale za cirkulaciju medija za hlađenje/zagrijavanje. Električni kontakti kojim se svaka ćelija uključuje u bateriju mogu biti integrirani u ploče hlađenje/grijanje. Cjelokupan ansambl niza gorivih ćelija sa svim sadržajnim elementima u bateriji, mehanički se učvršćuje u cjelinu na pogodan način. U dizajniranju baterije, posebna pažnja se posvećuje brtvljenju svih elemenata da bi se spriječilo nekontrolirano miješanje goriva i oksidansa, curenje elektrolita ili reakcijskih plinova itd., što se rješava odgovarajućim sistemom brtvljenja i veoma preciznom izradom svih elemenata baterije. [14]

Elektroliti u svim gorivim ćelijama moraju ispunjavati nekoliko osnovnih funkcija, i to: da budu provodnici za protone, izolatori za elektrone, a separatori za plinove. Istovremeno, elektrolit, ako je čvrst, treba da ima dobre mehaničke osobine i dimenzijsku stabilnost, visoku ionsku provodljivost i da se može lako mehanički obrađivati. [14]



Slika 10. Blok PEM gorivih ćelija tvrtke Ballard visoke snage od 4.3 Kw/l, do 140 Kw maksimalne snage do maksimalne operativne temperature od 95 °C [34]

Ne postoji određeni broj ćelija u jednom bloku, ali on se najčešće kreće u opsegu od 10 do 100. Površina jedne ćelije obično ima vrijednost od 100 do 400 cm<sup>2</sup>. Jedan blok može da proizvede snagu od skoro 1 W, pa sve do 140 kW.

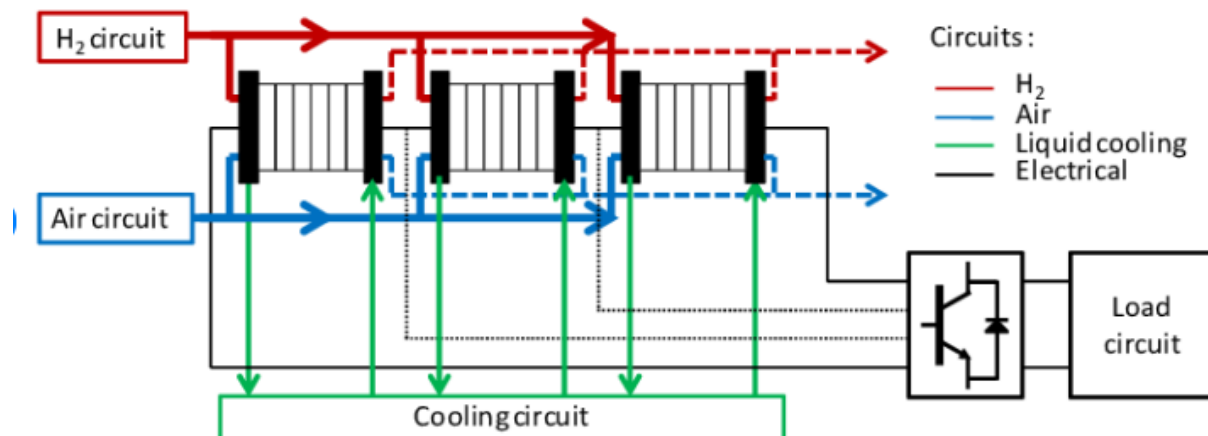


Slika 11. Konstrukcija bloka gorivih ćelija u presjeku [35]

Primjene: Blokovi gorivih ćelija koriste se u različitim aplikacijama, uključujući vozila s gorivim ćelijama, stacionarne elektrane, vojne sustave, sustave za neprekidno napajanje i mnoge druge.

Normalno funkcioniranje PEM (Proton Exchange Membrane) bloka gorivih ćelija zahtijeva nekoliko ključnih komponenata i sustava kako bi se osigurala stabilna i pouzdana operacija. Ovdje su osnovne komponente i sustavi potrebni za normalno funkcioniranje PEM bloka gorivih ćelija:

- kompresor koji treba da osigura strujanje zraka na katodi,
- rashladni sistem (cooling circuit),
- odvodnik vode, koji treba da ukloni dobivenu vodu sa katode,
- kontrolni sistem,
- sistem za snabdijevanje dotoka goriva (vodika).



Slika 12. Sve što je potrebno da bi goriva ćelija (blok) normalno funkcionirala [36]

Sistem za snabdijevanje dotoka goriva može da bude jednostavan cilindar koji sadrži kompresirani vodik, i kontrolor pritiska. Korištenje tekućeg vodika, ili metalnih hidrida čini sistem nešto manje jednostavnim, pošto mora biti osigurana toplina za rezervoar. Ako se umjesto vodika koristi ugljikovodik, sistem za snabdijevanje gorivom postaje mnogo kompliciraniji. U ovom slučaju je neophodan reformer goriva i pročistač goriva, da bi se osiguralo napajanje gorivih ćelija vodikom. [15]

Električna energija koju proizvodi blok gorivih ćelija može da napaja inverter motora direktno. U nekim slučajevima mnogo je atraktivnije koristiti sistem za skladištenje energije, kao što su na primjer baterije, super kondenzatori, ili “fly wheel“. Oni osiguravaju maksimalnu snagu, koja može biti potrebna tokom starta, ili tokom ubrzanja. Također mogu biti korišteni da apsorbiraju energiju tokom kočenja. Kada se koristi skladištenje energije, cijeli sistem postaje jako ozbiljan komplicirani hibridni sistem. [15]

Da bi se izbjegli problemi distribucije vodika i njegovo “on-board” skladištenje, mnogi predlažu korištenje tekućeg ugljikovodikovog goriva. Ova goriva mogu da se pretvore u vodik, npr. u samom vozilu korištenjem procesora goriva (reformer goriva i pročistač goriva). Već neko vrijeme razmatra se da je možda metanol najbolji kandidat za gorive ćelije vozila. Metanol se konvertira u vodik na temperaturama od 220-240°C, proizvodeći plin koji sadrži 3:1 odnos vodika (H<sub>2</sub>) i ugljik-dioksida (CO<sub>2</sub>). Trenutno metanol se pravi u velikim količinama iz prirodnog plina, kao potrebna zaliha za kemijsku industriju. U budućnosti se može praviti

metanol iz bio mase, čime bi se produžilo postojanje motornih goriva (poslije potrošenih svih resursa nafte i prirodnog plina). [15]

Za rad gorivih ćelija je obavezan izotermni režim, pa se njihova temperatura mora održavati konstantnom. To se postiže sistemom za hlađenje koji odvodi suvišnu toplotnu energiju osiguravajući tako i proces kogeneracije (korištenje oslobođene toplote prilikom generiranja struje). Gorive ćelije bazirane na niskim radnim temperaturama imaju i nisku reaktivnost učesnika u reakciji, zbog čega je kod njih obavezno prisutan katalizator (neki plemeniti metali) koji izuzetno intenziviraju reakciju. Vodik i kisik neprestano oblažu respektivno anodu i katodu sa suprotnih strana elektrolita (propusne membrane) zahvaljujući izbrazdanim pločama (bipolar plates ili bipolarne ploče), koje osiguravaju njihovo strujanje uz elektrode. [15]

Elektrolit u PEM (Proton Exchange Membrane) gorivoj ćeliji je ključna komponenta koja omogućuje provođenje protona ( $H^+$ ) tijekom elektrokemijskih reakcija koje se odvijaju unutar ćelije. Elektrolit u PEM gorivoj ćeliji obično je tanka membrana koja je impregnirana ili prekrivena određenim elektrolitnim materijalom. Glavna uloga elektrolita je odvajanje vodika na anodi i kisika na katodi te omogućavanje samo prolaska protona ( $H^+$ ), dok elektroni ( $e^-$ ) putuju između anode i katode izvan gorive ćelije, čime se stvara električna struja.

Postoji više tipova materijala od kojih se pravi polimerna membrana, a najzastupljeniji je nafion. Membrane od nafiona obično imaju debljinu od 50 do 175 mikrona (50 mikrona je debljina lista papira), i pošto uvijek mora biti vlažna izgledaju kao mokre filmske trake. [14]

Radna temperatura PEM gorivih ćelija sa klasičnim polimer elektrolitima je 80 celzijusa. Za protonske membrane je važno da budu vlažne, jer tada one dozvoljavaju ionima  $H^+$  da prelaze na drugu stranu. Zato se radna temperatura treba održavati konstantnom na oko 80 °C da ne bi došlo do ključanja vode, tj. dehidracije membrane uslijed isparavanja vode. Ukoliko voda, koja drži vlažnost membrane, prebrzo ispari dolazi do otpora u kretanju iona  $H^+$  kroz elektrolit, što može dovesti do pucanja membrane. Pucanje membrane dovodi do direktnog spoja vode i kisika i povećavajući toplotu dolazi do oštećenja gorive ćelije. Ukoliko voda isparava previše sporo elektroda će biti „preplavljena“ tekućinom, tako sprečavajući prolazak reaktanta kroz elektrolit i samo spriječavanje reakcije. Metoda kontrole vlažnosti membrane se radi pomoću EO pumpe (electroosmotic pump), a koja kontrolira tok vode u gorivoj ćeliji. [17]

## 4.2. Vrste, prednosti i nedostaci gorivih ćelija

Postoji nekoliko različitih vrsta gorivih ćelija, svaka s vlastitim karakteristikama, prednostima i primjenama. Ovdje su neke od najčešćih vrsta gorivih ćelija:

Gorive ćelije prema vrsti elektrolita dijelimo na :

- Gorive ćelije s alkalnim elektrolitom (AFC – Alkaline Fuel Cell);
- Gorive ćelije sa fosfornom kiselinom (PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell);
- Gorive ćelije s polimernom membranom kao elektrolitom (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cell);
- Gorive ćelije s rastaljenim karbonatima kao elektrolitom (MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell);
- Gorive ćelije s čvrstim oksidima kao elektrolitom (SOFC - Solid Oxide Fuel Cell);
- Gorive ćelije sa direktnom konverzijom metanola (DMFC);
- Gorive ćelije sa direktnom konverzijom etanola (DEFC).

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM FC): PEM gorive ćelije koriste protonsku izmjenjivačku membranu (PEM) kao elektrolit za provođenje protona. One rade na niskim temperaturama (obično između 50°C i 100°C) i imaju brz odziv, što ih čini pogodnima za primjene u vozilima, kao što su automobili na vodik.

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC): SOFC koriste čvrsti elektrolit, obično keramiku, koji može raditi na visokim temperaturama (između 500°C i 1000°C). Visoke temperature omogućuju veću učinkovitost, ali zahtijevaju duže vrijeme za zagrijavanje. SOFC se često koriste u stacionarnim elektranama i hibridnim sustavima.

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC): MCFC koriste elektrolit u obliku rastopljene karbonatne soli. Oni također rade na visokim temperaturama (oko 650°C) i pogodni su za stacionarne elektrane i industrijske primjene. MCFC mogu koristiti različite gorive plinove, uključujući prirodni plin.

Direct Methanol Fuel Cell (DMFC): DMFC koriste metanol kao gorivo i ne zahtijevaju poseban reaktor za pretvaranje goriva u vodik. Ovo ih čini prikladnima za prijenosne i manje aplikacije, poput prijenosnih punjača i manjih električnih uređaja.



Alkaline Fuel Cell (AFC): AFC koriste alkalnu otopinu kao elektrolit. Iako su bile jedne od prvih razvijenih gorivih ćelija, danas su manje u upotrebi i obično se koriste u specifičnim aplikacijama kao što su svemirske misije.

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC): PAFC koriste fosfornu kiselinu kao elektrolit. Oni imaju veću radnu temperaturu (oko 150°C) i obično se koriste u stacionarnim aplikacijama poput elektrana i komercijalnih sustava za kogeneraciju toplinske i električne energije.

Bacteria-Powered Fuel Cells: Ove gorive ćelije koriste mikroorganizme kao biokatalizatore za proizvodnju električne energije. Često se koriste u biotehnoškim aplikacijama i sensorima koji rade na biološkim supstratima.

Metal-Air Fuel Cells: Ove gorive ćelije koriste metal i kisik iz zraka kao gorivo. Mogu biti korisne za dugotrajne primjene kao što su baterije s visokim kapacitetom.

Svaka od ovih vrsta gorivih ćelija ima svoje specifične prednosti i ograničenja te je optimalna za određene aplikacije. Razvoj i istraživanje gorivih ćelija i dalje su aktivni kako bi se poboljšale performanse, smanjili troškovi i proširila njihova upotreba u različitim industrijama.

Tablica 7. Tipovi gorivih ćelija i njihove osobine [18]

Tip gorive Ćelije	Elektrolit	Gorivo	Stupanj iskorištenja	Radna temperatura	Način korištenja
S krutim oksidom SOFC	Kruti oksidi $ZrO_2/YO_2$	Većina ugljikovodika	45-70%	450-1000°C	Male, srednje i velike instalacije
S tekućim karbonatima, MCFC	Tekući karbonati, $Li_2CO_3/K_2CO_3$	Prirodni i generatorski plin, $H_2$	45 – 60%	650 - 700°C	Velike elektrane (samo el. energija)
S fosfornom kiselinom, PAFC	Fosforna kiselina $H_3PO_4$	$H_2$ , prirodni plin, metanol	35 – 42%	190 - 210°C	Male elektrane (s kogeneracijom)
Alkalne, AFC	Kalijev hidroksid, KOH	$H_2$ , prirodni plin, metanol	45 – 60%	60 – 130°C	Specijalistički (svemirska tehnologija, upotreba u transportu)

S polimernom membranom, PEFC	Kruta polimerna membrana	H <sub>2</sub> , metanol, prirodni plin	30 – 60%	70 – 90°C	Transport, prenosive aplikacije, male stacionarne aplikacije (s kogeneracijom)
------------------------------	--------------------------	---	----------	-----------	--

Prema načinu rada gorive ćelije dijelimo na [15]:

- primarne,
- sekundarne.

Primarne gorive ćelije gorivo dovode iz vanjskih rezervoara, a odvođe se produkti reakcije. Alkalne gorive ćelije su primjer takvih, a koriste se u svemirskim letjelicama. Za razliku od gorivih ćelija koje koriste već izdvojeni vodik, moguća je i izvedba kod koje se vodik potreban za rad gorive ćelije izdvaja iz nekog spoja koji je bogat vodikom. Na taj način se rješava veliki problem skladištenja vodika koji je potreban za rad. Nedostatak ove izvedbe je emisija ugljen dioksida. Jedno od mogućih goriva je metanol iz kojeg se vodik izdvaja pomoću vodene pare na 280 °C uz prisutnost katalizatora.

Sekundarne ili regenerativne gorive ćelije, koriste produkte reakcije koji se regeneriraju u polazne elemente uz prethodno dovođenje energije. [15]

Neki od tipova gorivih ćelija (poput polimerno elektrolitske membranske gorive ćelije - PEM, alkalne gorive ćelije - AFC) zahtijevaju čist vodik kao gorivo što samo po sebi predstavlja problem jer je dobivanje ali i čuvanje kemijski čistog vodika svojevrsan problem. [1]

Nusprodukti pri stvaranju električne energije su voda ili ugljični dioksid (u količinama manjima od sagorijevanja fosilnih goriva za dobivanje iste količine električne energije), te se gorive ćelije smatraju ekološki čistim izvorom električne energije. Vodik kao gorivo ima veliku energetska gustoću po jedinici mase. Pretvaranje kemijske energije u električnu je direktna, nema pretvaranja u neki među oblik energije i nema pokretnih dijelova. Materijali koje se koristi u izradi gorivih ćelija su većinom neotrovni. Područje primjena gorivih ćelija su, zavisno o tehnologiji gorivih ćelija, vrlo različita i vrlo široka. Koriste se u malim mobilnim aplikacijama, vozilima, velikim postrojenjima i šire. [15]

Najveća prednost gorivih ćelija je ujedno i jedna od najvećih slabosti, a to je vodik. Vodik kao čisti plin u Zemljinoj atmosferi gotovo da nije prisutan zbog svoje male relativne atomske mase, te se mora industrijski proizvesti, što zahtijeva velika ulaganja energije u proizvodnju. Skladištenje vodika je također veliki problem: da bi se vodik proveo u tekuće stanje pogodno za skladištenje, potrebne su vrlo niske temperature ili vrlo visok pritisak koje treba cijelo vrijeme održavati. Tekući vodik zahtijeva kompleksnu tehnologiju pohrane poput termički izoliranih rezervoara i zahtijeva posebno rukovanje kao sa svim kriogeničkim spojevima, još strože od tekućeg kisika. Čak i uz posebno izolirane rezervoare, teško je održavati dovoljno nisku temperaturu i vodik će postupno ispariti u okolni prostor (prosječno je to 1% dnevno). Vodik se vrlo lako rasprostranjuje zbog male veličine svog atoma. Curenje vodika predstavlja veliku opasnost zbog svoje izuzetne reaktivnosti s kisikom, što može dovesti do eksplozija i općenito je prijetnja sigurnosti. Problemi sa skladištenjem znače i problem za transport i distribuciju vodika, te težu primjenu kod mobilnih aplikacija. Kod primjene gorivih ćelija kod vozila u prometu, rezervoari vodika predstavljaju još jednu opasnost u slučaju prometnih nezgoda. [15]

Cijena i materijali potrebni za proizvodnju gorivih ćelija su također veliki nedostatak. Gorive ćelije su još mlada i skupa tehnologija. Platina, koja služi kao katalizator, vrlo je skupa i zalihe platine u svjetskim rudnicima nisu dovoljne za svjetski široku upotrebu u automobilima (procijenjene zalihe platine su 5600 t, za upotrebu u automobilima potrebno je 10 puta više). Za ostvarivanje 1 kW snage potrebno je otprilike 1g platine, no u budućnosti se cilja na smanjenje na 1 mg platine po 1 kW snage. [15] Ćelije koriste platinu kao katalizator i svi pokušaji da se cijena ćelija spusti ispod \$7000 po kilowatu ostali su bez rezultata. To znači da za automobil od 100 konjskih snaga trebamo 75 kilovata, a to znači i oko pola milijuna dolara vrijedne gorive ćelije. Kao rezultat svega toga, automobil s gorivim ćelijama, jednakih performansi kao vozilo na običan benzin skuplji je oko 400 puta. [20]

U visokoj energetskej efikasnosti leži najznačajnija komparativna prednost gorivih ćelija nad motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem. Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem se odlikuju efikasnošću koja se kreće od 10 do 20%. Iako podaci za efikasnost konverzije kod automobila variraju od proizvođača do proizvođača generalan je trend da su vozila sa gorivim ćelijama efikasnija od vozila sa motorom sa unutrašnjim sagorijevanjem što je potvrđeno i znanstvenim istraživanjima. Toyota je tako objavila istraživanje u kojem stoji da konvencionalno vozilo na benzin ima efikasnost od 16% dok je vozilo sa pogonom na vodik zabilježilo efikasnost od 48% što je tri puta više. Istovremeno General Motors je objavio da

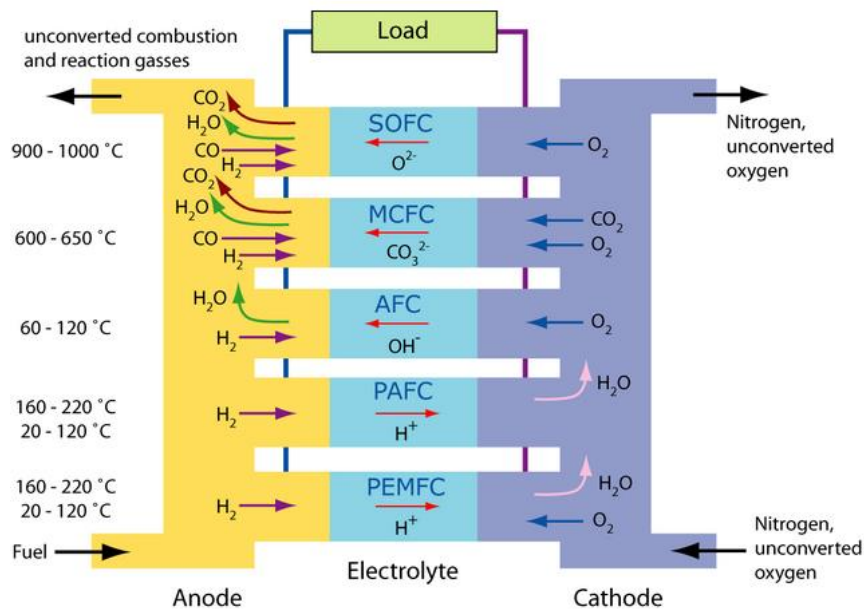
njegov hibridni model sa pogonom na vodik postiže dva puta veću efikasnost od konvencionalnog benzinskog modela iste kompanije. Zakoni termodinamike limitiraju iskorištenje motora SUS na 37%. [15]

Veliki dio energije u motorima SUS odlazi na otpadnu toplinu ali i trenje samog mehaničkog sistema što opet vodi stvaranju dodatne topline. Sa druge strane gorive ćelije nemaju otvoreni plamen i mehaničke pokretne dijelove već rade na principu direktne konverzije kemijske u električnu energiju. Veoma bitan zadatak prilikom komparacije efikasnosti tehnologije gorivih ćelija sa motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem je promatranje kompletne slike – od momenta kada se neophodno gorivo uzima iz okoline do momenta njegovog korištenja. [15]

Goriva ćelija radi neprekidno – nema potrebe za prekidom u radu zbog ponovnog punjenja. [15] Vozila sa pogonom na gorive ćelije rade tako što stvaraju električnu energiju u kemijskoj reakciji sagorijevanja vodika i kisika iz atmosfere u gorivoj ćeliji. Gorive ćelije su uređaji koje pretvaraju kemijsku u električnu energiju. Razlikuju se od baterija po tome što se proces pretvaranja odvija sve dotle dok se u ćeliju dovode gorivo i oksidirajuće sredstvo, dok je baterija napravljena s ograničenom količinom kemikalija, te je ispražnjena kada sve kemikalije iz reaguju. [12]

Treba još svakako napomenuti, da kao prvo, ćelije trebaju trajati godinama. Drugo, kisik koji je potreban ćelijama za rad dolazi iz atmosfere koja je mješavina plinova od kojih su svi osim kisika smetnja za rad ćelija. [1]

U razvoju novih gorivih ćelija zapaža se težnja ka eliminiranju najznačajnijih nedostataka postojećih sistema: niska tolerantnost prema ugljik dioksidu, ugljik monoksidu, sjedinjenima sumpora; povećanje specifične snage, gustoće struje ili radnog napona, eliminiranje skupih katalitičkih materijala i uvođenje novih konstrukcijskih materijala otpornijih na koroziju. Naj intenzivniji razvoj novih tipova gorivih ćelija događa se, međutim, u oblasti transporta. Imajući u vidu da transport na bazi fosilnih goriva, u globalnim razmjerima figurira kao jedan od najvećih zagađivača, goriva ćelija nalazi svoje mjesto kao ekološki siguran energentski izvor, tako da danas u operativnoj upotrebi ima skutera, automobila, autobusa, kamiona, brodova, podmornica, čak i specijalnih izviđačkih, bespilotnih aviona koje pokreće goriva ćelija. [15]



Slika 13. Grafički prikaz kemijskih procesa u gorivim ćelijama u zavisnosti od tipa [37]

Goriva za gorive ćelije variraju ovisno o vrsti gorive ćelije koja se koristi. Različite vrste gorivih ćelija koriste različita goriva kako bi proizvele električnu energiju. Evo nekoliko primjera:

**Vodik (H<sub>2</sub>):** Vodik je najčešće korišteno gorivo u gorivim ćelijama, posebno u PEM (Proton Exchange Membrane) gorivim ćelijama i AFC (Alkaline Fuel Cells). Vodik reagira s kisikom iz zraka da bi stvorio vodu, a tijekom te reakcije proizvodi se električna energija.

**Metanol (CH<sub>3</sub>OH):** Metanol se često koristi u DMFC (Direct Methanol Fuel Cells). U DMFC-ima, metanol se oksidira na anodi kako bi se proizvele električna energija i voda. Metanol je pogodan zbog svoje visoke energetske gustoće i tekućeg stanja pri sobnoj temperaturi.

**Etanol (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH):** Etanol se koristi u DEFC (Direct Ethanol Fuel Cells). Slično kao i kod metanola, etanol se oksidira na anodi kako bi se proizvele električna energija i voda. Etanol se može dobiti iz biljnih izvora i ima niže emisije CO<sub>2</sub> u usporedbi s fosilnim gorivima.

**Prirodni plin (CH<sub>4</sub>):** Prirodni plin se može koristiti u raznim vrstama gorivih ćelija, uključujući MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells) i SOFC (Solid Oxide Fuel Cells). Prirodni plin se obično reformira kako bi se proizveo vodik prije nego što uđe u gorivu ćeliju.

Amonijak (NH<sub>3</sub>): Amonijak se također može koristiti kao gorivo u nekim vrstama gorivih ćelija, poput AFC (Alkaline Fuel Cells) i PEM gorivih ćelija.

Ugljikov monoksid (CO): Ugljikov monoksid se može koristiti kao gorivo u nekim vrstama gorivih ćelija, kao što su PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) i DMFC (Direct Methanol Fuel Cells).

Druge vrste goriva: Osim navedenih, postoje i druga goriva poput boranovih spojeva i amonijak borana koji se koriste u nekim eksperimentalnim gorivim ćelijama.

Izbor goriva ovisi o vrsti gorive ćelije i primjeni. Svaka vrsta goriva ima svoje prednosti i nedostatke, uključujući energetska gustoća, dostupnost, infrastrukturne zahtjeve i emisije.

**Tablica 8.** Izlazne karakteristike PEM gorive ćelije u zavisnosti od prisutnosti ugljikovog monoksida/ugljikovog dioksida u gorivu [15]

Gorivo	Voltaža (V)	Gustoća energije (mA/cm <sup>2</sup> )	Snaga (W)
H <sub>2</sub>	0,17	430	100
H <sub>2</sub> , 25% CO <sub>2</sub>	0,68	430	96
H <sub>2</sub> , 25% CO <sub>2</sub> , 0,3% CO	0,71	215	50

Iz tablice 8. možemo zaključiti da kod čistog vodika imamo manju voltažu ali veću gustoću energije i veću snagu. Dok sa druge strane kada imamo prisutnost ugljikovog dioksida u koncentraciji od 25 % povećava nam se voltaža a gustoća energije ostaje ista dok nam se snaga neznatno smanjuje.

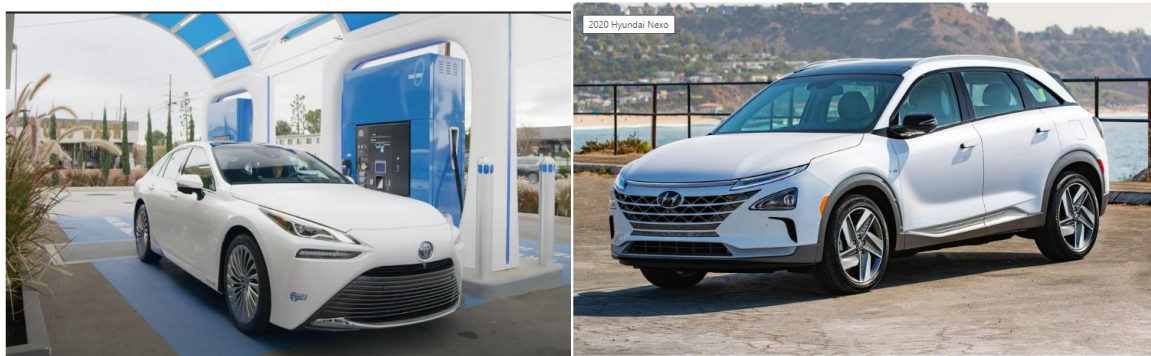
Zajednička prisutnost vodika, ugljikovog dioksida 25% i ugljikovog monoksida 0,3% donosi nam neznatno povećanje voltaže ali nam se znatno smanjuje gustoća energije kao i snaga

### 4.3. Primjena gorivih ćelija

Automobili na gorive ćelije su vozila koja koriste gorive ćelije za proizvodnju električne energije koja pokreće električni motor i omogućava vozilu da se kreće. Ovi automobili obično koriste vodik kao gorivo, koji reagira s kisikom iz zraka u gorivoj ćeliji kako bi se proizvela električna energija, a nusproizvod je voda (H<sub>2</sub>O).

Alternativni pogoni vozila su pogoni koji se smatraju ekološki prihvatljivim kroz smanjenje potrošnje nafte kroz upotrebe obnovljivih izvora energije. Primjeri su električni automobili, hibridni automobili, pogon na vodik ili auto plin. [50]

Tendencije razvoja "čistih" motornih goriva koja ne zagađuju okolinu, danas su sve više izražene, posebno zato što ne emitiraju emisije štetnih gasova, stvaraju malu buku i ne izazivaju druge vrste zagađenja. Jedan od danas aktuelnih zadataka automobilske industrije traži se u korištenju alternativnih goriva, odnosno alternativnih energetske potencijala. Ključni faktori uspjeha primjene alternativnih goriva su, prije svega, cijena goriva, mogućnost razvoja i širenja mreže pumpnih stanica, a zatim i performanse i sigurnost vozila na alternativni pogon. [2]



Slika 14. Toyota Mirai, automobil na gorive ćelije lijevo, Hyundai Nexo na gorive ćelije (desno)[38]

Osim za pogon putničkih vozila i autobusa, gorive ćelije su također prikladne i za pogon specijalnih vozila ili radnih strojeva (npr. vozila za golf-igrališta, viljuškare, kosilice za travu i sl). Uz to, gorive ćelije mogu poslužiti i za pogon motocikala.

"Trenutno, kilogram vodika košta između 10 i 17 dolara na postajama za vodik, što je otprilike 5 do 8,50 dolara po galonu benzina" za prevoženje iste udaljenosti. (Toyota Mirai automobil na vodik drži oko pet galona vodika.)

Toyota je lansirala svoj prvi automobil pogonjen vodikom, Toyota Mirai, u Japanu krajem 2014. i počela prodaju u Kaliforniji, uglavnom na području Los Angelesa, u 2015. U 2021. godini izišla je druga verzija automobila sa cijenom od 49500 – 66000 dolara. Automobil ima domet od 643 km, a punjenje rezervoara vodikom traje oko pet minuta.

Hyundai Nexo je korejski auto na vodik koji se pojavio 2018. g. po cijeni od oko 60000 dolara sa dometom ograničenim na 570 km i punjenje rezervoara traje do 5 min.

Širom svijeta se već uveliko koriste i demonstriraju autobusi na gorive ćelije. Oni ne zagađuju okolinu (nemaju emisiju nikakvih štetnih plinova – jedini produkt je voda), ekonomični su i nisu bučni. U Europi se već nekoliko godina realizira program „Inicijativa za uvođenje čistih autobusa“ koji je pokrenula je Europska komisija u srpnju 2017. S Pariškim klimatskim sporazumom koji je na snazi, EU je više nego ikad predana globalnoj tranziciji prema gospodarstvu s niskom emisijom ugljika. Lokalni i regionalni čelnici imaju ključnu ulogu u smanjenju emisije ugljika nadogradnjom naših prometnih sustava čineći ih čistijima, energetske učinkovitijima i održivijima. Mobilnost s niskom emisijom štetnih plinova donosi značajne koristi našim građanima dok istodobno jača inovativnost i konkurentnost naše industrije. Stoga svi moramo podržati prijevoz s nultim emisijama kao najučinkovitiji i najučinkovitiji oblik javne mobilnosti u našim regijama i gradovima.



Slika 15. Autobus na gorive ćelije [39]

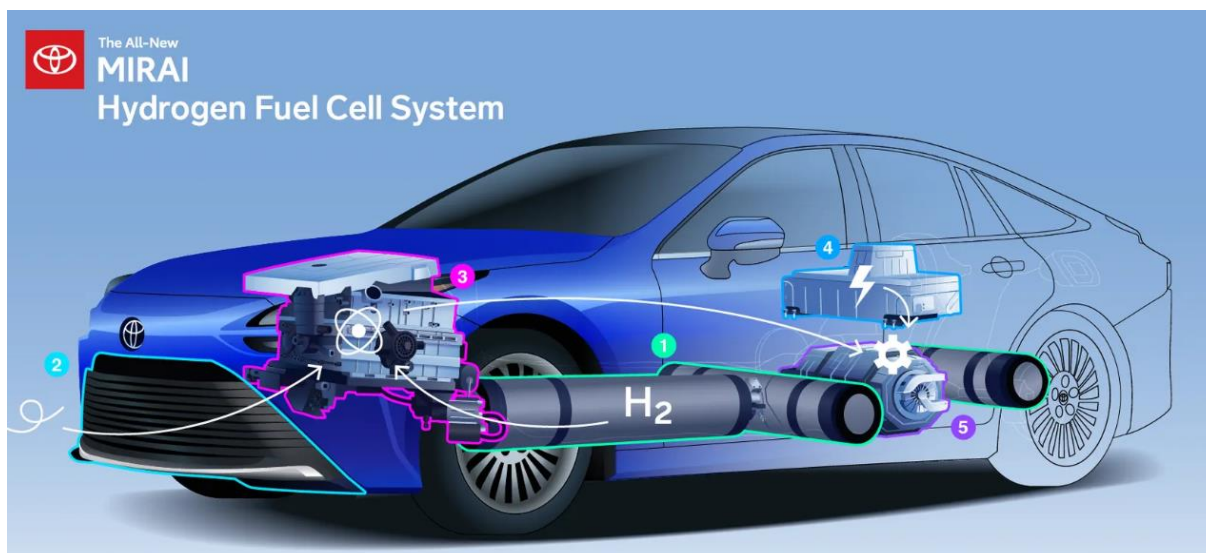
#### **4.4. Konstrukcija vozila na gorive ćelije**

Automobili na gorive ćelije (Fuel Cell Vehicles - FCV) imaju sličnu osnovnu konstrukciju kao i konvencionalni automobili, s nekoliko ključnih razlika u pogonu i spremištu goriva.

Konfiguracije automobila s gorivim ćelijama mogu biti:

- 1) Goriva ćelija daje svu potrebnu snagu;
- 2) Goriva ćelija daje nominalnu snagu – baterija daje vršnu snagu (paralelni hibrid);
- 3) Goriva ćelija samo puni baterije (serijski hibrid);
- 4) Goriva ćelija samo snabdijeva električne potrošače.





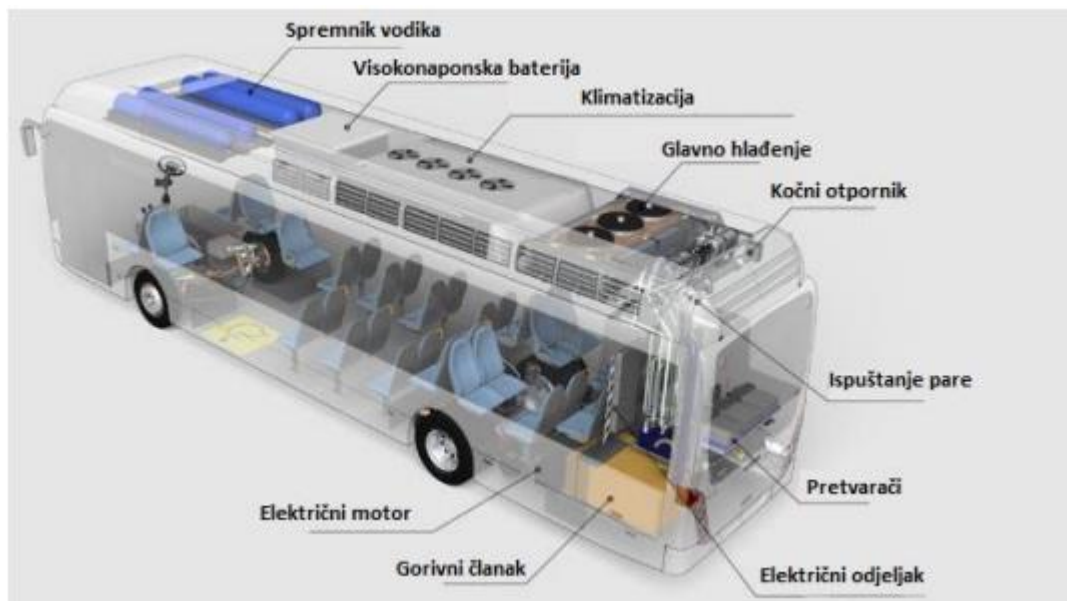
Slika 16. Prikaz automobila na gorive ćelije (Toyota Mirai sa glavnim komponentama)[40]  
 1. Spremnici Vodika, 2. Ulaz zraka, 3. Sistem gorivih ćelija, 4. Baterija, 5. Elektrićni motor.

Druga generacija Toyotine revolucionarne elektrićne limuzine s nultom emisijom i vodikovim gorivim ćlancima. Nova platforma omogućava dodavanje dodatnog (trećeg) spremnika vodika, pridonoseći tako povećanju doseg automobila za 30%, na oko 650 km. Potpuno rekonstruiran sustav gorivih ćlanaka, sa znaćajnim smanjenjem velićine i teŹine svih glavnih sklopova. Toyotina vizija budućeg održivog društva se temelji na vodiku i prepoznaje vrijednost vodika kao održivog i obilnog izvora za prijenos i pohranu energije. Ima potencijal ostvarivanja kretanja uz nultu emisiju ugljika, ne samo u cestovnim vozilima, nego isto tako i u vlakovima, brodovima i zrakoplovima, te stvaranja energije za industriju, urede i kućanstva. Osim toga, to je učinkovit naćin pohrane obnovljive energije uz mogućnost prijenosa onamo gdje je potrebna. Novi Mirai je opremljen litij-ionskom visokonaponskom baterijom umjesto nikal-metal hibridnog sklopa aktualnog modela. Iako je manja velićinom, energija je gušće pohranjena, pa je izlazna snaga veća, uz smanjeni utjecaj na okoliš. SadrŹi 84 ćlanaka, napon je 310,8 V, a kapacitet je 4,0 Ah. Ukupna teŹina je smanjena na 46,9 kg. Snaga je povećana s 25,5 kW x 10 sekundi na 31,5 kW x 10 sekundi. Paket gorivih ćlanaka je smješten u prednji prostor, dok su baterija i elektromotor smješteni straga, pa je tako postignuta ravnomjerna raspodjela teŹine sprijeda-straga od 50:50, ćime je Mirai dobio temeljne karakteristike stabilnosti automobila s motorom smještenim naprijed. Okolišne pogodnosti voŹnje Toyote Mirai nadmašuju puku nultu emisiju, i idu do „negativne emisije“ – ovaj automobil doista ćisti zrak dok se kreće.

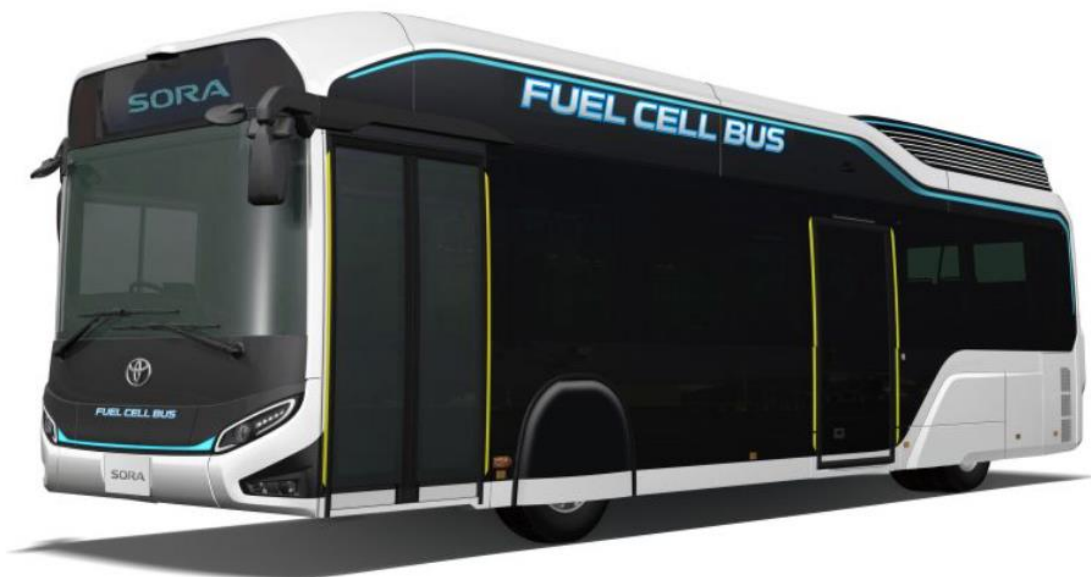
Toyotina inovacija, pročistač nalik katalizatoru je smješten u usisu zraka. Kako vozilo uvlači zrak radi dobave do gorivog članka, električni naboj na tekstilnom ulošku zraka hvata mikroskopske čestice onečišćenja, uključujući sumporov dioksid (SO<sub>2</sub>), dušične okside (NO<sub>x</sub>) i čestice PM 2,5. Ovaj sustav učinkovito uklanja 90 do 100% čestica promjera od 0 i 2,5 mikrona iz zraka dok ovaj prolazi kroz sustav gorivih članaka.

Osnovna konstrukcija autobusa na gorive ćelije slična je konstrukciji konvencionalnih autobusa, ali s ključnim razlikama u pogonu i skladištu goriva.

Smještaj spremnika za vodik u osobnim automobilima predstavlja značajan problem zbog visokih zahtjeva koji se postavljaju kod sistema spremnika. Za razliku od toga, kod autobusa postoji dovoljno mjesta na krovu, što je prednost i s gledišta sigurnosti jer je vodik lakši od zraka pa u slučaju propuštanja odlazi ravno u zrak.



Slika 17. Komponente autobusa na gorive ćelije i njegove osnovne karakteristike [41]



Slika 18. Toyota Sora, autobus na gorive ćelije [42]

Razvoj koncepta bio je vođen dvjema idejama: na najbolji način iskoristiti karakteristike jedinice gorivih ćelija i poboljšati udobnost putnika. Toyotin cilj je stvoriti autobus koji radi za svijet i za ljude, neštetan je prema okolišu i može doprinijeti zajednici izvan svoje uloge prijevoznog sredstva.

Koristi Toyotin sustav gorivih ćelija koji je projektiran za limuzinu Mirai s gorivim ćelijama. Ovo pruža vrhunsku ekološku izvedbu, ne ispuštajući ugljični dioksid ili "zabrinjavajuće tvari" (SoC) tijekom rada. Također je opremljen vanjskim sustavom napajanja velikog kapaciteta, s maksimalnom snagom od 9kW i opskrbom električnom energijom od 235kWh. To omogućuje Sori da služi kao izvor energije za hitne slučajeve, poput pružanja pomoći i podrške u prirodnim katastrofama.

Budući da je autobus dizajniran za korištenje velikog i različitog broja putnika u bilo kojem trenutku, Toyota je veliku pozornost posvetila praktičnosti, sigurnosti i bezbrižnosti. Cilj je bio pružiti svim putnicima ugodno iskustvo i potaknuti redovito korištenje autobusa.

Stoga je unutrašnjost opremljena vodoravno postavljenim sjedalima s automatskim mehanizmom za odlaganje kako bi se osigurao prostor za dječja kolica, invalidska kolica ili dodatna sjedala, prema potrebi.

Osam kamera visoke razlučivosti unutar i izvan vozila osiguravaju periferni nadzor, otkrivaju pješake i bicikliste u području oko vozila i upozoravaju vozača zvučnim i slikovnim upozorenjima.

Tablica 9. Karakteristike autobusa na vodik

Ukupna duljina (mm)	10,525
Ukupna širina (mm)	2,490
Ukupna visina (mm)	3,340
Kapacitet putnika – sjedeći	22
Kapacitet putnika – stajaći	56
Ukupni putnički kapacitet	78
FC sustav	Toyota FC Stack (kruti polimerni elektrolit)
Maksimalni FC izlaz	153 KS/114 kW x 2 jedinice
Vrsta elektromotora	AC sinkroni
Maksimalna snaga motora	152 KS/113 kW x 2 jedinice
Maksimalni moment motora	335 Nm x 2 jedinice
Visokotlačni spremnici vodika – broj	10
Nazivni radni tlak	70 MPa
Unutarnji volumen spremnika (litre)	600
Pogonska baterija – vrsta	Nikal-metal hidrid
Vanjski sustav napajanja – max. izlaz/opskrba	9kW/235kWh
Najveća brzina	70 km/h,
domet krstarenja	200 km ili više

## 4.5. Parametri efikasnosti gorive ćelije

Stupanj djelotvornosti (efikasnosti) gorive ćelije može se definirati na nekoliko načina, tj. kao termodinamički, naponski ili faradejski stupanj efikasnosti. [15]

Efikasnost kojom PEM gorive ćelije konvertiraju vodik u električnu energiju je proporcionalna naponu na kome ćelija radi. Kao prva aproksimacija ova efikasnost je 80% napona ćelije. Tako ako je napon ćelije 0.7 V, njena efikasnost je 56%. Veća efikasnost se može postići smanjivanjem struje ćelije, tj. povećavanjem njenog radnog napona. Ovo također smanjuje snagu ćelije. Kao posljedica mnogo ćelija treba instalirati da bi se proizvela snaga potrebna za određene primjene, a to uvećava troškove investicije. Uopće, korisnik ima sljedeća dva izbora [15]:

Da instalira relativno veliki blok, koji zahtjeva velike troškove. Da radi sa relativno visokim potencijalima individualnih ćelija sa velikom efikasnošću. I tada će troškovi goriva biti manji. Ili da instalira relativno mali blok, sa naravno manjim troškovima investicije. Da radi sa relativno malim potencijalima individualnih ćelija sa smanjenom efikasnošću. I tada će troškovi goriva biti veći.

### 4.5.1. Termodinamički aspekt rada gorive ćelije

Termodinamika je važan aspekt rada gorive ćelije jer pruža temeljni okvir za razumijevanje i analizu energetske procesa unutar gorive ćelije. Termodinamički aspekt rada gorive ćelije uključuje razmatranje energetske promjena, učinkovitosti i ograničenja tijekom elektrokemijske reakcije koja se događa unutar nje.

Da bi se opisali procesi u gorivoj ćeliji, model gorive ćelije se može predstaviti dvjema elektrodama povezanim elektrolitom, povezanim u električni krug vanjskim provodnikom. Ako goriva ćelija radi pod stalnim pritiskom ( $p$ ), i na temperaturi ( $T$ ), reverzibilni termodinamički proces može biti opisan funkcijom  $\Phi$ , čije su vrijednosti u stanju 1 i 2, u izrazu  $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ , nezavisne od puta kojim proces ide, što matematički znači postojanje totalnog diferencijala  $d\Phi$ . Za reverzibilni proces koji se odvija pri konstantnoj temperaturi i pritisku u gorivoj ćeliji,  $\Delta\Phi$  je jednako  $\Delta G$ , gdje je  $\Delta G$  promjena Gibsove slobodne energije. Pri tome, maksimalni korisni rad ( $L$ ), koji se dešava u tom slučaju u sistemu, iznosi  $\Delta G = -L$ . [15]

Pod uvjetom da su pritisak,  $p$  i temperatura,  $T$  konstante, važi:  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , gdje je  $H$ -entalpija, a  $S$ -entropija

Veličina  $\Delta H$  predstavlja toplotni efekt reakcije u gorivom bloku. Vrijednost  $\Delta G$  je elektrokemijske procese povezana sa elektromotornom silom (pa, tako i elektromotornom silom gorive ćelije,  $E$ ), jednačbom:  $\Delta G = -nFE$

Gdje je  $n$  – broj elektrona koji učestvuje u reakciji, a  $F$ , Faradejeva konstanta (96,487C).

Da bi se analizirala termička efikasnost gorive ćelije, definira se stupanj termičkog iskorištenja gorive ćelije:

$$\eta_k = \frac{\Delta G}{\Delta h} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H}$$

Stupanj termičkog iskorištenja gorive ćelije može biti: veći, manji ili jednak jedinici. [15]

Termička efikasnost gorive ćelije se može prikazati i preko odnosa radnog napona ( $U$ ) pri protjecanju struje ( $I$ ), i ravnotežnog napona ćelije ( $E$ ). Razlika između ravnotežnog i radnog napona na elektrodama gorive ćelije uzrokovana je sumom polarizacije zbog protjecanja struje (odnosno, realnih, a ne ravnotežnih uvjeta rada ćelije), za koliko je radni napon manji od ravnotežnog napona, tj. elektromotorne sile gorivog bloka. [15]

$$\eta_t = \frac{\text{korisnaenergija}}{\Delta H} = \frac{\text{korisnaenergija}}{\Delta G / 0,83} = \frac{U \cdot I}{(E \cdot I) / 0,83} = \frac{0,83 \cdot U}{E}$$

Ako se za reakciju vodika i kisika na temperaturi od 298 K i pod pritiskom 101,3 kPa, uzme tablična vrijednost za standardnu elektromotornu silu, koja iznosi 1,229 V, tada se, na osnovu prethodne jednačbe, može definirati idealna termička efikasnost kao [15]:

$$\eta_{i,t} = 0,83 \cdot \frac{U}{1,229} = 0,675 \cdot U$$

#### 4.5.2. Strujni i naponski aspekt rada gorive ćelije i kinetika reakcija u gorivoj ćeliji

Strujni i naponski aspekt rada gorive ćelije, zajedno s kinetikom reakcija, igra ključnu ulogu u razumijevanju kako goriva ćelija generira električnu energiju.

Faradejev zakon elektrolize glasi: Masa supstance proizvedene ili potrošene od jedne elektrode proporcionalna je električnom pr otoku kroz ćeliju. Ekvivalentne mase različitih supstanci biće proizvedene ili potrošene od jedne elektrode pri protoku unaprijed definiranog električnog punjenja kroz ćeliju. Primjenjeno na slučaj PEM gorivih ćelija lako se dolazi do relacije koja određuje električnu struju i količinu potrošenog vodika u adekvatnoj reakciji:

$$F_{H_2} \left[ \frac{mol}{s} \right] = \frac{I \cdot \left[ A = \frac{C}{s} \right]}{2 \cdot F \left[ \frac{C}{mol} \right]}$$

Gdje je  $F_{H_2}$  volumni protok vodika,  $F$ -faradejeva konstanta (96,487 C/molu). Dvojka proizlazi iz činjenice da se pri redukciji svakog mola vodika oslobađaju po 2 elektrona. [15]

Svaka ćelija ponaosob ponaša se prema vlastitoj kompoziciji i strukturi određujući vlastitu ovisnost između njenog napona i gustoće struje. Kada se promatra PEM goriva ćelija, padovi napona u njoj su posljedica sljedećih fenomena [15]:

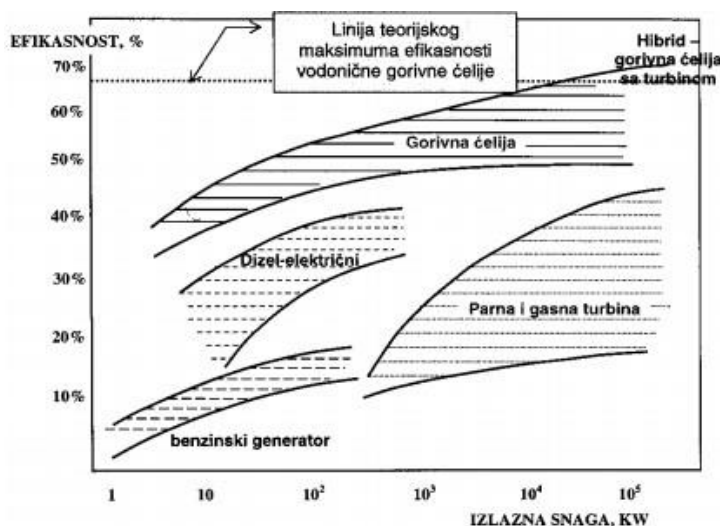
1. Ograničenja kinetike pristupa katodi, koja izaziva velike padove napona posebno u oblastima sa manjom gustoćom struje (nezavisno da li se na katodi privodi čist kisik ili zrak).
2. Ograničenja kinetike pristupa anodi, koje izaziva padove napona linearno srazmjerne gustoći struje. Uslijed povećane elektro-oksidacije vodika, povećava se gustoća struje a napon se smanjuje.
3. Ograničene protonske provodnosti u sloju katalizatora i membrane (elektrolitu). U slučaju katode (strane sa koje se dovodi kisik) omski gubici u membrani predstavljaju najveći udio u ukupnim gubicima u oblasti iskoristivosti gustoće struje.
4. Uslijed „potapanja“ katode, kada se voda proizvedena u reakciji ne odvodi efikasno iz ćelije. Dolazi do nagomilavanja vode na elektrodi, i time se sve manje iskorištava kisik u njoj.

Ovaj fenomen se ispoljava tipično kod primjene čistog kisika jer se tada postižu ekstremne gustoće struja, koje su nemoguće ako je oksidans zrak.

Evidentno je da skup svih problema na katodi uzrokuje najveće gubitke u padovima elektromotorne sile, dok su omski gubici uslijed otpora membrane dosta smanjeni zbog korištenja ekstremno tankih folija nafiona i drugih tehnološki poboljšanih elektrolita. Katodina kinetika demonstrira se pod pretpostavkom da su gubici na anodi zanemarivi. Struja proistekla iz elektrokemijske reakcije zavisi ne samo od koncentracije reagenasa, već i od razlike potencijala između katalizatora i elektrolita. [15]

Iskorištenje napona gorive ćelije definirano je odnosom napona na elektrodama gorive ćelije ( $U$ ) pri određenoj struji, i elektromotorne sile (napona otvorenog kruga) gorive ćelije ( $E$ ), a definirano je:

$$\eta_u = \frac{U}{E}$$



Graf 1. Efikasnost različitih sistema za transformaciju energije u električnu energiju[43]

Iz dijagrama na gornjoj slici zapaža se da goriva ćelija, ne samo što ima najveću efikasnost u odnosu na sve ostale sisteme (benzinski agregat; dizel-agregat; parnu ili plinsku turbinu), nego se ovaj parametar relativno malo mijenja u širokim granicama opterećenja (snage agregata), što kod drugih sistema (toplotnih mašina), nije slučaj. [15]

Napon gorive ćelije čini razlika potencijala elektroda umanjena za vrijednost omske polarizacije. Uopćeno gledajući, za PEM gorive ćelije postoji tri vrste fenomena polarizacije: polarizacija aktiviranja, omska polarizacija i polarizacija koncentracije.

Polarizacija aktiviranja (starta reakcije). Da bi jedna kemijska reakcija uopće mogla da starta potrebno je da savlada energetske prag, tj. tzv. energija aktiviranja. Polarizacija aktiviranja



vezana je za brzinu kemijske reakcije i predstavlja potencijalnu razliku koju treba prijeći da bi reakcija išla željenom brzinom. Njen iznos u voltima iznosi od 50 do 100 mV.

Omska polarizacija. Ovaj tip polarizacije predstavlja pad napona uslijed omskih gubitaka u sistemu. Ovi gubici mogu nastati zbog materijala elektrolita i otpornost elektrona. Gubici uslijed omske polarizacije su jednaki proizvodu ukupne struje uspostavljene u električnom kolu i ukupne unutrašnje otpornosti ćelije.

Polarizacija koncentracije. Ova polarizacija vezana je za fenomene transporta masa koji inhibiraju reakcije na elektrodama, i proizlaze iz neadekvatne brzine pristizanja reagenata sa jedne, i oslobađanja od proizvoda reakcije u odnosu na zahtjeve za gustoćom struje koju treba ćelija da isporuči potrošaču sa druge strane.

Svi tipovi polarizacije odvijaju se i na anodi i na katodi, a efekt je takav da polarizacija podiže napon na elektrodi na kojoj se odvija reakcija oksidacije (anodi), a smanjuje ga na elektrodi na kojoj se odvija reakcija redukcije (katoda). [15]



Graf 2. Ovisnost gustoće snage od gustoće struje gorivih ćelija [10]

Također i elektrokemijska efikasnost opada zato što goriva ćelija pod opterećenjem pokazuje manju gustoću snage efekata polarizacije koji se povećavaju sa porastom gustoće struje. Koeficijent korisnog djelovanja elektrokemijske reakcije (naponski koeficijent) definira se kao odnos napona neopterećene ćelije i ćelije sa opterećenjem. [10]

## **4.6. Cijena i budući razvoj vozila na gorive ćelije**

Cijena sistema gorivih ćelija modela PEM (Proton Exchange Membrane) od 80 kilovata (kW) može značajno varirati ovisno o različitim čimbenicima, uključujući proizvođača, tehnološki napredak, količinu i dodatnu opremu. Cijene se također mogu razlikovati od regije do regije i ovisiti o trenutnom tržištu. Ovdje se navode okvirne cijene za takav sustav, ali napomena je da se radi o procjenama, a stvarne cijene mogu varirati.

Za komercijalne i industrijske sustave gorivih ćelija PEM od 80 kW, cijene se često mjere u stotinama tisuća do milijuna dolara. Troškovi će ovisiti o specifikacijama sustava, kao što su dodatna oprema (npr. spremnici za vodik), instalacija, i potrebna infrastruktura.

Ako razmatrate vozila na gorive ćelije s ovim kapacitetom, cijene će biti niže u usporedbi s komercijalnim i industrijskim sustavima. Cijena će također ovisiti o proizvođaču i modelu vozila. Cijene osobnih automobila na gorive ćelije s PEM tehnologijom obično su više nego za konvencionalne benzinske ili električne automobile.

U mnogim zemljama i regijama postoje poticaji i subvencije za poticanje upotrebe gorivih ćelija, što može značajno utjecati na konačnu cijenu. Ove poticaje mogu pružiti lokalne i nacionalne vlade, te ih treba uzeti u obzir prilikom procjene troškova.

Također je važno razmotriti troškove goriva (vodik) i održavanja sustava tijekom vijeka trajanja. Vodik može biti skup, ali postoje različiti načini za snižavanje troškova, uključujući izvor vodika i pregovaranje za bolje uvjete nabave.

Sustavi gorivih ćelija PEM od 80 kW obično imaju visoku učinkovitost i dugotrajnost, što može opravdati viši početni kapitalni trošak kroz niže operativne troškove tijekom vijeka trajanja.

Cijene se stalno mijenjaju kako se tehnologija gorivih ćelija razvija i postaje masovnija. Prije nego što donesete odluku o nabavi sustava gorivih ćelija, preporučuje se konzultirati se s proizvođačem ili distributerom kako biste dobili precizne cijene i detaljne informacije o troškovima i potrebnoj infrastrukturi za vašu specifičnu primjenu.

## 4.7. Budući razvoj vozila na gorive ćelije

Budući razvoj vozila na gorive ćelije ovisi o nizu čimbenika, uključujući tehnološki napredak, ekonomske uvjete, infrastrukturu i regulativna ograničenja. Iako su vozila na gorive ćelije već dostigla komercijalnu dostupnost u nekim regijama, postoje i dalje izazovi i prilike za njihov daljnji razvoj. Evo nekoliko ključnih aspekata budućeg razvoja:

- Povećana učinkovitost i snaga
- Smanjenje troškova
- Povećanje dometa
- Infrastruktura za vodik
- Održivost
- Regulativa
- Konkurencija s električnim vozilima
- Industrijske primjene

Jedan od glavnih ciljeva budućeg razvoja je povećanje učinkovitosti gorivih ćelija i povećanje snage. To bi omogućilo vozilima na gorive ćelije da postanu konkurentnija s konvencionalnim vozilima s unutarnjim izgaranjem i električnim vozilima po pitanju brzine i performansi.

Cijena gorivih ćelija i pripadajuće infrastrukture trenutačno je visoka. Razvoj je usmjeren na smanjenje troškova kako bi se vozila na gorive ćelije učinila pristupačnijima širokom spektru kupaca. Masovna proizvodnja i ekonomija razmjera ključni su za postizanje nižih troškova.

Domet vozila na gorive ćelije već je značajan, ali postoji potreba za daljnjim povećanjem kako bi se udovoljilo zahtjevima potrošača. To uključuje razvoj većih spremnika za vodik i učinkovitijih gorivih ćelija.

Nedostatak infrastrukture za punjenje vodikom i dalje je veliki izazov za vozila na gorive ćelije. Budući razvoj uključivat će širenje mreže vodikovih punionica kako bi se omogućilo praktično punjenje vozila.

Održivost će igrati sve važniju ulogu u razvoju vozila na gorive ćelije. Očekuje se da će se tražiti održivi izvor vodika, a također će se obratiti pažnja na ekološki utjecaj proizvodnje gorivih ćelija i komponenti.

Regulatorna tijela mogu imati značajan utjecaj na razvoj vozila na gorive ćelije. Poticaji, porezi i ograničenja emisija mogu utjecati na prihvaćanje ovih vozila na tržištu.

Vozila na gorive ćelije suočavaju se s konkurencijom od električnih vozila koja se brzo razvijaju. Budući razvoj mora omogućiti vozilima na gorive ćelije da se natječu po pitanju doleta, cijene i brzine punjenja.

Vozila na gorive ćelije imaju potencijal za široku primjenu u industrijskim sektorima, kao što su teretni kamioni, autobusi, vozila za prijevoz tereta i radne strojeve. Razvoj ovih primjena može pridonijeti bržem usvajanju tehnologije.

S obzirom na ove izazove i prilike, budućnost vozila na gorive ćelije može biti svijetla, posebno u sektorima gdje su čisti izlasci i visoka energetska učinkovitost od suštinskog značaja. No, kako bi postala dominantna opcija za osobna vozila i šire tržište, gorive ćelije morat će se suočiti s konkurencijom od drugih naprednih tehnologija, kao što su električna vozila s baterijama, te se moraju dalje razvijati kako bi zadovoljile potrebe.

#### **4.8. Stanica za punjenje vodikom**

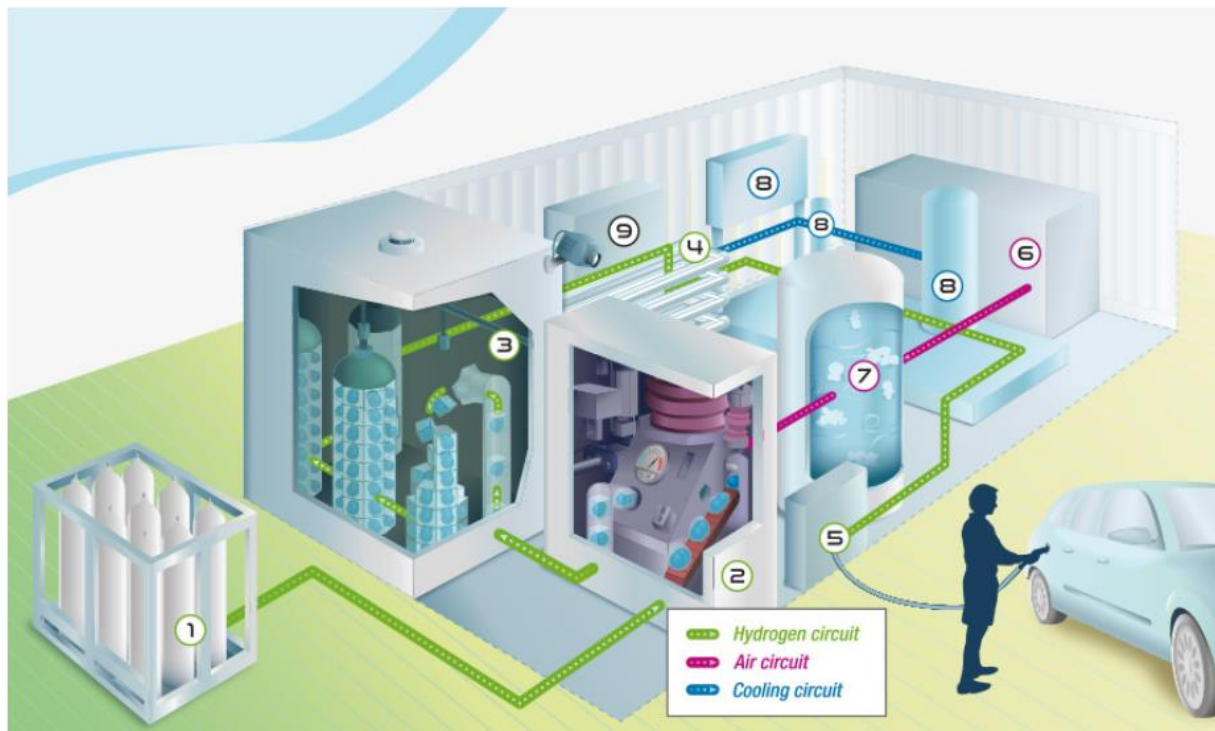
U 2022. u svijetu je počelo s radom 130 stanica za punjenje vodikom, od kojih 73 u Aziji i 11 u Sjevernoj Americi. U Europi je otvoreno 45 novih vodikovih postaja, ponovno više nego ikada prije. Kao i prethodne godine, Južna Koreja je zemlja koja je dodala najveći broj novih postaja. Ovo je rezultat 15. godišnje procjene H2stations.org, informacijske službe Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST). U međuvremenu je punjenje vodikom dostupno u 37 zemalja.

Krajem 2022. diljem svijeta bilo je u funkciji 814 stanica za dolijevanje vodikom. Već postoje konkretni planovi za 315 dodatnih lokacija za vodikove postaje. Sada možete napuniti vodik u 37 zemalja, a Kolumbija, Cipar i Izrael su najnoviji dodaci na popisu.

Sjeverna Amerika je prošle godine dodala 11 novih vodikovih postaja. Sa 70 operativnih stanica u Kaliforniji od ukupno 89. [20]

Stanica za punjenje vodikom (HRS) puni FCEV-ove vodikom pod tlakom. Jednostavan HRS sastoji se od spremnika za pohranu vodika, kompresora plinskog vodika, sustava predhlađenja i raspršivača vodika, koji raspršuje vodik pod tlakom od 350 ili 700 bara, ovisno o vrsti vozila.

Tipičan automobil na vodik napunit će se gorivom za tri minute, a autobus za sedam minuta.  
[21]



Slika 19. Kako radi stanica za punjenje vodikom.[44]

Zeleni vodik jedna je od izvrsnih alternativa u smislu održive mobilnosti, a za to su neophodne hidrogenske stanice, odnosno hidrogenske pumpe koje služe kao stanica za točenje goriva.

Zeleni vodik, dobiven elektrolizom iz obnovljive električne energije — koja odvaja vodik od kisika prisutnog u vodi — pozicioniran je kao jedna od najvažnijih alternativa tradicionalnim izvorima energije i ključni element u težnji prema dekarbonizaciji prometa i održivoj mobilnosti.

Vodik je najčešći kemijski element u prirodi, a vozila na vodikov pogon dostupna su već više od deset godina pa je sljedeći korak korištenje vodika iz obnovljivih izvora električne energije, odnosno zelenog vodika.

Glavne prednosti ove vrste vozila su što nude veću razinu autonomije i manju ovisnost o bateriji te su, za razliku od tradicionalnih električnih vozila, vremena punjenja goriva slična onima kod vozila s unutarnjim izgaranjem. No, da bi to postalo stvarnost, potrebno je proširiti mrežu vodikovih postaja.

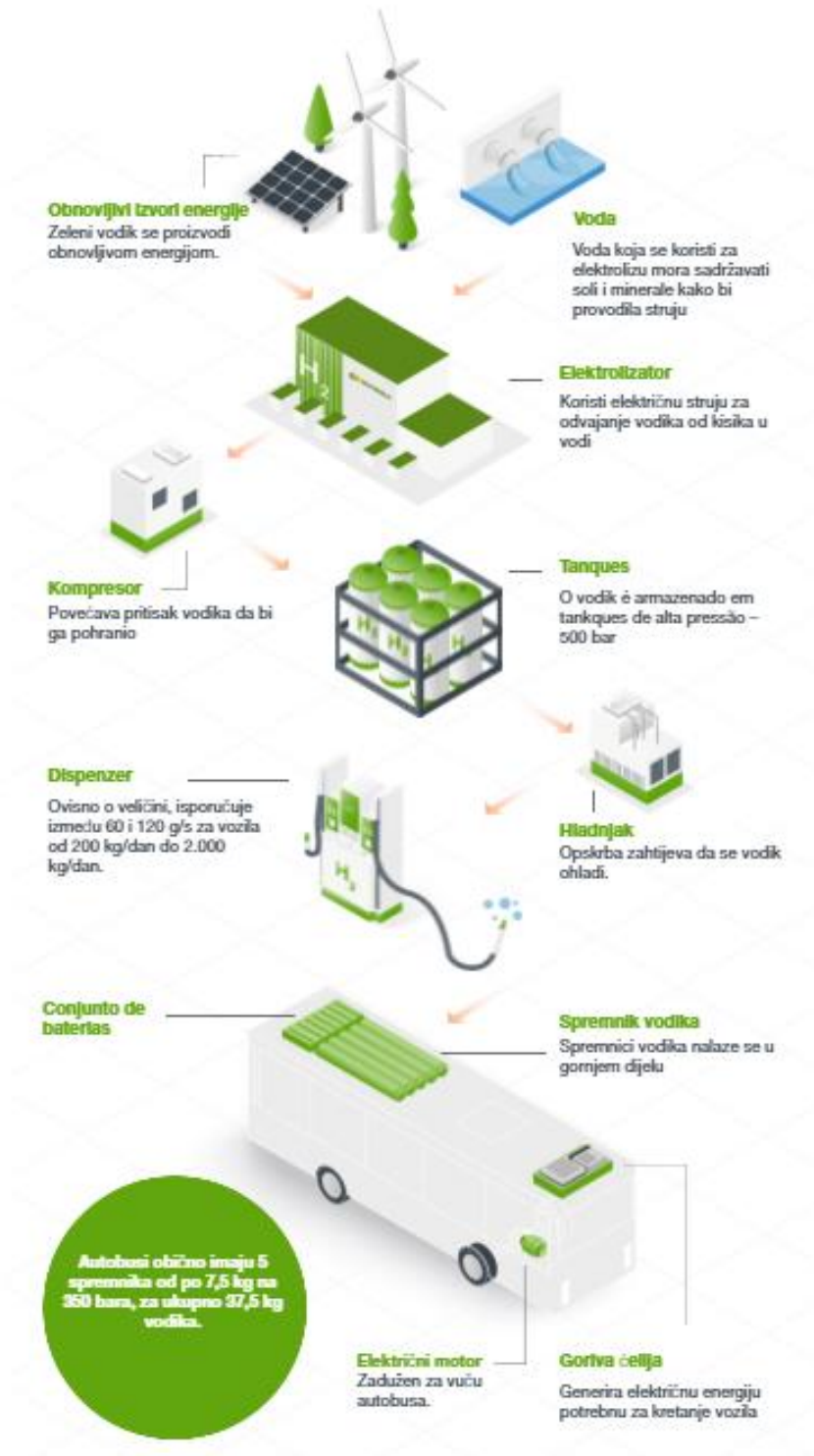
Proces točenja goriva na postaji za vodik ne razlikuje se mnogo od onog na konvencionalnoj benzinskoj postaji, iako postoje neki detalji koji čine iskustvo malo drugačijim. To je zato što se vodik dovodi pod visokim tlakom i, budući da se radi o izuzetno hlapljivom plinu, veza između spremnika vozila ili priključne točke i pumpe mora biti vodonepropusna .

Vodik se pumpa u spremnik goriva vozila, koji pokreće gorivu ćeliju koja proizvodi električnu energiju potrebnu za pogon vozila. Jedini proizvedeni otpad je vodena para , koja se izbacuje kroz ispušnu cijev.

Za razliku od konvencionalnih benzinskih postaja, vodik se prodaje na kilograme, a ne na litre, a vrijeme punjenja goriva za konvencionalni autobus - koji obično ima kapacitet između 30 i 37,5 kilograma - nije duže od 12 minuta. A na pitanje koliko autobus na vodik troši , procjenjuje se na otprilike 8 kilograma na 100 kilometara , tako da bi domet vozila na vodik trenutno na tržištu bio oko 400 kilometara.

## POSTAJE ZA VODIK

Proces punjenja goriva u postaji za vodik vrlo je sličan onom na konvencionalnoj benzinskoj postaji, iako se vodik dovodi pod visokim tlakom



Slika 20. Zeleni vodik, od proizvodnje do potrošača [45]

Na slici 19 prikazano je dobivanje zelenog vodika pomoću obnovljivih izvora energije putem vjetroelektrana ili fotonaponskih ćelija. Struja dobivena iz obnovljivih izvora energije napaja elektrolizator putem kojega elektrolizom proizvodimo vodik. Koji se potom pomoću kompresora kompresira u spremnike za vodik pod visokim tlakom. Koji mora biti ohlađen. Zatim se na samoj stanici za punjenje dispencira i puni tankove na autobusu. A autobus zatim pomoću gorivih ćelija pretvara vodik u el. energiju pomoću koje pokreće el. motore na samom autobusu.

Povećanjem mreže punionica povećavamo dostupnost za punjenje što je jedan od preduvjeta za rasprostranjeniju upotrebu vozila na vodik.

U Hrvatskoj za sada postoji samo jedna punionica za vodik i to na Fakultetu Strojarstva i brodogradnje u Zagrebu koja je otvorena 2019. g. koja je služila kao demonstracijska punionica za punjenje bicikla.

2022. godine Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja je donijelo strategiju za vodik do 2050.

Hrvatska bi do 2025. godine trebala imati 10 punionica vodika koje će biti strateški raspoređene diljem zemlje. Za elektrolizatore i postavljanje punionica vodika iz Nacionalnog programa oporavka i otpornosti te Operativnog programa konkurentnost i kohezija namijenjeno je približno 360 milijuna kuna.

Sukladno provedbi pravne stečevine EU i postavljanju nacionalnih energetske i klimatskih ciljeva, vodik je prepoznat kao jedan od značajnih energenata čija će uporaba u gospodarstvu, posebice u energetici, prometu i u drugim sektorima industrije, u dugoročnom razdoblju pridonijeti dekarbonizaciji društva i smanjenju CO<sub>2</sub> emisija.

Godišnja potrošnja ukupne energije u RH iznosi oko 100 TWh, od čega približno 50 % otpada na uvoz energije. Dio uvezene energije otpada na električnu energiju. RH sukladno

Nacionalnom planu oporavka i otpornosti 2021. – 2026. (u daljnjem tekstu: NPOO) planira priključiti 1500 MW novih izvora električne energije iz OIE u energetske sustav do kraja 2024..

Također, sukladno Energetskoj strategiji RH, planira se oko 2500 MW instalirane snage izgraditi do 2030. godine, a sve s ciljem osiguravanja proizvodnje čiste energije koja bi trebala



zadovoljiti vlastite potrebe.

Očekuje se da će proizvodnja vodika u RH biti bazirana na istraživanju, razvoju i primjeni svih mogućnosti proizvodnje nisko ugljičnog vodika u postojećim industrijskim središtima koji predstavljaju buduće centre potražnje za istim. [46]

Punionica vodika za gradske autobuse košta otprilike 1,5 milijuna eura. Takva punionica može napuniti 30ak autobusa dnevno za 6-10 minuta po autobusu [47]. Iako se troškovi instalacije punionice vodika čine veliki, EU kao veliki zagovornik zelene politike, može pomoću svojih fondova uvelike pridonijeti ostvarenju ovakvog projekta. Kao primjer sufinanciranja ovakvih projekata može se navesti onaj iz 2018. godine kada je EU sufinancirala instalaciju 8 novih punionica vodika u državama Beneluxa u vrijednosti od € 7.218.875,00 [48].

## **5. Komparativna analiza različitih pogonskih motora**

Osnovni nedostatak vozila na vodik, preko gorivih ćelija ili kao motor s unutrašnjim sagorijevanjem ima u proizvodnji vodika. Poboljšanjem tog procesa i energetske učinkovitosti znatno bi se smanjio nedostatak takvog tipa vozila.

Prednosti vozila na vodik, u gorivim ćelijama ili u motorima s unutrašnjim sagorijevanjem su [12]:

1. Velika količina dostupnog goriva, vodik koji je najrasprostranjeniji element u svemiru;
2. Visoka učinkovitost gorivih ćelija u odnosu na konvencionalne motore;
3. Vodikova vozila su jako tiha, što je danas u doba velikog zagađenja bukom od velike važnosti;
4. Jedina emisija iz samog vozila je čista voda (kod vozila na gorive ćelije);
5. Jednostavnije održavanje nego kod konvencionalnih vozila;
6. Duži životni vijek gorivih ćelija nego kod baterija;
7. Smanjena ovisnost o fosilnom gorivima.

Nedostatak vozila na vodik najviše se odnosi na cijenu i nepostojeću infrastrukturu. Nedostaci su sljedeći [12]:

1. Visoka cijena vozila
2. Količina energije za proizvodnju samog goriva;
3. Nedostatak infrastrukture;
4. Zapaljivost i eksplozivnost vodika;
5. Potreba za rezervoarima visokog pritiska vodika na samim vozilima;
6. Visoki napon na vozilima zbog baterija.

Komparativna analiza vozila s motorom SUS, električnih vozila i vodikovih vozila s gorivim ćelijama temelji se na istraživanju univerziteta u Michiganu, s njihovog istraživačkog instituta za promet. Naziv samog istraživanja je: „The relative merits of battery electric and fuel cell vehicles“, točnije „Prednosti električnih vozila i vozila s gorivim ćelijama“. Istraživanje je provedeno u veljači 2016. godine. Analiza je temeljena na trenutnim modelima i trenutnom stanju na tržištu, uzimajući u obzir i vozila modelske godine 2016. Također vizualno su predstavljeni najbolji i najlošiji sistemi prema odabranom kriteriju. Budući da se analiza vrši prema američkim standardima i na američkom tržištu, agencije koje provode analize su pod nadzorom vlasti unutar savezne države. [12]

Tablica 10. Usporedba SUS motora, baterijskih električnih vozila (BEV) i vozila s gorivim ćelijama (FCV) [12]

Kriterij	Motor SUS	Električni (BEV)	Gorive ćelije (FCV)
Vrsta goriva	Benzin/Dizel	Električna energija	Vodik
Broj dostupnih modela vozila	287	13	3
Prosječna potrošnja goriva	9 l / 100 km	2,2 l / 100 km	4 l / 100 km
Raspon potrošnje goriva	4,7 – 20 l / 100 km	2 – 2,8 l / 100 km	3,5 – 4,7 l / 100 km
Učinkovitost po prijeđenom putu	0,10 \$	0,04 \$	0,09 \$
„Well-to-wheels“ emisija (g/mi)	356 – 409	214	260 -364

„Well-to-wheels“ potrošnja goriva (BTU/mi)	3791 – 4359	54	27 – 67
Domet (prosjek)	672 km	177 km	465 km
Domet (min – max)	450 – 1000 km	99 – 413 km	400 – 500 km
Vrijeme za nadopunu	5 min	20 – 30 min (DC punjač) 3,5 – 12 h (AC punjač)	5 - 30 min
Visoki napon	Ne	Da	Da
Visoki pritisak	Ne	Ne	Da
Dostupnost kvalificiranih mehaničara	Da	Ograničeno	Ograničeno
Dostupnost kvalificiranih osoba za hitne slučajeve	Da	Da	Ograničeno
Održavanje vozila	Oko 200 eura godišnje	Niža cijena održavanja od konvencionalnih vozila; moguća zamjena baterije kroz životni ciklus vozila	Niža cijena održavanja od konvencionalnih vozila; Rezervoar visokog pritiska zahtjeva češće inspekcije i održavanje

Prva stvar koja je bitna kod potrošača je raspon i izbor modela na tržištu jer on uvjetuje bolje prilagođeno vozilo osobnim potrebama potrošača, bolju cijenu i bolju kvalitetu. U kategoriji dostupnosti modela znatnu prednost imaju vozila s motorom SUS jer je trenutno dostupno preko 300 različitih modela za kupovinu. Električna vozila su trenutno po brojnosti na drugom mjestu i trenutno na tržištu ima više različitih modela. Skoro sve automobilske marke su počele proizvoditi ekološka, električna ili hibridna vozila, što je dovelo do povećanja

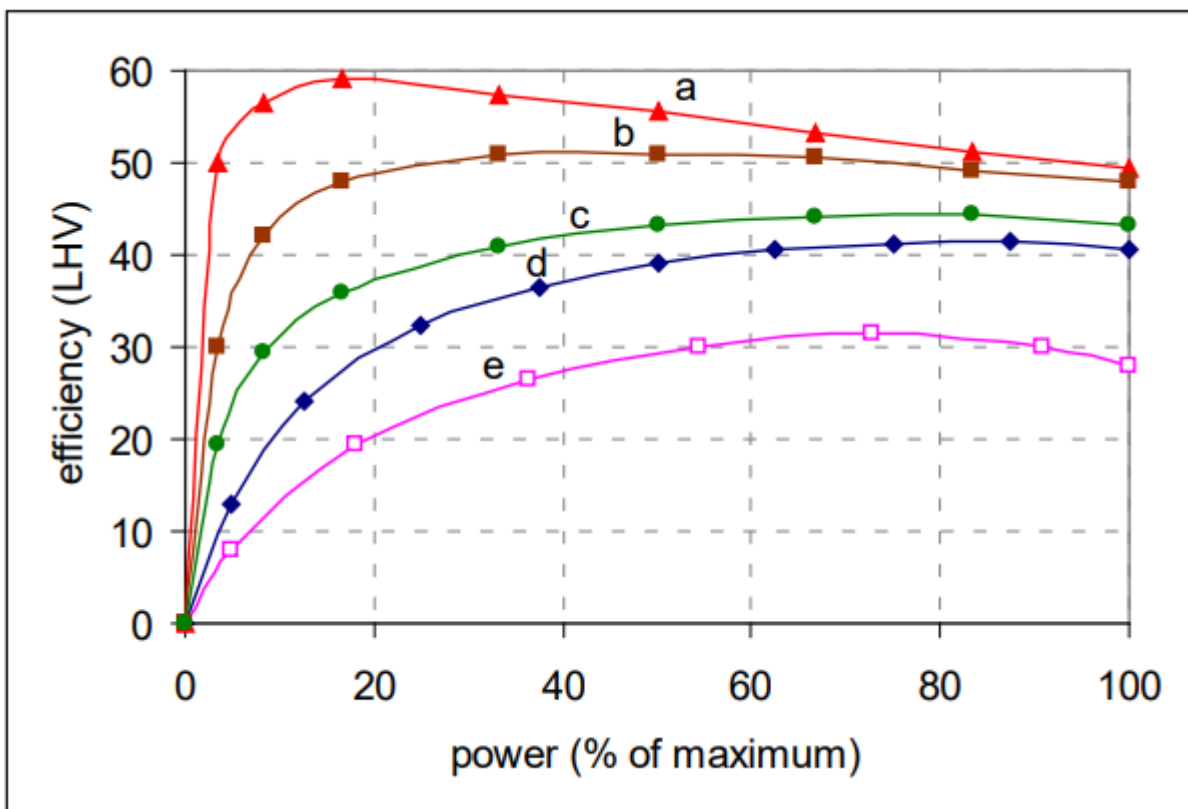
ponude modela u zadnjih nekoliko godina. Određeni proizvođači istražuju opciju sa gorivim ćelijama u komercijalnim vozilima a trenutno ih je samo nekoliko dostupno na tržištu. Vozila s gorivim ćelijama imaju znatan nedostatak već u početnoj fazi razmatranja kod potrošača zbog malog broja modela i problema sa infrastrukturom za nadopunjavanje vodika., [12]

Kod usporedbe prosječne potrošnje vozila a koje je najbitniji pokazatelj efikasnosti pogona i mogućnosti određenog tipa vozila. Obzirom da električna i vodikova vozila ne koriste naftne derivate za pokretanje svojim motorima, dolazi se do prvog problema kod usporedbe. Zbog toga će se uzeti prosječna potrošnja vodika u gorivim ćelijama i električne energije kod električnih vozila te ih pretvoriti u ekvivalent potrošnje vozila s unutrašnjim sagorijevanjem, točnije koliko bi u prosjeku takva vozila trošila benzina na stotinu kilometara. Uzimaju se samo vozila proizvodnje 2016. godine, te će se gledati mješovita vožnja uključujući izvangradsku i gradsku vožnju, tj. otvorenu cestu gdje vozila SUS imaju određenu prednost zbog mjenjača. Prosječna potrošnja vozila SUS se kreće oko 9 litara na 100 kilometara. Pretvorbom potrošnje električnih vozila u benzin, dolazimo do broja od 2.2 litre na 100 kilometara, što je 4 puta niže od usporedivog vozila SUS. Ovdje trebamo uračunati i mogućnost regenerativnog kočenja kod električnih vozila što im dodatno povećava efikasnost. Vozila na vodik s gorivim ćelijama imaju potrošnju od 4 litre vodika na 100 kilometara što ih svrstava u sredinu ove usporedbe. Potrošnja vozila na vodik s gorivim ćelijama je znatno veća od usporedivih električnih vozila, ali i duplo manja od vozila SUS. Ovdje se uzima u obzir i cijena vodika, što to je pokriveno u sljedećem kriteriju. [12]

Sljedeće područje uspoređuje cijenu derivata ili energije po prijeđenom putu. Pošto je ovo istraživanje proizvedeno od strane američkog prometnog istraživačkog instituta Michigan, sljedeće veličine su u imperijalnom sustavu mjera. Također treba uzeti u obzir da je cijena benzinskog goriva znatno niža od cijene vodika. Trenutna cijena po udaljenosti kretanja vozila SUS je 0.12\$, dok je kod električnih vozila to znatno niže 0.05\$, a kod gorivih ćelija cijena se opet penje na 0.10\$ po prijeđenom putu. [12]

Klasična vozila s motorom SUS napune se za par minuta na benzinskoj stanici, električna vozila uz brze punjače, napune se za najbrže pola sata. A putem konvencionalnog, sporog načina punjenja koji je bolji za ispravnost i rad baterije, trajanje punjenja je od 4 do 8 sati. Vozila s gorivim ćelijama imaju vrijeme punjenja kao i vozila na benzin i dizel. Njih je samo potrebno nadopuniti, a postupak kao kod konvencionalnih vozila, od 5 pa do 30 minuta. Kod vozila na vodik problem predstavlja nepostojeća infrastruktura. [12]

Električna, hibridna i vozila s gorivim ćelijama imaju svoje prednosti i nedostatke što se tiče popravaka održavanja. Kod električnih vozila motor se sastoji od samo 2 dijela, statora i rotora, i nema potrebe za ugradnju transmisije i mjenjača, kompletnog sistema podmazivanja i slično. Cijena održavanja konvencionalnog vozila je znatno viša od cijene održavanja električnog vozila. Problem jedino može predstavljati zamjena baterije nakon životnog ciklusa same baterije. Danas proizvođači rade baterije nekoliko segmenata pa se i same baterije ne moraju promijeniti kompletne nego samo određeni segment koji je u kvaru ili kojem je pao kapacitet što smanjuje troškove znatno. Održavanje vozila s gorivim ćelijama je jeftinije nego kod konvencionalnih vozila, samo potrebno povećati broj pregleda na sistemu za komprimiranje vodika. [12]



Graf 3. Odnos snage i efikasnosti vozila [10]:

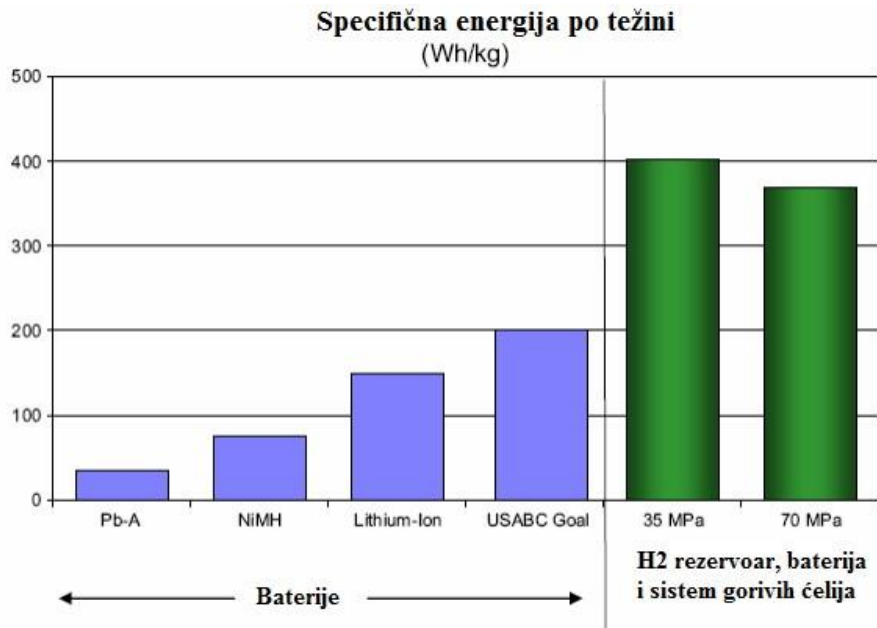
- a) Gorive ćelije, niski pritisak, niska temperatura
- b) Gorive ćelije, visoki pritisak, visoka temperatura
- c) Gorive ćelije s reformatorom goriva
- d) Dizel goriva
- e) Benzinski motor

Graf 3. pokazuje odnos snage i efikasnosti vozila u odnosu na vrstu goriva kojim je pokretano. Vidimo da je odnos snage i efikasnosti skoro dvostruko veći kod vozila na gorive ćelije u odnosu na vozila pokretana na benzinsko gorivo.

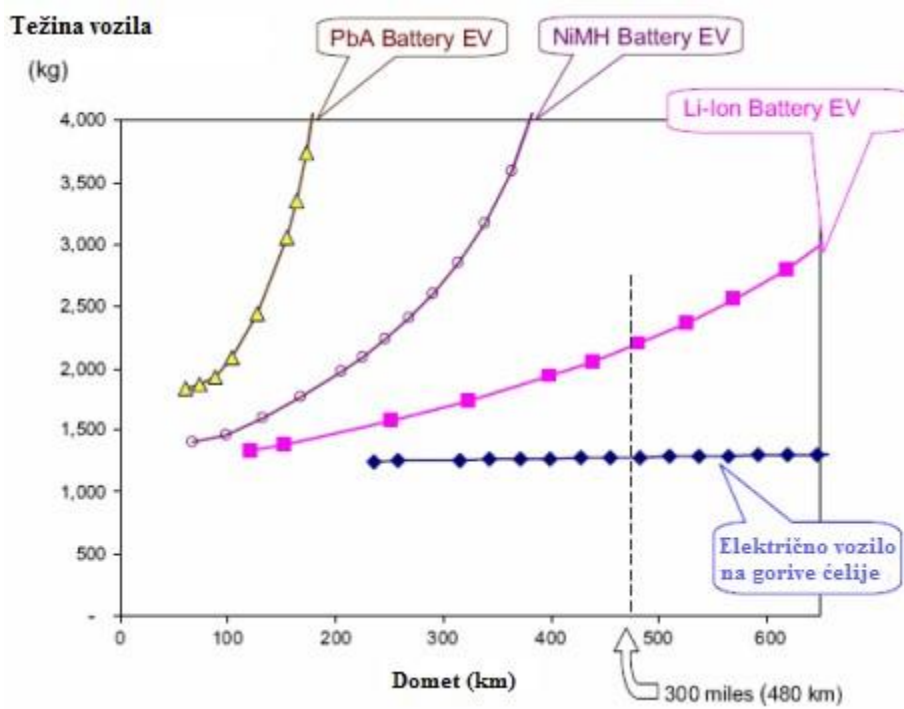
Tablica 11. *Komparacija različitih vrsta vozila – efikasnost motora i transmisije* [6]

	<b>Benzinski SUS</b>	<b>Benzinski Hibrid</b>	<b>H2 SUS</b>	<b>H2 Gorive ćelije</b>
<b>Tip motora</b>	Otto motor	Otto motor i električni motor	Motor SUS (sa električnim motorom)	Gorive ćelije i električni motor
<b>Prosječna efikasnost motora</b>	~30%	~30%	~40%	~55%
<b>Maksimalna efikasnost motora</b>	32,5%	32,5%	~40%	~65%
<b>Tip transmisije</b>	Standardan	CVT/hibrid	CVT/pogodan hibrid	CVT/pogodan hibrid
<b>Efikasnost transmisije</b>	~40%	~60%	~60%	~60%

Tablica 11. nam pokazuje da je prosječna i maksimalna efikasnost motora kao i tip transmisije na strani H<sup>2</sup> SUS i H<sup>2</sup> gorive ćelije motora.

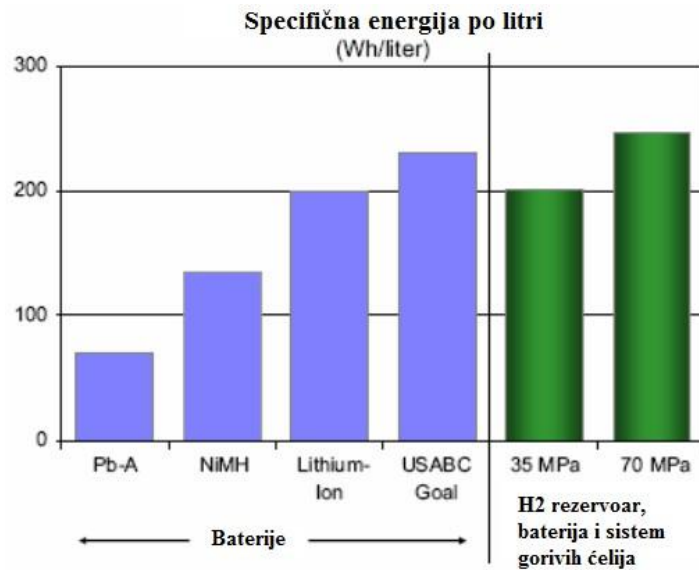


Graf 4.. Usporedba električnih automobila: Baterije vs. Gorive ćelije [10]

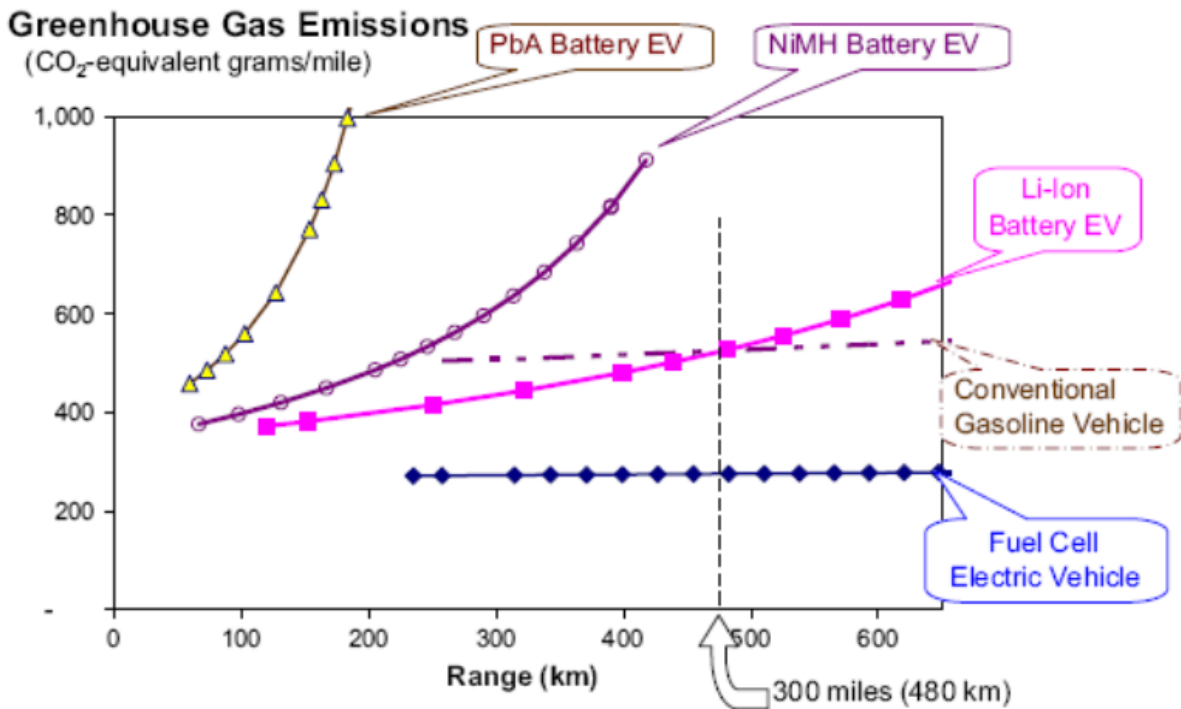


Graf 5. Usporedba električnih automobila: Baterije vs. Gorive ćelije[10]

Graf 5. nam pokazuje odnos težine vozila i njihovog dometa. Vidimo da je kod vozila na PbA baterija najveća težina a najmanji domet vozila. Novim tehnologijama baterija povećava se domet i smanjuje težina samog vozila. Dok je taj odnos kod vozila na gorive ćelije najbolji.



Graf 6.. Usporedba električnih automobila: Baterije vs. Gorive ćelije, Specifična energija po litri[10]



Graf 7. Emisije stakleničkih plinova [10]

Emisija stakleničkih plinova koji otpadaju na pojedine vrsta baterija u usporedbi sa vozilima na ugljikova goriva i sa vozilom na gorive ćelije prikazana je u grafu 7. I u ovoj usporedbi dokazano je da kod vozila na gorive ćelije imamo najmanju emisiju štetnih plinova u odnosu na domet vozila.

Tablica 12. Minimalno trajanje punjenja baterije električnog vozila i gorive ćelije elekt. vozila



Estimated minimum fueling time for battery EVs and fuel cell EVs					
Vehicle Range (km)	Energy required from the grid (kWh)	Battery electric vehicles			Fuel cell EVs
		Charging time (hours)			Hydrogen tank filling time (hours)
		240 V, 40A	480 V, 3Φ		
		7.7 kW	60 kW	150 kW	
241	56	7.30	0.9	0.40	0.08
322	82	10.68	1.4	0.55	0.10
483	149	19.40	2.5	0.99	0.15

Na tablici 12 vidimo minimalno vrijeme koje je potrebno za punjenje vozila u odnosu na domet vozila . Kod električnih vozila da bi smo povećali domet moramo povećati i kapacitet baterije. Povećanjem kapaciteta s druge strane imamo problem dužeg punjenja same baterije. Iako je velika razlika kod brzih punjača i običnih punjača. Zaključak iz ove tablice bi bio da je i samo vrijeme punjenja vozila na strani vozila na gorive ćelije.

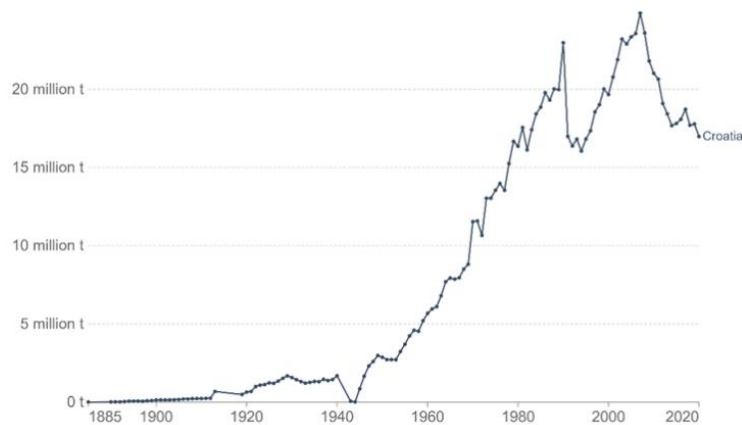
## 6. Sigurnost i ekologija vozila na vodik

Dvije glavne opasnosti od vozila s pogonom na gorive ćelije i vodik su strujni udar i zapaljivost goriva. Neki motori vozila s gorivim ćelijama rade na naponima većim od 350 V. Kod tako velikih struja opasnost od strujnog udara je velika, a 50V je dovoljno visoko da zaustavi ljudsko srce.

Većim ulaganjem u infrastrukturu, vjerojatno će uskoro biti uspostavljena tehnologija za poboljšanje dostupnosti vodika. To će značiti da će se automobili na vodik moći natjecati sa svojom električnim konkurencijom, a mogli bi čak biti i čišća opcija u budućnosti.

### 6.1. Ekološka razmatranja vozila na vodik

Danas se ljudska populacije procjenjuje na oko 8 milijardi. U narednih nekoliko desetljeća predviđa se da će populacija doći 9 ili čak 12 milijardi. Potreba za energijom raste sa porastom broja stanovnika . Količina CO<sub>2</sub> koja se ispušta u atmosferu raste sa potrošnjom nafte, ugljena i plina . CO<sub>2</sub> se smatra odgovornim za promjenu klime. [22]



Graf 8.. Godišnje emisije CO<sub>2</sub> u Hrvatskoj 1885.-2016.[49]



Slika 21. Godišnje emisije CO<sub>2</sub> u Europi po zemljama u 2019. godini [50]

Kod rasta koncentracije ugljen dioksida postoje različiti modeli, ali se svi slažu u jednom: koncentracija će rasti i stabilizacija se, uz najveći optimizam, može očekivati tek za 100 godina. Da bi do stabilizacije nivoa CO<sub>2</sub> došlo moraju se poboljšati tehnologije za

proizvodnju i iskorištenje dostupne energije na način da se učini efikasnijom konverzija kemijske u električnu energiju te da se usavrše i učine jeftinijim komponente za izradu obnovljivih izvora energije kao što su solarni paneli i gorive ćelije. [24]

Kada govorimo o emisiji štetnih plinova nekog vozila, treba se uzeti u obzir i emisija plinova kod same proizvodnje određenog vozila. Prema statistici još ne postoje vozila nulte emisije štetnih plinova. Upravo to nam pokazuje wells-to-wheels kriterij. Wells-to-wheels prevedeno na naš jezik znači „od izvora do kotača“, ovaj kriterij uzima u obzir i emisije štetnih plinova koje se generiraju kroz produkciju i kroz distribuciju goriva. Pomoću ovog kriterija moguće je pratiti emisiju štetnih plinova vozila kroz cjelokupni životni ciklus, od materijala i energije potrebnih za proizvodnju goriva pa sve do direktnih emisija iz samih vozila. Zbog ovog kriterija puno je lakše usporediti električna i vodikova vozila s konvencionalnim vozilima s motorom s unutrašnjim sagorijevanjem. Na primjer, električna vozila sama po sebi ne emitiraju nikakve štetne plinove, ali sama električna energija koja ih pokreće dobivena je uz nusprodukt emisije određene količine štetnih plinova. Kriterij wells-to-wheels prati emisiju štetnih plinova u dvije faze: od izvora do stanice za snabdijevanje i od stanice za snabdijevanje do same emisije vozila. [12]

Prva faza počinje s dobavljanjem sirovina za samo gorivo, preko same produkcije goriva i završava s gorivom dostupnim na samoj stanici za snabdijevanje. U drugoj fazi se razmatra samo korištenje vozila. Well-to-wheel kriterij se može gledati kroz dva pokazatelja, prvi bi bio emisija štetnih plinova emitiranih na određenoj udaljenosti prijednog puta proizvodnog procesa, dok bi drugi bio utrošak energije, to jest naftnih derivata, na istom prijednom putu. Oba kriterija su izrazito korisni pokazatelji učinkovitosti i efikasnosti cijelog sistema proizvodnje i distribucije. [12]

Tablica 13.. „Well-to-wheels“ u ovisnosti od vrste pogonskog agregata [12]

Kriterij	Vozilo SUS	Električni (BEV)	Vozilo na gorive ć.
Vrsta goriva	Benzin/Dizel	Električna vozila	Vodik
„Well-to-wheels“ emisija (g/mi)	355 – 409	214	260 – 364
„Well-to-wheels“ potrošnja goriva (BTU/mi)	3791 – 4359	54	27 – 67

Prvi well-to-wheel kriterij, je emisija štetnih plinova po prijeđenom putu vozila i taj kriterij pokazuje vozila s motorom s unutrašnjim sagorijevanjem kao najgoru opciju jer ona imaju izrazito negativne rezultate usporedivo sa električnim i hibridnim vozilima. Vozila s motorom s unutrašnjim sagorijevanjem u prosjeku emitiraju od 356 do 409 grama ugljičnog dioksida po prijeđenoj udaljenosti, dok je to kod električnih vozila 214 grama, a kod vozila s gorivim ćelijama od 260 do 364 grama. Budući da se većina današnje električne energije većinom dobiva iz fosilnih goriva poput ugljena, očekuje se znatan pad vrijednosti ovog kriterija u bližoj budućnosti jer se i proizvođači električne energije sve više okreću prema obnovljivim izvorima kao što su solarna energija, energija vjetra i hidroenergija. Također fotonaponske ćelije koje se koriste za pretvaranje sunčeve energije u električnu energiju imaju izraziti potencijal za napredak i povećanje korisnosti. [12]

Drugi well-to-wheel kriterij govori o utrošenoj energiji, to jest utrošenoj količini naftnih derivata prema prijeđenoj udaljenosti. Mjerna jedinica koja se ovdje koristi je BTU/mi. BTU je oznaka za British thermal unit, točnije jedinica koja pokazuje količinu rada jednaku 1055 jula. Količina utrošene energije po prijeđenoj udaljenosti za motor s unutrašnjim sagorijevanjem je od 3791 do 4359 jedinica, dok je za električna vozila samo 54. Možda iznenađujući podatak da vozila s gorivim ćelijama imaju još niži utrošak energije od električnih vozila, točnije od 27 do 67 jedinica. To se na prvu čini kao iznenađenje, ali se razmatranjem efikasnosti same gorive ćelije i električnog motora, dobivaju se upravo te brojke. U ovom kriteriju se otkriva razina rastrošnosti tipičnog procesa dobivanja naftnih derivata i neefikasnosti motora s unutrašnjim sagorijevanjem. [12]

Sporazum o ograničavanju emisije ugljen-dioksida, donijet 1997. godine u Kyotu, koji treba da ima globalni značaj, još nije ratificiran od strane SAD-a i još nekih zemalja. Osnovni razlog taktiziranja velikih razvijenih država je što sporazum predstavlja oštar ograničavajući faktor razvoja pošto zahtjeva brz prelazak na čišće izvore energije. Ovakva konotacija sporazuma iz Kyota predstavlja dodatni stimulans za brže prihvaćanje novih izvora energije, pa samim tim i vodikove ekonomije. Najbolja potvrda da su se stekli uvjeti za napredak u oblasti vodikove ekonomije je činjenica da su, prevladavši rivalstvo, sredinom travnja 2003. godine najviši državni zvaničnici Europske Unije i SAD potpisali povijesni dokument o daljem zajedničkom razvoju vodikove ekonomije, što će, kako se očekuje, dramatično ubrzati razvoj ove oblasti. [15]

Prognoze kažu da će čvrsta goriva nestati sa svjetskog tržišta, dok će vodik, do kraja ovog stoljeća postati, praktično, jedini energent u svjetskim razmjerima, što ujedno znači globalno prihvaćanje vodikove ekonomije. S obzirom da transport zasnovan na fosilnim gorivima već danas predstavlja jedan od velikih ekoloških problema dobro je usporediti produkte koji emitiraju vozila, po kilometru prijeđenog puta, a koja za svoje pokretanje koriste benzin u motoru sa unutrašnjim sagorijevanjem, odnosno različita goriva za gorive ćelije. Tako se dobiva još jasnija slika izvanrednih osobina vodika kao goriva. [15]

Tablica 14. *Emisija štetnih plinova koje emitira vozilo u ovisnosti od vrste pogonskog goriva vozila* [24]

Tip vozila i motora	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]
Putničko vozilo sa benzinskim motorom SUS	258,17	12,99	0,86
Manji kamion sa benzinskim motorom SUS	324,13	17,21	1,12
Vozilo sa gorivom ćelijom – gorivo metanol	42,28	0,01	0,002
Vozilo sa gorivom ćelijom – gorivo vodik	0,00	0,00	0,00

Usporedba vrijednosti za emisiju CO, CO<sub>2</sub> te NO<sub>x</sub> iz vozila sa motorom SUS i vozila sa gorivim ćelijama (kalkulacije Desert Research Instituta i prosjek emisija otpadnih plinova iz putničkih automobila i lakih kamiona u SAD za 2000 godinu) u tabeli. jasno pokazuje komparativnu prednost gorivih ćelija gledano po promatranom kriteriju. [22]

## 6.2. Sigurnost vozila na vodik

Kao i svako drugo gorivo ili energija, tako i vodik nosi sa sobom određeni rizik i opasnosti korištenja ukoliko se pravilno ne koristi ili ne kontrolira. Specifične fizičke karakteristike vodika su nešto drugačije od uobičajenih vrsta goriva. Neke od ovih svojstava čine vodik manje opasnim, dok neke druge karakteristike vodika mogu teoretski predstavljati veću opasnost u određenim situacijama. Pošto vodik ima najmanju molekulu, ima i najveću tendenciju da pobjegne kroz male otvore nego što je to slučaj sa drugim vrstama goriva. Na osnovu vodikovih karakteristika kao što su gustoća, viskozitet i koeficijent difuzije u zraku, curenje vodika kroz male otvore i oslabljene spojeve vodova vodika dovodi do mogućnosti da 1,26 do 2,8 puta vodik brže iscure nego prirodni plin. Pošto prirodni plin ima tri puta veću gustoću nego vodik,

to rezultira većem oslobađanju energije nego kod tekućeg vodika. Ukoliko dođe do isticanja vodika iz bilo kojeg razloga, vodik će mnogo brže nestati nego ostala goriva, što smanjuje opasnost. Vodik se brže širi nego drugi plinovi (propan ili prirodni plin). [1]

Tablica 15. *Prikaz nekih osobina vodika* [1]

Molekularna masa		2,016
Gustoća	Kg/m <sup>3</sup>	0,0838
Gornja toplotna moć	MJ/kg MJ/m <sup>3</sup>	141,90 11,89
Donja toplotna moć	MJ/kg MJ/m <sup>3</sup>	119,90 0,05
Temperatura ključanja	°C	-253
Gustoća u tekućem stanju	Kg/m <sup>3</sup>	70,8
Kritična točka		
Temperatura	°C	-240
Tlak	Bar	12,84
Gustoća	Kg/m <sup>3</sup>	31,40
Temperatura samopaljenja	°C	589
Granice zapaljivosti u zraku	(zapremina %)	4-75
Stehiometrijska smjesa u zraku	(zapremina %)	29,53
Temperatura plamena u zraku	°C	2045
Koeficijent difuzije (širenja)	cm <sup>2</sup> /s	0,61
Specifična toplota (cp)	KJ/(KG*K)	14,89

Tablica 16. *Svojstva i omjeri curenja vodika i prirodnog plina* [1]

	Vodik	Prirodni plin
Koeficijent difuzije (cm <sup>2</sup> /s)	0,61	0,16
Viskozitet (μ)	87,5	100
Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	0,0838	0,651
Brzina protjecanja (m/s)	1308	449
<b>Relativna stopa curenja (isticanja)</b>		
Difuzija (rasprostranjenost, širenje)	3,80	1

Laminaran protok	1,23	1
Turbulentni tok	2,83	1
Tok brzine	2,91	1

Mješavina vodik/zrak može sagorjeti u relativno velikom opsegu vodika i zraka (4 – 75%). Ostala goriva imaju manji domet zapaljivosti, prirodni plin (5,3-15%), propan (2,110%), benzin (1-7,8%). Brzina širenja plamena je 7 puta veća pri sagorijevanju vodika nego li je to kod prirodnog plina ili benzina. [1]

Vjerojatnost detonacije zavisi od kompleksnih parametara kao što su omjer gorivo/zrak, temperature i od geometrije zatvorenog prostora. Detonacija vodika na otvorenom prostoru je malo vjerojatna. Donja točka detonacije smjese gorivo/zrak za vodik se kreće 13-18% udjela vodika, što je 2 puta veće od prirodnog plina i 12 puta veće od benzina. Vodik ima najmanju energiju eksplozije po jedinici uskladištenog goriva (energiju koju oslobađa po jedinici goriva). Vodik 22 puta manje oslobađa energije prilikom eksplozije nego pri istoj zapremini nego drugo gorivo. [1]

Plamen sagorijevanja vodika je skoro nevidljiv, pa to može biti opasno zbog toga što ljudi koji se nalaze u blizini plamena vodika mogu uopće ne primijetiti sagorijevanje vodika. To se može otkloniti dodavanjem nekih aditiva koji će pridonijeti vidljivosti plamena vodika prilikom sagorijevanja. Nizak nivo emisije plamena vodika znači i manju vjerojatnost opeklina i širenja toplote plamena na ljudima i na ljude koji su u blizini. Dim i čađ koji nastaju sagorijevanjem benzina predstavlja opasnost od udisanja toga, dok sagorijevanjem vodika nastaje jedino vodena para. [1]

Vodik u vozilu može predstavljati opasnost po vozilo. Opasnosti se trebaju razmatrati u slučajevima kada vozilo nije u upotrebi, kada je vozilo u upotrebi i u sudarima. Vodik kao izvor požara ili eksplozije može doći iz rezervoara u vozilu, vodova vodika u vozilu ili u gorivoj ćeliji. U gorivoj ćeliji je najmanja opasnost, iako su vodik i kisik odvojeni veoma tankom polimernom membranom (20-30  $\mu\text{m}$ ). U slučaju da membrana pukne doći će do miješanja vodika i kisika, ali u tom slučaju goriva ćelija gubi potencijal rada što se automatski detektira putem kontrolnog sistema. U tom slučaju dovod goriva bi trebao biti odmah prekinut. Temperatura na kojoj radi goriva ćelija (60-90 °C) je premala da bi bila termički izvor paljenja, ali spajanjem vodika i kisika na površini katalizatoru može stvoriti uvjete samozapaljenja.

Međutim, potencijalna šteta bi bila mala zbog prisutnosti male količine vodika u gorivoj ćeliji i vodovima. [1]

Najveća količina vodika koje koristi vozilo nalazi se u rezervoaru. Moguća su nekoliko defekata kod rezervoara: puknuće, masovno isticanje tekućine i sporo isticanje tekućine. Razlozi ovih defekata mogu biti različite prirode, a neki od njih su: nepropisnom ugradnjom, nepropisnom proizvodnjom rezervoara, puknućem prouzrokovanim oštrim predmetom, vanjskim izvorom vatre koja dolazi u dodir sa rezervoarom a koja ima neispravan uređaj za kontrolu pritiska, nepropisno spajanje rezervoara sa vodovima vodika itd. Postoji više koraka i načina koje treba primijeniti kako bi se izbjegli problemi primjene vodika u vozilu [1]:

1. Prevencija u sprečavanju isticanja (curenja) tekućine kroz:

- odgovarajući dizajn sistema,
- primjena odgovarajuće opreme koja će biti unaprijed testirana,
- sistem izraditi i dizajnirati tako da ima odgovarajući nivo tolerancije na udare i vibracije,
- ugradnja oduška (ventila) za oslobađanje pritiska,
- zaštita vodova vodika visokog pritiska,
- instaliranje normalnih zatvorenih elektromagnetnih ventila na svakom vodu iz rezervoara,

2. Ugradnja detektora za curenje vodika.

3. Prevencija od zapaljivosti na sljedeće načine:

- automatsko isključenje (odvajanje) baterije iz sistema. Na ovaj način se eliminira mogućnost stvaranja električne iskre koja je uzrok 85% požara u sudarima u kojima su učestvovala vozila na benzin.
- konstrukcijom vodova vodika koja su fizički odvojena od svih električnih uređaja,
- aktivna i pasivna ventilacija koja pomaže da vodik pobjegne (ispari) prema gore.

Prema Directed Technologies Inc. postoje 5 najčešćih nezgoda koja se dešavaju sa vodikovim vozilima [1]:

- požar ili eksplozija rezervoara u zatvorenom prostoru;
- požar ili eksplozija rezervoara u tunelima;
- curenje vodika iz vodova u zatvorenom prostoru;
- curenje vodika u garaži;
- nezgode na stanicama za snabdijevanje vodikom.



## 7. Budućnost vodika kao goriva u javnom prijevozu

Za sada se budućnost vozila na gorive ćelije vidi najbolje kod autobusa u javnom prijevozu putnika, kao čista i održiva alternativa tradicionalnim autobusima na fosilna goriva. Pokretani vodikovim gorivim ćelijama, ovi autobusi ispuštaju samo vodenu paru, što ih čini opcijom s nultom emisijom za javni prijevoz.

Prema istraživanju koje je proveo Future Market Insights, očekuje se da će tržište autobusa na vodik porasti za astronomskih CAGR od 67% tijekom predviđenog razdoblja. Prema tržišnim procjenama, industrija će vjerojatno vrijediti 1.426 milijardi dolara do 2033., u odnosu na 8.45 milijardi dolara 2023. godine.

SWOT analizom utvrđuju se četiri glavne komponente strategijskih mogućnosti vodika kao goriva budućnosti. Cilj je dijagnosticirati jake i slabe strane unutarnjeg okruženja, te opasnosti i prijetnje iz vanjskog okruženja vodika kao goriva

### SWOT analiza vodika kao goriva

<b>Snaga</b> Pogodan za sve vrste vozila Nulta emisija Ne mijenja se proces punjenje rezervoara Veća učinkovitost pretvorbe energije od ugljikovodičnih goriva Čisti izvor energije Poticaji	<b>Slabost</b> Izazovi s konstrukcijom i izdržljivošću Veći početni troškovi Kraći vijek trajanja Potreba stimuliranja u izradi infrastrukture Nedovoljni lokalni potencijali obnovljivih izvora energije za proizvodnju vodika Ograničena infrastruktura
<b>Prilike</b> Čišći okoliš Potpuno nova poduzeća i područja zapošljavanja Mogućnosti rasta i razvoja za gospodarstva Smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima Smanjenje emisija štetnih plinova i utjecaja na okoliš Poticaji Povećana potražnja za čistom energijom Ekonomija vodika	<b>Prijetnje</b> Visoka cijena ćelija Rizik kod korištenja Nedostatak ključnih tehnologija Nedostatak infrastrukture Visoka cijena proizvodnje vodika Visoka cijena investicija Konkurencija

Prednosti vodika su njegova pogodnost za sve vrste vozila, ovisno o vrsti gorivih ćelija nulta ili neznatna emisija štetnih plinova, proces punjenja rezervoara je isti kao kod vozila na fosilna goriva, te niska osjetljivost na nečistoće u gorivu. Vodik se nameće kao važan element ka smanjenju emisije štetnih plinova, nastojanjima ka održivoj mobilnosti i upotrebi u industriji i prometu. Međutim slabosti kod vodika kao goriva u široj upotrebi su ograničena infrastruktura, potreba za stimulacijama te nedovoljan potencijal obnovljivih izvora energije. Unatoč izazovima koji postoje vodik ima značajan potencijal u dekarbonizaciji. Njegova primjena u području transporta postavlja ga kao ključnog za ostvarivanje nulte emisije štetnih plinova. Prijetnje su mu nedostatak infrastrukture visoka cijena izrade i cijena gorivih ćelija ali i početnih investicija.

Njegova sadašnja i buduća primjena u vozilima i autobusima na vodik nudi čistu i održivu alternativu tradicionalnim vozilima na fosilna goriva, s mnogim prednostima poput nulte emisije, visoke učinkovitosti i tihog rada. Iako još uvijek postoje izazovi povezani s njihovim usvajanjem, postoji značajan potencijal za njihovu širu upotrebu u transportnoj industriji kako tehnologija napreduje i infrastruktura se poboljšava. Kako društvo i dalje daje prioritet održivom prijevozu, autobusi na vodik će vjerojatno igrati sve važniju ulogu u zadovoljavanju naših potreba za prijevozom, a istovremeno će smanjiti naš utjecaj na okoliš.

Jedna od primarnih prednosti autobusa na vodik je njihov status nulte emisije. Za razliku od tradicionalnih autobusa na fosilna goriva, koji ispuštaju štetne zagađivače i stakleničke plinove, autobusi na vodik ispuštaju samo vodenu paru. To čini autobuse na vodik izvrsnim rješenjem za smanjenje onečišćenja zraka i poboljšanje javnog zdravlja.

Autobusi na vodik također su učinkovitiji od tradicionalnih autobusa. Gorive ćelije koje se koriste u autobusima na vodik imaju visoku učinkovitost, što znači da mogu pretvoriti visok postotak vodikovog goriva u električnu energiju. To znači učinkovitiju upotrebu energije i veći domet za autobus.

Štoviše, autobusi na vodik imaju veliki domet. Ovi autobusi na gorive ćelije mogu prijeći do 400 km s jednim spremnikom vodika, što je znatno više od električnih autobusa na baterije. To znači da se autobusi na vodik mogu koristiti za duže rute bez potrebe za čestim punjenjem.

Autobusi s pogonom na vodik obećavajuća su tehnologija koja privlači pažnju kao potencijalno rješenje za probleme onečišćenja zraka i klimatskih promjena.

Unatoč izazovima s kojima se suočavaju autobusi na vodik, postoji značajan potencijal za njihovu širu primjenu u prometnoj industriji. Mnoge zemlje i gradovi ulažu u razvoj

infrastrukture za punjenje vodikovim gorivom, što će olakšati upravljanje autobusima na vodik u većem opsegu.

Osим toga, napredak u tehnologiji i proizvodnji smanjuje troškove gorivih ćelija i drugih komponenti koje se koriste u autobusima na vodik, čineći ih troškovno konkurentnijima tradicionalnim autobusima na fosilna goriva.

Nadalje, raste javna svijest i zabrinutost oko utjecaja tradicionalnih fosilnih goriva na okoliš, što potiče potražnju za čistim i održivim prijevoznim rješenjima. Kao rezultat toga, očekuje se da će tržište autobusa na vodik i drugih vozila na alternativna goriva značajno rasti u nadolazećim godinama.

Unatoč izazovima s kojima se suočavaju autobusi na vodik, došlo je do značajnog napretka u njihovom prihvaćanju diljem svijeta. Od 2021. bilo je oko 3000 vodikovih autobusa u pogonu diljem svijeta, a većina se nalazila u Europi i Aziji. U Aziji, Japan je bio pionir u usvajanju autobusa na vodik, a grad Tokio upravlja flotom autobusa na vodik od 2003. Kina također ulaže u tehnologiju autobusa na vodik, s nekoliko gradova, uključujući Peking i Foshan, koji koriste flote vodikovih autobusa.

Održivost vodika uvelike ovisi o tome kako se proizvodi, tj. koja se vrsta energije koristi za njegovu proizvodnju. Osnovna razlika je između sivog i zelenog vodika. Sivi vodik se proizvodi korištenjem energije iz fosilnih goriva, što znači da nije ugljično neutralan. Nasuprot tome, zeleni vodik se proizvodi elektrolizom, odnosno cijepanjem vode na vodik i kisik, korištenjem električne energije iz obnovljivih izvora. Zeleni vodik će igrati sve značajniju ulogu u nadolazećim fazama energetske tranzicije. Trenutno je, međutim, proizvodnja zelenog vodika vrlo skupa i još se ne može proizvesti u velikim količinama. Ova vrsta vodika stoga će se najvjerojatnije uvoziti iz zemalja s potencijalom za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora kao što su solarna energija ili energija vjetra. Očekuje se da će se zeleni vodik koristiti za pokrivanje energetske potrebe tijekom razdoblja najveće potražnje u električnoj mreži. Stručnjaci vjeruju da će tehnologija igrati ključnu ulogu u borbi protiv klimatskih promjena.

Skeptici prema vodiku kao izvoru energije ističu izazove tehnologije i cijene koji su ga opterećivali u prošlosti. Ovi izazovi su stvarni. Zeleni vodik je skup za proizvodnju. U svijetu još nema dovoljno kapaciteta za obnovljivu energiju da bi se ona proizvela u velikim razmjerima. A veliki elektrolizeri relativno su neispitani.

Ali skeptici propuštaju poantu iz tri razloga. Prvo, ako želimo preživjeti, čovječanstvo treba ne samo smanjiti emisije ugljika, već i krenuti prema svijetu neto nultih emisija. Drugo, to znači potpuni prijelaz na obnovljivu energiju. Konačno, vodik je očigledan način za širenje obnovljive energije diljem svijeta.

Budućnost će morati izgledati sasvim drugačije s obzirom na to da će sva energija u konačnici dolaziti iz obnovljivih izvora energije — sunca, vjetra, moguće nuklearne energije, te s vodikom kao komplementarnim sredstvom za skladištenje i distribuciju energije.



Slika 22. Vodik iz obnovljivih izvora energije[51]

Prvo, električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora zamijenit će električnu energiju proizvedenu fosilnim gorivima. Tada će električna energija postupno zamijeniti druge izvore energije u sve više i više primjena, kao što već vidimo s porastom električnih automobila.

Premještanje te električne energije po cijelom svijetu mjesto je gdje će vodik ući. On će se generirati iz solarne energije u Sahari, na primjer, zatim će se premjestiti cjevovodom iz Sjeverne Afrike u Europu ili u Australiju prije nego što se otpremi u Japan. Jednom u tim zemljama može se koristiti za proizvodnju električne energije u elektranama, kao i za druge krajnje namjene kao gorivo za prijevoz ili industrijska sirovina.

Upravo ova sustavna uloga vodika, jer je u biti vozilo kroz koje se može kretati obnovljiva energija, znači da je ovo vrijeme bitno drugačije za vodik. Prije trideset, 40 ili čak 70 godina, zamišljalo se da bi se gorivo moglo koristiti za specifične krajnje svrhe - za pogon zrakoplova, na primjer. To je značilo da se vodik mora natjecati s brojnim alternativama, često etabliranijim i jeftinijim.

Ovo nije samo pusta želja. Više od 30 vlada diljem svijeta razmatra preuzimanje obveza ne samo za smanjenje emisija, već i za njihovo svođenje na neto nulu. Ujedinjeno Kraljevstvo i Francuska su se zakonski obvezale da će to učiniti do 2050., sa Švedskom do 2045., dok su Australija i Kina razvile političke dokumente za postizanje cilja.

A vlade su priznale da će vodik imati ključnu ulogu, ne samo kao gorivo sa specifičnom krajnjom upotrebom, već i kao sredstvo za prijenos energije.

Na globalnoj razini, države su izdvojile 76 milijardi dolara za financiranje vodikovih projekata. Najveća pojedinačna obveza, od 19,45 milijardi američkih dolara, potječe iz Japana, koji ima ograničenu sposobnost domaće proizvodnje obnovljive energije. Zemlja je umjesto toga potpisala sporazum o uvozu vodika u velikim količinama iz Australije. Drugim riječima, jedan od najvećih svjetskih potrošača energije u potpunosti je predan prelasku na vodik kao sredstvo za korištenje obnovljive energije.

Državna ulaganja sigurno neće biti dovoljna sama po sebi, ali to potiče privatna ulaganja, koja će zauzvrat potaknuti tehnološke pomake. Podrška vlade također će značiti da se projekti zelenog vodika grade u dosad neviđenim veličinama, stvarajući ekonomiju razmjera i pomažući da se smanji cijena čistog goriva.

To je upravo ono čemu smo svjedočili u sektoru obnovljive energije posljednjih desetljeća, kako su ulaganja u tehnologiju i rad u velikim razmjerima postupno smanjivali troškove proizvodnje električne energije iz sunca i vjetra do točke u kojoj su oboje konkurentni fosilnim gorivima i često, u područjima obilnog sunca ili vjetra, daleko jeftinije.[51]

**Trošak proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora energije mogao bi pasti na između 2,29 i 2,81 dolara 2030. [51]**

Za istinski održivu mobilnost, vodik je gorivo koje se ne može zanemariti. Također se smatra potencijalnom alternativom za gorivo za teška teretna vozila, gdje su električni kamioni sputani kapacitetom baterije i moraju se puniti putem električne mreže. Najveća mana je,

međutim, to što će za razvoj infrastrukture za potpuno punjenje vodikom, gdje se plin proizvodi i potom transportira do postaja, trebati milijarde eura i nekoliko godina.

Ključ za poticanje vozila na vodik je njihovo uključivanje u šire 'vodikovo gospodarstvo' – izgradnja stanica za punjenje goriva samo za automobile na vodik bila bi neučinkovita. Umjesto toga, idealno bi bilo da cijeli energetska sektor uključi vodik u mješavinu, od punjenja goriva u automobile do skladištenja energije za domove. Još jedna prednost vodika je ta da se potencijalno može proizvesti na licu mjesta umjesto da se transportira kao gorivo ili isporučuje kroz mrežu kao električna energija.

No čak i uz uspostavljenu vodikovu infrastrukturu, bila ona lokalna ili nacionalna, vozila na vodik i dalje se suočavaju s problemom troškova. Kako se tehnologija poboljšava i postaje sve popularnija, cijene bi trebale početi padati. Još uvijek postoji mnogo 'ako' u vezi s vodikom, ali danas ih je puno manje nego prije deset godina.

Nema sumnje da proizvođači automobila odustaju od motora s unutarnjim izgaranjem u potrazi za održivijom alternativom za budućnost. U proteklom desetljeću industrija je doživjela ogroman porast baterijskih električnih vozila na cestama. Kao alternativna održiva metoda automobilima na baterije, vozila na vodik pokazala su da imaju čak i više prednosti od električnih vozila na baterije. Korporacije su napravile veliki napredak u tehnologiji gorivih ćelija dok vlade nastavljaju forsirati i poticati vozila s nultom emisijom. Dok su BEV-i obećavali smanjenje emisija ugljika, nekoliko pitanja još uvijek izazivaju ozbiljne sumnje o tome mogu li oni zapravo biti trajno rješenje. Vodikove električne gorive ćelije imaju potencijal potpuno promijeniti budućnost za sve načine prijevoza, ne samo za automobile.

Znanstvenici s Nacionalnog instituta za znanost i tehnologiju Ulsan (UNIST) u Južnoj Koreji nedavno su napravili napredak u proizvodnji zelenog vodika. Tim je uobičajene skupe metale zamijenio vrlo pristupačnim niklom. Prema studiji, novi katalizator pokazao je oko 200 posto bolje performanse elektrolize u usporedbi s konvencionalnom metodom i radio je 1000 sati bez ikakvih oštećenja. Još uvijek ima prostora za razvoj, ali ova revolucionarna tehnologija u proizvodnji zelenog vodika ima potencijal značajno smanjiti troškove i učiniti je primjenjivijom u velikim razmjerima. Nadalje, ovo bi otkriće moglo potpuno zanemariti potrebu za transportom vodika. Stvaranje vodika jedna je od prepreka s kojom se proizvođači automobila neprestano suočavaju, ali transport ovog reaktivnog plina još je složeniji i skuplji. Uz ovu novu tehnologiju, crpke za točenje goriva imale bi mogućnost stvaranja vlastitog

zelenog vodika na licu mjesta. Pokretane solarnom energijom, stanice bi trebale samo vodu i jeftini nikal-željezni katalizator za proizvodnju goriva potrebnog za ova vozila na vodikove gorive ćelije. [53]

U veljači 2020. donesena je Strategija energetskega razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu.

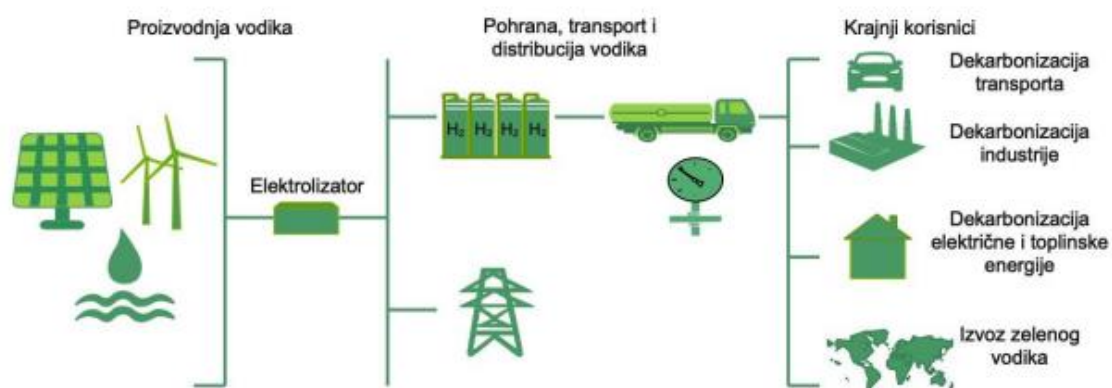
Energetska strategija RH, kao i Niskougljična strategija RH, predviđa smanjenje emisija stakleničkih plinova u iznosu od oko 74 % u 2050. godini u odnosu na emisije iz 1990. godine.

Energetska strategija RH prepoznaje vodik kao alternativno gorivo te predviđa njegovu uporabu u prometu s ciljem ostvarenja gore navedenih ciljeva. Vodik kao alternativno gorivo te mogućnosti njegove uporabe u prometu s ciljem smanjenja CO<sub>2</sub> emisija predviđen je također Strategijom prometnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje od 2017. do 2030. godine („Narodne novine“, broj 84/17.) i Nacionalnim okvirom politike za uspostavu infrastrukture i razvoj tržišta alternativnih goriva u prometu („Narodne novine“, broj 34/17.), (u daljnjem tekstu: NOP).

U slučaju električne energije, vodik će igrati važnu ulogu kao rješenje za pohranu (skladištenje) što će rezultirati većom proizvodnjom električne energije iz OIE. No, obnovljivi vodik će se moći koristiti i za proizvodnju električne energije u postrojenjima na osnovi visoko temperaturnih keramičkih gorivih članaka (SOFC – Solid Oxide Fuel Cells) i plinskih turbina zbog daleko veće učinkovitosti takvih sustava. Također, u podsektoru grijanja i hlađenja vodik će biti održiva alternativa za zamjenu fosilnih goriva, čemu će uvelike pridonijeti regulacija obnovljivih plinova i njihovo ubacivanje u transportni i distribucijski sustav prirodnog plina. U sektoru prometa, vodik je jedno od alternativnih i komplementarnih rješenja za električnu mobilnost, posebno za cestovni teretni promet, uključujući gradsku logistiku, cestovni i željeznički prijevoz putnika i robe te pomorski, riječni i zračni promet. Vodik će također uz sektore električne energije, grijanja, hlađenja i prometa, potaknuti razvoj i primjenu tehnologija u drugim sektorima, posebice energetskega intenzivnim, kao i onima koje nije jednostavno dekarbonizirati. Svi oni će pridonijeti dekarbonizaciji društva i zaštiti okoliša kroz inovativne procese proizvodnje i/ili upotrebe vodika.

S ciljem uspostavljanja gospodarstva zasnovanog na vodik u RH, potrebno je osigurati usklađeni rast tri ključna elementa proizvodnje, distribucije i potrošnje, sa svrhom

omogućavanja sustavnog i stabilnog korištenja vodika. Na slici 22. prikazana je opća shema vodikovog lanca vrijednosti (koja ne isključuje ostale načine proizvodnje vodika).



Slika 23. Opća shema vodikovog lanca vrijednosti, od proizvodnje do krajnjeg korištenja

Strategijom su postavljeni strateški ciljevi, koji direktno pridonose dekarbonizaciji gospodarstva i pridonose dekarbonizaciji Europe sukladno europskom zelenom planu i nacionalni ciljevi koji pokazuju potencijal i smjer kojim će se razvijati uspostava i funkcioniranje gospodarstva zasnovanog na vodik u RH. Strateški ciljevi vezani su uz zajedničku EU politiku kojoj direktno pridonosi i RH, a kojima će se osigurati postizanje glavnog cilja klimatske neutralnosti EU-a do 2050. godine. Strategijom su identificirani sljedeći strateški ciljevi RH:

1. Povećanje proizvodnje obnovljivog vodika;
2. Povećanje iskorištavanja potencijala OIE za proizvodnju obnovljivog vodika;
3. Povećanje korištenja vodika;
4. Poticanje razvoja znanosti, istraživanja i razvoja vodikovih tehnologija.

Za potrebe uspješnosti provedbe strateških ciljeva odabrani su pokazatelji učinka prikazani u tablici 17. [54]

Tablica 17. Pokazatelji učinka strateških ciljeva F54G

STRATEŠKI CILJ	POKAZATELJ UČINKA	POČETNA VRIJEDNOST	CILJNA VRIJEDNOST	
		2021/2022	2030	2050



Povećanje proizvodnje obnovljivog vodika	Kapacitet elektrolizatora Jedinica mjere: MW Kod: II.02.6.48	0	70	2750
Povećanje iskorištavanja potencijala OIE za proizvodnju obnovljivog vodika	Udio vodika u ukupnoj potrošnji energije, Jedinica mjere: % Kod: II.02.6.49	0	0,2	11
Povećanje korištenja vodika	Broj punionica vodika Jedinica mjere: broj Kod: II.02.6.50	0	15	100
Poticanje razvoja znanosti, istraživanja i razvoja vodikovih tehnologija	Broj патената vezanih za gospodarstvo temeljeno na vodik Jedinica mjere: broj Kod: II.02.6.51	0	5	50

Nedavno doneseni REPowerEU EU zahtjeva od država članica da se prilagode trenutnoj situaciji i da ubrzaju prelazak na čistu energiju, što se naravno odnosi i na Hrvatsku, a jedan važan dio prelaska leži i na ubrzavanju ekonomije vodika. Upravo zbog toga je Clean hydrogen Europe važan dio pokreta koji je već počeo.

Budžet Clean hydrogen Europe saveza je jedna milijarda eura, a taj će se budžet povećati za još 200 milijuna eura upravo zbog REPowerEU sporazuma. Cilja se da se ti novci potroše na 'doline vodika', i cilj je da svaka država do 2030. ima jednu takvu dolinu vodika. U Hrvatskoj se trenutno radi na projektu zajedno sa Slovenijom i tri sjeverne talijanske regije na zajedničkoj dolini.

Doline vodika zamišljene su na način kao regije gdje će se vodik proizvoditi, skladištiti, transportirati i koristiti u razne svrhe. [55]

Dakle put prema dekarbonizaciji bi bio prvo izgradnja dolina vodika pa izrada infrastrukture za opskrbu vodikom kao gorivom koji bi polako ali sigurno vodio prema smanjenju emisija štetnih plinova u zraku.

## 8. Zaključak

Vodik je čist i učinkovit način proizvodnje električne energije koji nije podložan promjenama dostupnosti zaliha. Osim što ne stvara emisiju CO<sub>2</sub> u korištenju, vodikovo gorivo ima i veću gustoću energije nego električne baterije, a lako ga se prevozi i skladišti. Moguće ga je koristiti ne samo za pogon vozila – ne samo putničkih automobila, nego i autobusa, taksija, viličara i drugoga – nego i za napajanje domova energijom.

Vozila s gorivim ćelijama pogonjena su vodikom i učinkovitija su od konvencionalnih vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem. Ne proizvode emisiju stakleničkih plinova iz ispušne cijevi već samo ispuštaju vodenu paru i topli zrak.

Tehnologija gorivih ćelija koja se primjenjuje u vozilima s vodikovim pogonom slična je bateriji po tome što stvara električnu energiju iz elektrokemijske reakcije.

Gorive ćelije daju čistu, učinkovitu i pouzdanu energiju za gotovo sve uređaje koji zahtijevaju električnu energiju. Stoga imaju široku primjenu u transportu, od vozila na vodik do zrakoplova.

Zahvaljujući inicijativama vlada koje promiču razvoj industrije gorivih ćelija kroz velika ulaganja u temeljnu tehnologiju, vozila na vodik od ranih godina ovog stoljeća prošla su kroz nekoliko faza izrade prototipova i proizvodnje.

Tržište komercijalnih vozila na vodik segmentirano je na autobuse i kamione. Kamioni su još u fazi razvoja, ali autobusi su već u funkciji. Viljuškari, autobusi te laki i srednji kamioni prednjače u primjeni među vozilima s gorivim ćelijama. Tradicionalna goriva imaju loš učinak na okoliš, od onečišćenja zraka i vode do izlivanja nafte. Izgaranje fosilnih goriva, posebice ugljičnog dioksida, prilikom proizvodnje i prijenosa električne energije ima dalekosežne učinke na klimu i ekosustave. Alternativna goriva, poput vodika, smanjuju emisije ugljičnog, sumporova i dušikova dioksida, ugljičnog monoksida i drugih čestica i stoga su sve popularnija i prihvaćenija.

Vozila na vodik sve su održivija alternativa električnim vozilima na baterije. U prednosti su zbog većeg dosega i bržeg punjenja, a upravo su to dva najveća razloga za zabrinutost korisnika vozila s baterijskim pogonom.

Budućnost vozila na vodik je obećavajuća, s mnogo novih razvoja i inicijativa u tijeku. Na primjer, nekoliko zemalja i gradova ulaže u razvoj infrastrukture za punjenje vodikovim gorivom, što je ključno za široku primjenu vozila na vodik.

Drugi razvoj je korištenje zelenog vodika, koji se proizvodi korištenjem obnovljivih izvora energije kao što su vjetar i solarna energija. To bi moglo pomoći u daljnjem smanjenju ugljičnog otiska i učiniti ih još održivijim rješenjem za javni i teretni prijevoz.

Štoviše, vozila na vodik kao i za početak autobusi na vodik nude čistu i učinkovitu alternativu tradicionalnim vozilima na fosilna goriva, s nultom emisijom, visokom učinkovitošću i velikim dometom. Iako još uvijek postoje izazovi s kojima se njihovo usvajanje suočava, došlo je do značajnog napretka u njihovoj uporabi diljem svijeta, a budućnost vozila na vodik izgleda obećavajuće. Kako društvo i dalje daje prioritet održivom prijevozu, autobusi na vodik u urbanom javnom prijevozu će vjerojatno igrati sve važniju ulogu u zadovoljavanju naših potreba za javnim prijevozom putnika.

Vodik ima potencijal značajno utjecati na poboljšanje kvalitete zraka u našim lokalnim zajednicama i spreman je izvršiti neposredan utjecaj na transportnu industriju omogućujući prijevozničkim agencijama da ispune svoje ciljeve nulte emisije i operativne izvedbe te doprinose nacionalnoj strategiji dekarbonizacije.

Europska unija politikom "Fit for 55", nastoji smanjiti emisiju štetnih ispušnih plinova za najmanje 55 posto do 2030. godine. Zemlje EU rade na Europskom zakonu o klimi da bi ta politika postala obaveza, a EU klimatski neutralna do 2050. godine. Jedan od najvećih zagađivača je transportni sektor, a promjene u ovom sektoru kao što je uvođenje vodikovih tehnologija mogle bi predstavljati prekretnicu u smanjenju ispušnih plinova. Prva osjetna smanjenja emisija štetnih plinova će se dogoditi u sektoru transporta.

Veliki postotak javnosti nije dovoljno upoznat s prednostima vodikovih tehnologija ili općenito tehnologija obnovljivih izvora. Ljudi su otvoreni za prihvaćanje tehnologija koje doživljavaju kao nove i pozitivne, ali drže ih kao skupe i primjenjive u dalekoj budućnosti. A cijena tih tehnologija ubrzano pada ako se njihova primjena brže razvija, ali svako alternativno rješenje je skuplje od onoga što je prisutno danas.



### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Danijel Rajić (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Primjena i razvoj vozila na vodik (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

Danić Danijel  
(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem stadiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

## 9. Literatura

- [1] vodik. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 5.9.2023. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=65137>>
- [2] Franković, B.; Jedriško, C.; Lenić, K.; Trp, A.: „Istraživanja i razvoj tehnologije vodika“, Tehnički fakultet, Rijeka. Dostupno na:  
[http://bib.irb.hr/datoteka/53519.EE2000frankovic\\_et\\_al.pdf](http://bib.irb.hr/datoteka/53519.EE2000frankovic_et_al.pdf) Pristupljeno 5.9.2023.
- [3] <https://www.scribd.com/doc/93528586/Kalori%C4%8Dna-vrijednost-teku%C4%87ih-goriva> Pristupljeno 5.9.2023.
- [4] <https://www.scribd.com/document/280802923/h2fuell-Cell-En> Pristupljeno 5.9.2023.
- [5] <https://hrcak.srce.hr/file/10215> Pristupljeno 5.9.2023.
- [6] [https://www.vanis.hr/hr/vodik/vodikova\\_energija.htm](https://www.vanis.hr/hr/vodik/vodikova_energija.htm) Pristupljeno 5.9.2023.
- [7] [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/hr/qanda\\_20\\_1257](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/hr/qanda_20_1257) Pristupljeno 5.9.2023.
- [8] <https://www.scribd.com/document/80926570/Gorivne-Celije-Izvori-Elektricne-Energije> Pristupljeno 5.9.2023.
- [9] <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20210512STO04004/vodikova-energija-koje-su-koristi-za-eu> Pristupljeno 16.9.2023.
- [10] [http://www.obnovljivi.com/pdf/PDF\\_OBNOVLJIVI\\_COM/URH\\_T5\\_4.FB\\_Usporedba\\_FC\\_vs\\_baterije-Vodice.pdf](http://www.obnovljivi.com/pdf/PDF_OBNOVLJIVI_COM/URH_T5_4.FB_Usporedba_FC_vs_baterije-Vodice.pdf) Pristupljeno 16.09.2023.
- [11] College of the Desert: „Hydrogen Use In Internal Combustion Engine“, 2001. Dostupno na: [http://www.hho4free.com/documents/hydrogen\\_fuel.pdf](http://www.hho4free.com/documents/hydrogen_fuel.pdf) Pristupljeno 16.09.2023.
- [12] Međurečan, L.: Analiza tehničko eksploatacijskih značajki vozila na alternativni pogon, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [13] <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/34-hrastovic/savjeti/465-tehnologija-hho-generatora.html> Pristupljeno 16.09.2023.
- [14] <https://mirkodamnjanovic.wordpress.com/2014/01/31/komponente-sistema-za-proizvodnju-vodonika/> Pristupljeno 16.09.2023.
- [15] Komunjer, B.: „Gorive ćelije“, Kolegij: Izvori napajanja elektroničkih uređaja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2014. Pristupljeno 16.09.2023.
- [16] <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A2013/datastream/PDF/view> Pristupljeno 16.09.2023.

- [17] <https://www.scribd.com/document/237286718/Fuel-cell> Pristupljeno 16.09.2023.
- [18] <https://voilokmaikop.ru/hr/istochnik-pitaniya-na-vodorode-toplivnye-elementy-princip-raboty.html> Pristupljeno 27.09.2023.
- [19] <https://www.wired.com/sponsored/story/the-wired-brand-lab-guide-to-hydrogen-fuel-cell-electric-vehicles/> Pristupljeno 27.09.2023.
- [20] <https://hydrogen-central.com/another-record-addition-european-hydrogen-refuelling-stations-2022-tuv-sud/> Pristupljeno 27.09.2023.
- [21] <https://www.ukh2mobility.co.uk/stations/> Pristupljeno 27.09.2023.
- [22] Gillingham, K.: „Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles“, Standford University, 2007. Dostupno: <http://environment.yale.edu/gillingham/hydrogenICE.pdf> Pristupljeno 27.09.2023.
- [23] <https://www.worldometers.info/hr/> Pristupljeno 27.09.2023.
- [24] [https://enerpedia.net/index.php/ENERGETSKE\\_TRANSFORMACIJE](https://enerpedia.net/index.php/ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE) Pristupljeno 27.09.2023.
- [25] <https://www.ieafuelcell.com/index.php?id=33> Pristupljeno 27.09.2023.
- [26] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/h/index.html> Pristupljeno 18.10.2023
- [27] <http://scateo.eu/pages/o-kompaniji/energetski-sustavi- napajanja/alternativni-sustavi-napajanja/vodikovi-energetski-blokovi/nacini-dobivanja-vodika.php> (10.08.2023)
- [28] <https://masterwarm.techinfus.com/hr/kotly/vodorodnaya-gorelka-svoimi-rukami.html> Pristupljeno 27.09.2023.
- [29] [https://unionkaric.rs/ugradnja\\_i\\_odrzavanje\\_hho\\_sistema](https://unionkaric.rs/ugradnja_i_odrzavanje_hho_sistema) Pristupljeno 27.09.2023.
- [30] <https://www.cnx-software.com/2017/03/10/macchina-m2-is-an-open-source-hardware-obd-ii-development-platform-for-your-car-crowdfunding/> Pristupljeno 27.09.2023.
- [31] [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/DR09MSinko.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/DR09MSinko.pdf) Pristupljeno 03.11.2023.
- [32] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks?page=2> Pristupljeno 03.11.2023.
- [33] [https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-a-fuel-cell-stack-operation-and-components\\_fig2\\_309898224](https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-a-fuel-cell-stack-operation-and-components_fig2_309898224) Pristupljeno 03.11.2023.
- [34] <https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/fuel-cell-stacks> Pristupljeno 09.11.2023.
- [35] [https://www.researchgate.net/figure/Parts-of-a-6-V-fuel-cell-stack-3\\_fig1\\_317160609](https://www.researchgate.net/figure/Parts-of-a-6-V-fuel-cell-stack-3_fig1_317160609) Pristupljeno 09.11.2023.
- [36] [https://www.researchgate.net/figure/The-multi-stack-concept-for-fuel-cell\\_fig2\\_258642740](https://www.researchgate.net/figure/The-multi-stack-concept-for-fuel-cell_fig2_258642740) Pristupljeno 09.11.2023.

- [37] <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/types.php> Pristupljeno 10.11.2023.
- [38] <https://www.caranddriver.com/features/a41103863/hydrogen-cars-fcev/> Pristupljeno 10.11.2023.
- [39] <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/fuel-cell-buses-utility-vehicles-scooters> Pristupljeno 10.11.2023.
- [40] <https://www.wired.com/sponsored/story/the-wired-brand-lab-guide-to-hydrogen-fuel-cell-electric-vehicles/> Pristupljeno 11.11.2023.
- [41] <https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A6221/datastream/PDF/view> Pristupljeno 11.11.2023.
- [42] <https://mag.toyota.co.uk/toyota-sora-bus-concept-explores-future-fuel-cell-technology/> Pristupljeno 11.11.2023.
- [43] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128114599000013> Pristupljeno 14.11.2023.
- [44] <https://www.ukh2mobility.co.uk/stations/> Pristupljeno 14.11.2023.
- [45] <https://www.iberdrola.com/sustainability/hydrogen-stations> Pristupljeno 14.11.2023.
- [46] <https://www.energetika-net.com/odrzivi-promet/hrvatska-ce-imati-10-punionica-vodika-do-2025-34484> Pristupljeno 14.11.2023.
- [47] <https://www.wardsauto.com/technology/costs-check-growth-fuel-cell-infrastructure> (pristup 16. rujna 2020.) Pristupljeno 14.11.2023.
- [48] [https://www.waterstofnet.eu/\\_asset/\\_public/H2Benelux/Press-release\\_Launch-of-H2Benelux-project\\_ENG\\_28-09-2018.pdf](https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/H2Benelux/Press-release_Launch-of-H2Benelux-project_ENG_28-09-2018.pdf) Pristupljeno 03.11.2023.
- [49] <https://www.znanost-klima.org/wp-content/uploads/2021/12/Klimatske-promjene-u-Hrvatskoj.pdf> Pristupljeno 03.11.2023.
- [50] <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20180301STO98928/infografika-emisije-staklenickih-plinova-po-zemlji-i-sektoru> Pristupljeno 03.11.2023.
- [51] <https://impact.economist.com/sustainability/projects/the-future-of-hydrogen/hydrogen-why-this-time-is-different.html> Pristupljeno 03.12.2023.
- [52] <https://www.wardsauto.com/technology/costs-check-growth-fuel-cell-infrastructure> Pristupljeno 03.12.2023.
- [53] <https://www.ajudaily.com/view/20230221143056937> Pristupljeno 03.12.2023.
- [54] <https://www.zakon.hr/cms.htm?id=52084> Pristupljeno 03.12.2023.
- [55] <https://lidermedia.hr/konferencije-i-edukacije/svaka-drzava-eu-do-2030-treba-imati-dolinu-vodika-143340> Pristupljeno 03.12.2023.

## 10. Popis slika

Slika 1. Načini proizvodnje vodika [27]

Slika 2. Rezervoar za skladištenje vodika u vozilu [25]

Slika 3. Suha ćelija [28]

Slika 4. Prikaz spajanja HHO generatora [14]

Slika 5. Pulsni modulator [29]

Slika 6. OBD mikrokontroler [30]

Slika 7. Princip rada PEM gorive ćelije [31]

Slika 8. Goriva ćelija [32]

Slika 9. Shematski prikaz gorivih ćelija [33]

Slika 10. Blok PEM gorivih ćelija tvrtke Ballard visoke snage od 4.3 Kw/l, do 140 Kw maksimalne snage do maksimalne operativne temperature od 95 °C [34]

Slika 11. Konstrukcija bloka gorivih ćelija u presjeku [35]

Slika 12. Sve što je potrebno da bi goriva ćelija (blok) normalno funkcionirala [36]

Slika 13. Grafički prikaz kemijskih procesa u gorivim ćelijama u zavisnosti od tipa [37]

Slika 14. Toyota Mirai, automobil na gorive ćelije lijevo, Hyundai Nexu na gorive ćelije (desno)[38]

Slika 15. Autobus na gorive ćelije [39]

Slika 16. Prikaz automobila na gorive ćelije (Toyota Mirai sa glavnim komponentama)[40]

Slika 17. Komponente autobusa na gorive ćelije i njegove osnovne karakteristike [41]

Slika 18. Toyota Sora, autobus na gorive ćelije [42]

Slika 19. Kako radi stanica za punjenje vodikom.[44]

Slika 20. Zeleni vodik, od proizvodnje do potrošača [45]

Slika 21. Godišnje emisije CO<sub>2</sub> u Europi po zemljama u 2019. godini 1885.-2016.[50]

Slika 22. Vodik iz obnovljivih izvora energije[51]

Slika 23. Opća shema vodikovog lanca vrijednosti, od proizvodnje do krajnjeg korištenja



## 11. Popis tablica

Tablica 1. Fizikalna svojstva i osnovne karakteristike vodika [2]:

Tablica 2. Toplotna vrijednost najvažnijih tehničkih goriva [3]

Tablica 3. Usporedba gustoće energije vodika i diesel goriva [4]

Tablica 4. Usporedni prikaz energetske moći tipičnih goriva za termo cikluse i cikluse gorivih ćelija

Tablica 5. Količina vodika dobivena pretvaranjem goriva [11]

Tablica 6. Karakteristike sagorijevanja vodika, metana i benzina [11]

Tablica 7. Tipovi gorivih ćelija i njihove osobine [18]

Tablica 8. Izlazne karakteristike PEM gorive ćelije u zavisnosti od prisutnosti ugljikovog monoksida/ugljikovog dioksida u gorivu [15]

Tablica 9. Karakteristike autobusa na vodik

Tablica 10. Usporedba SUS motora, baterijskih električnih vozila (BEV) i vozila s gorivim ćelijama (FCV) [12]

Tablica 11. Komparacija različitih vrsta vozila – efikasnost motora i transmisije [6]

Tablica 12. Minimalno trajanje punjenja baterije električnog vozila i gorive ćelije elekt. vozila

Tablica 13.. „Well-to-wheels“ u ovisnosti od vrste pogonskog agregata [12]

Tablica 14. Emisija štetnih plinova koje emitira vozilo u ovisnosti od vrste pogonskog goriva vozila [24]

Tablica 15. Prikaz nekih osobina vodika [1]

Tablica 16. Svojstva i omjeri curenja vodika i prirodnog plina [1]

Tablica 17. Pokazatelji učinka strateških ciljeva F54G

## 12. Popis grafova

- Graf 1. Efikasnost različitih sistema za transformaciju energije u električnu energiju[43]
- Graf 2. Ovisnost gustoće snage od gustoće struje gorivih ćelija [10]
- Graf 3. Odnos snage i efikasnosti vozila [10]:
- Graf 4.. Usporedba električnih automobila: Baterije vs. Gorive ćelije [10]
- Graf 5. Usporedba električnih automobila: Baterije vs. Gorive ćelije[10]
- Graf 6.. Usporedba električnih automobila: Baterije vs. Gorive ćelije, Specifična energija po litri[10]
- Graf 7. Emisije stakleničkih plinova 10]
- Graf 8. Godišnje emisije CO2 u Hrvatskoj 1885.-2016.[49]