

# Gorivni članci

---

**Olajoš, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:231:429233>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka University Studies, Centers and Services - RICENT Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
Sveučilišni preddiplomski studij politehnike

Završni rad  
GORIVNI ČLANCI

Rijeka, 2018.godina.

Antonio Olajoš

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
Sveučilišni preddiplomski studij politehnike

Završni rad  
GORIVNI ČLANCI

Mentorica: Izv. prof. dr. sc. Lidija Runko Luttenberger

Rijeka, 2018.godina.

Antonio Olajoš

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	1
POPIS SLIKA .....	3
POPIS TABLICA.....	4
SAŽETAK.....	5
SUMMARY .....	6
1. UVOD.....	7
2. Povijest gorivnih članaka.....	9
2.1. „Plinska baterija“ .....	9
2.2. Bacon-ov gorivni članak .....	10
2.3. NASA gorivni članci.....	10
2.4. PEM gorivni članak .....	11
3. Vrste gorivnih članaka.....	12
3.1. PEMFC članak .....	14
3.2. DMFC (direct methanol fuel cell) članak .....	15
3.3. AFC (Alkaline fuel cell) članak .....	17
3.4. PAFC članak .....	19
3.5. MCFC članak .....	20
4. Proizvodnja vodika .....	21
4.1. Reformacija ugljikovodičnih goriva .....	21
4.2. Obnovljivi izvori energije .....	22
4.3. Biološke metode.....	23
4.4. Mjere opreza pri rukovanju vodikom.....	23
5. Načini spremanja vodika .....	24
5.1. Nestacionarni spremnici.....	24
5.2. Stacionarni spremnici.....	25
5.2.1. Podzemni spremnik vodika.....	25
5.2.2. Power to gas tehnologija.....	25
6. Procjena utjecaja životnog vijeka na okoliš.....	26
6.1. Proizvodnja materijala za vozilo i sastavljanje vozila .....	27
6.2. Proizvodnja sirovina .....	28
6.3. Distribucija sirovina.....	29
6.4. Proizvodnja goriva .....	29
6.5. Transport goriva.....	31
6.6. Korištenje goriva.....	31
6.7. Zaključno o usporedbi procjene utjecaja životnog vijeka na okoliš .....	33
6.8. Troškovi životnog vijeka vozila s gorivnim člancima .....	33
7. Prednosti i prepreke za korištenje gorivnih članaka .....	35
7.1. Prednosti.....	35
7.2. Prepreke za korištenje gorivnih članaka .....	35

---

8. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA.....	38

## POPIS SLIKA

Slika 1. Princip elektrizatora, lijevo; gorivni članci, desno [1].....	9
Slika 2. Jedan od tri gorivna članka korištena u Space Shuttle Orbiter [1].....	11
Slika 3. Prikaz presjeka PEMFC gorivog članka [13]. ....	14
Slika 4. Prototip DMFC članka korištenog u svrhu punjača Li-ion baterija [1]. ....	17
Slika 5. Prikaz presjeka MCFC gorivnog članka [15]. ....	20
Slika 6. Usporedba emisija ugljičnog dioksida u automobilima pri različitim načinima dobivanja goriva[14]. ....	21
Slika 7. Proizvodnja, transport i pohrana energije pri korištenju gorivnih članaka sa proizvodnjom vodika iz obnovljivih izvora energije [1].....	22
Slika 8. Prototip prijenosnog gorivog članka snage 50W [1]. ....	24
Slika 9. Potrošnja fosilnih goriva za proizvodnju 1MJ benzina i 1MJ vodika primjenom različitim tehnologija [14]. ....	30
Slika 10. Emisije stakleničkih plinova za životne cikluse goriva[14].....	31
Slika 11. Troškovi korištenja vozila s gorivnim člancima koji koriste vodik obzirom da način dobivanja vodika [18].....	34

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste gorivnih članaka [9].....	13
Tablica 2. Kemijske reakcije kod DMFC članaka .....	16
Tablica 3. Utjecaji stogova gorivnih članaka na okoliš [14].....	28
Tablica 4. Emisije iz izgaranja prirodnog plina [14].....	29
Tablica 5. Rezultati LCA za vozila s gorivnim člancima tijekom vožnje od 1 km s vodikom i metanolom kao gorivom [14]. .....	32
Tablica 6. LCA tijekom korištenja vodika i metanola u vozilima s gorivnim člancima i vozilima sa motorom s unutarnjim izgaranjem[14]. .....	33

## **SAŽETAK**

U ovome završnome radu se obrađuje tema gorivnih članaka. U uvodnome dijelu ukratko je opisan osnovni način rada gorivnih članaka te opasnosti pri korištenju vodika. U drugom poglavlju predstavljen je napredak gorivnih članaka kroz povijest, od slučajnog otkrića do danas. U trećem poglavlju su pobliže opisane pojedine vrste gorivnih članaka, načini rada, prednosti i mane te ovisno o njima i moguća primjena za svaku vrstu. Četvrto poglavlje govori o načinima proizvodnje vodika, što bitno označava u kojoj mjeri će gorivni članak biti „čist“, odnosno koliko njegovo korištenje onečišćuje okoliš. U petom poglavlju opisani su načini spremanja vodika obzirom na primjenu. Šesto poglavlje posvećeno je usporedbi procjene utjecaja životnog vijeka na okoliš goriva i vozila kod korištenja gorivnih članaka i motora s unutarnjim izgaranjem. Prednosti te prepreke koje je potrebno savladati kako bi gorivni članci bili u masovnoj upotrebi opisani su sedmom poglavlju.

Ključne riječi: gorivni članak, vodik, čista energija, LCA



## **FUEL CELLS**

### **SUMMARY**

The bachelor's thesis elaborates the topic of fuel cells. The introductory part briefly describes the basics of fuel cells operation as well as the dangers related to hydrogen use. The second chapter presents the development of fuel cells through history, from their accidental discovery to present day. The third chapter describes in more detail the types of fuel cells, modes of operation, advantages and disadvantages, and depending on those, possible application of each type. The fourth chapter deals with hydrogen production methods, essentially defining to what extent the fuel cell will be "clean" or how much its use pollutes the environment. Chapter five describes hydrogen storage with regard to its application. Sixth chapter is dedicated to comparing fuel and vehicle life cycle costs when using fuel cells and internal combustion engines. The advantages and obstacles that need to be overcome in order for fuel cell to be in massive use are described in chapter seven.

**Keywords:** fuel cell, hydrogen, clean energy, LCA

## 1. UVOD

Ekološka svijest jedan je od najvažnijih čimbenika funkcioniranja u modernom i suvremenom svijetu, a to je jasno vidljivo u jačanju raznih pokreta kojima je cilj ekološka zaštita. Među najveće zagađivače okoliša ubrajaju se industrijski kompleksi, ali jednako tako i vozila na motorni pogon (automobili, poljoprivredni i građevinski strojevi i vojna vozila) koja svojim radom proizvode po okoliš štetne plinove poput ugljičnog monoksida (CO), ugljikovodika (HC) i dušikovog-oksida (NO<sub>x</sub>), te čestice čađe. Uz to negativan utjecaj na čovjeka imaju i drugi faktori poput buke i vibracija koje se javljaju pri radu vozila na motorni pogon. U proteklih 20-ak godina velike svjetske industrije automobila uložile su golema sredstva u istraživanja novih izvora energije za pogon automobila kako bi se uklonila već kritična zagađenost ispušnim plinovima vozila na klasičan, motorni pogon.

Fosilna goriva imaju dva bitna nedostatka:

- zalihe su im konačne i približavaju se svom kraju,
- vađenjem ugljika na površinu Zemlje i njegovim gorenjem povećava se sadržaj CO<sub>2</sub> u atmosferi, a time se pojačava efekt staklenika te se doprinosi globalnom zatopljenju.

Gorivni članak je po definiciji električni članak koji za razliku od članaka za pohranjivanje električne energije može biti kontinuirano napajan gorivom tako da je izlaz električne energije konstantan. Pretvara vodik, ili goriva koja sadržavaju vodik, direktno u električnu energiju te toplinu kroz elektrokemijsku reakciju vodika i kisika u vodu.

Ukupna reakcija je :  $2H_{2(plin)} + O_{2(plin)} \rightarrow 2H_2O + energija$

Obzirom da se vodik i kisik u plinovitom stanju elektrokemijski pretvaraju u vodu, gorivni članci imaju mnoge prednosti naspram toplinskih strojeva. Kako je nusprodukt voda, to znači da nemaju negativnih posljedica na okoliš. Osim upotrebe u vozilima, gorivni članci mogu se upotrebljavati kako i u ostalim mobilnim primjenama poput mobitela, prijenosnih računala i drugih uređaja tako i u stacionarnim kao zamjena baterijama ili generatorima koji upotrebljavaju fosilna goriva.

---

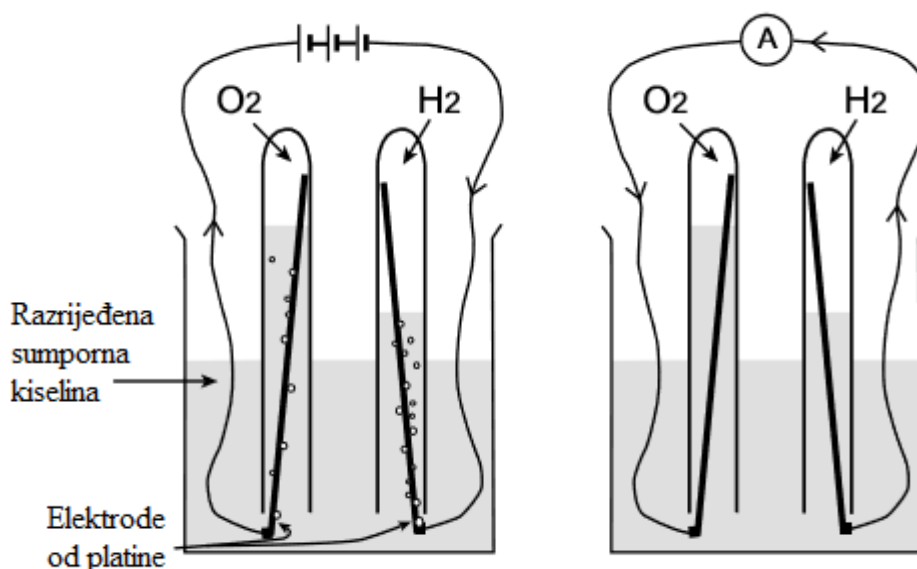
U radu se opisuju različite vrste gorivnih članaka uključujući njihove prednosti i nedostaci te moguća primjena. Navedeni su načini proizvodnje vodika i spremanja za naknadnu upotrebu te prikazana usporedba troškova vozila i goriva kod vozila s gorivnim člancima i vozila s motorom sa unutarnjim izgaranjem od samog početka do kraja životnog vijeka. Na samome kraju dane su prednosti i mane korištenja gorivnih članaka.

## 2. Povijest gorivnih članaka

### 2.1. „Plinska baterija“

Prvi gorivni članak razvio je 1839.godine britanski odvjetnik i amaterski znanstvenik William Grove. Princip je otkriven slučajno tijekom eksperimenta elektrolize tako da je odvojio bateriju sa elektrizatora te međusobno spojio dvije elektrode. Primijetio je da struja teče u suprotnom smjeru, trošeći plinove vodik i kisik (**Error! Reference source not found.1**). Izum je nazvao plinska baterija.

Plinska baterija se sastojala se od platinastih elektroda postavljenih u epruvete uronjene u kupku razrijeđene sumporne kiseline te je generirala napon od oko 1V.



Slika 1. Princip elektrizatora, lijevo; gorivni članci, desno [1].

Grove je 1842. godine spojio nekoliko takvih članaka u seriju i formirao „plinski lanac“. Koristio je plinski lanac da bi napajao elektrolizer, razdvajajući vodu na vodik i kisik. Međutim, zbog problema s korodiranjem elektroda i nestabilnosti materijala, takav gorivni članak nije bio praktičan [1].

## 2.2. Bacon-ov gorivni članak

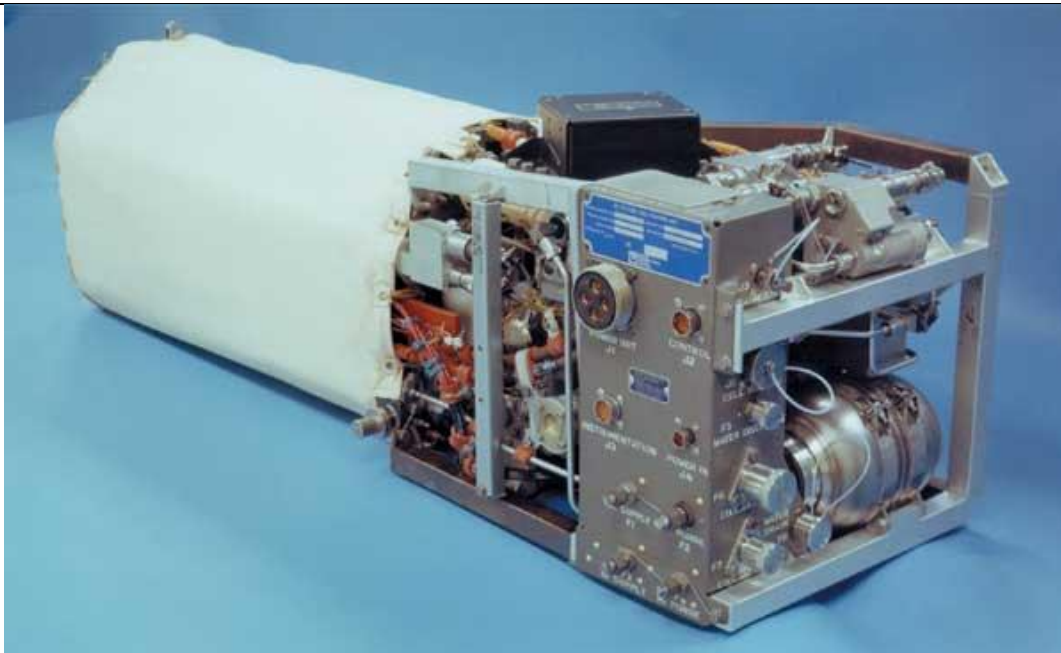
Značajna aktivnost na gorivnim člancima započela je u 1930-im godinama. Francis Bacon koji je bio inženjer kemije na Cambridge Sveučilištu u Engleskoj je godine 1959. uspješno proizveo prvi praktični gorivni članak snage 5 kW koji je mogao napajati stroj za zavarivanje. Bio je alkalnog tipa jer je koristio alkalni elektrolit (otopinu kalijeva hidroksida- KOH) umjesto razrijeđene sumporne kiseline. Elektrode su konstruirane od poroznog sinteriranog niklovog praha kako bi plinovi difundirali kroz elektrode te bili u kontaktu s tekućim elektrolitom. Takva konstrukcija je uvelike povećala dodirnu površinu između elektroda, plinova i elektrolita i samim time povećala gustoću snage gorivnih članaka, a također je korištenje nikla umjesto platine smanjilo cijenu izrade članaka [1].

## 2.3. NASA gorivni članci

Za potrebe svemirske industrije gorivni članci imaju veliku prednost nad konvencionalnim baterijama jer proizvode nekoliko puta više električne energije po ekvivalentnoj jedinici mase tj. imaju veću gustoću snage [1].

Tijekom 1960-ih u Windsoru, Connecticut, razvijena je elektrana od gorivnih članaka za Apollo svemirski brod. Elektrana je bila smještena u servisnom modulu broda te osiguravala električnu energiju, ali i pitku vodu za astronaute na putovanju prema mjesecu. Snabdijevala je brod sa 1,5kW kontinuirane električne snage te u preko 10.000 sati rada u 18 misija nije zabilježen niti jedan incident.

U 1970-im godinama razvijen je još snažniji alkalni gorivni članak za Space Shuttle Orbiter koji koristi 3 elektrane gorivnih članaka kako bi bile zadovoljene sve potrebe za električnom energijom tijekom leta. Orbiter ne koristi rezervne baterije što znači da gorivni članci u elektrani moraju imati visoku pouzdanost. Koriste vodik i kisik iz krio-spremnika i osiguravaju električnu snagu te vodu za piće. Svaki gorivni članak (Slika 2) je u stanju opskrbiti sa 12kW kontinuirano ili čak do 16kW na kratke intervale. Jedinice smještene u Orbiteru predstavljaju značajan napredak u tehnologiji naspram članaka u Apollo misijama jer proizvode oko 10 puta više snage iz jedinica slične veličine. Do danas su korištene u 135 letova te su prikupile preko 100.000 sati rada [3].



**Slika 2. Jedan od tri gorivna članka korištena u Space Shuttle Orbiter [1].**

#### **2.4. PEM gorivni članak**

Thomas Grubb i Leonard Niedrach iz General Electric-a (GE) su u ranim 1960-im godinama izumili i razvili prvi gorivni članak s polimernom membranom kao elektrolitom. U početku se razvoj odvijao u okviru vojnog programa kako bi se osigurala električna energija za osoblje na terenu. Privučena mogućim korištenjem PEM (Proton Exchange Membrane) gorivnih članaka u Apollo misijama, NASA (National Aeronautics and Space Administration) je testirala njihov potencijal kao pomoćni izvor snage na Gemini svemirskom brodu. GE gorivni članci pokazali su na neke tehničke probleme prije lansiranja uključujući curenje kisika kroz membranu te su na prvih 4 letova korištene baterije. GE gorivni članci su tada bili redizajnirani u novi, P3, model te su uspješno korišteni u Gemini letovima 6-12 proizvedeći maksimalno 2000W snage [1].

### 3. Vrste gorivnih članaka

Gorivni članci imaju nekoliko različitih varijacija izvedbe, ali svi rade na istom principu. Sastavljeni su od 3 susjedna segmenta: anode- elektrolita- katode. Dvije kemijske reakcije se događaju na dodirnim dijelovima susjednih segmenata, a rezultat reakcija je iskorišteno gorivo, proizvedena voda ili ugljični dioksid te električna struja korištena za daljnje napajanje električnih trošila. Najvažnije vrste gorivnih članaka prikazane su u tablici 1.

Na anodi oksidira gorivo, najčešće vodik, pretvarajući ga u pozitivno nabijen ion i negativno nabijen elektron. Elektrolit je tvar posebno namijenjena kako bi omogućila prolazak iona kroz njega na putu do katode, ali ne i za oslobođene elektrone koji tada prolaze kroz žicu stvarajući električnu struju. Kada ioni stignu do katode, ponovo se sastaju s elektronima te zajedno reagiraju s trećom kemikalijom, najčešće kisikom, proizvodeći vodu ili ugljični dioksid [2].

Značajke koncepta gorivnih članaka su:

- Elektrolit koji uglavnom definira vrstu gorivnih članaka, a može biti napravljen od nekoliko tvari kao npr. kalij hidroskid, karbonati, fosforna kiselina ili neka druga tvar koja sadrži ili stvara pokretljive ione
- Gorivo, najčešće se koristi vodik, ali može biti bilo koji kemijski element visokog sadržaja unutarnje energije koji tu energiju može oksidacijom osloboditi i prijeći u ione
- Katalizator anode, uglavnom fini platinasti prah, razdvaja gorivo na elektrone i ione
- Katalizator katode, često nikal, pretvara ione u otpadne kemikalije odnosno najčešće u vodu

Tipičan gorivni članak proizvodi od 0.6V do 0.7V pri punom nazivnom opterećenju. Napon opada pri porastu struje iz sljedećih razloga:

- Gubitak pri aktivaciji
- Gubitak na omskom otporu (pad napona zbog otpora na dijelovima članaka te vezama)

- Gubitak prilikom masovnog transporta (iscrpljivanje reaktanta na mjestima katalizatora)

Kako bi gorivni članci predali željenu količinu energije mogu se spajati u serijski spoj radi postizanja većeg napona te u paralelni spoj poradi veće isporučene struje. Takvo rješenje naziva se stog gorivnih članaka. Površina članaka može biti povećana kako bi se omogućila veća jakost struje iz svakog članka. Plinovi reaktanti stoga moraju biti jednoliko distribuirani svakom članku kako bi učinak bio maksimalan [16].

Niskotemperaturni gorivni članci				Visokotemperaturni gorivni članci		
	DMFC Direktna pretvorba metanola	PEMFC Polimerna membrana	AFC Alkalni elektrolit	PAFC S fosforom kiselinom	MCFC S rastaljenim karbonatima	SOFC S čvrstim oksidom
Elektrolit	Propusna membrana za protone	Propusna membrana za protone	Vodena otopina KOH	Fosforna kiselina	Rastaljeni karbonati	Čvrsta keramika od cirkonija
Temperaturni raspon	<100°C	<100°C	<100°C	150-210°C	~650°C	800-1000°C
Gorivo	Metanol	Vodik	Vodik	Vodik	Prirodni plin, ugljen	Prirodni plin, ugljen
Raspon snage	100mW-1kW	1W-500kW	10-200kW	<10MW	100MW	<100MW
Primjeri primjene	Vozila, mali uređaji	Vozila, mali generatori, lokalna opskrba	Svemir	Elektrane	Elektrane, kombinacija s parnim ili plinskim turbinama	Elektrane, kombinacija s parnim ili plinskim turbinama

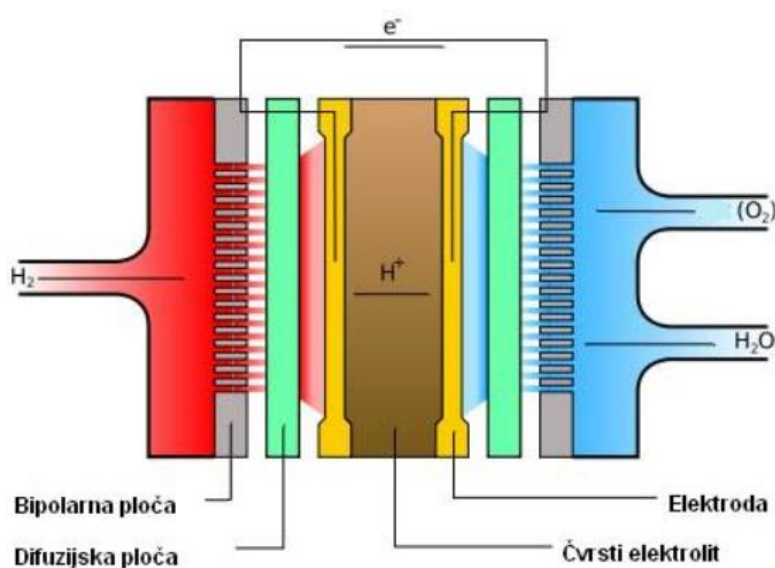
**Tablica 1. Vrste gorivnih članaka [9].**



### 3.1. PEMFC članak

PEMFC (Proton-exchange membrane fuel cells) rade na relativno niskim temperaturama te imaju visoku gustoću snage. Vrlo brzo mogu mijenjati izlaznu vrijednost kako bi zadovoljili potrebu za snagom te su zbog brzog starta glavni kandidat za korištenje u automobilima, zgradama, a potencijalno i u malim uređajima kao zamjena za punjive baterije [1].

Glavna značajka je korištenje polimerne membrane umjesto tekućeg elektrolita tako da protoni prolaze kroz membranu do katode dok elektroni moraju ići zaobilaznim putem jer membrana nije električki vodljiva. Presjek je prikazan na slici 3. Najčešće korištena membrana je Nafion koja se oslanja na ovlaživanje membrane tekućinom kako bi provodila protone. To kao rezultat ima nemogućnost korištenja iznad  $90^{\circ}\text{C}$  jer bi se membrana osušila. Novije membrane bazirane na PBI ili fosfornoj kiselini mogu doseći temperature i do  $220^{\circ}\text{C}$ , a više temperature omogućuju veću efikasnost i gustoću snage, lakše hlađenje zbog veće razlike temperatura, manju osjetljivost na ugljični monoksid te veću kontrolu. Međutim, te novije vrste nisu uobičajene. Pri visokim temperaturama Nafion je teško održavati vlažnim dok materijali dopirani kiselinama ne koriste vodu kao medij za provođenje protona. Također imaju bolja mehanička svojstva, jaču snagu te su jeftinija od Nafion membrana, ali veliki problem predstavlja istjecanje kiselina. Aromatični polimeri su puno jeftiniji od materijala za Nafion te su manje osjetljivi na temperaturu, ali su puno manje ionski vodljivi te zbog toga uglavnom nisu željeni odabir [4].



Slika 3. Prikaz presjeka PEMFC gorivog članka [13].

### 3.2. DMFC (direct methanol fuel cell) članak

Metanol je tekućina na  $-97^{\circ}\text{C}$  do  $64.7^{\circ}\text{C}$  pri atmosferskom tlaku, a gustoća energije je za red veličine veća od visokokompresiranog vodika te 15 puta veća od Li-ion baterija.

Članci s izravnom pretvorbom metanola podkategorija su PEMFC članaka, a korištenje metanola kao goriva ima prednost zbog lakog transporta, gustoće energije te relativno stabilne tekućine u svim okolnim uvjetima. Efikasnost je niža pa su pretežito namjenjeni za prenosive sustave gdje je gustoća snage i energije važnija od efikasnosti. Ovakvi članci koriste otopinu metanola za prenošenje reaktanta u članak. Temperature su u rasponu od  $50^{\circ}\text{C}$  do  $120^{\circ}\text{C}$ , a kod viših temperatura je veći tlak što znači da su efikasniji pri višim temperaturama i tlakovima, međutim takvi uvjeti uzrokuju velike gubitke pa je ukupna efikasnost neznatna te se ipak koriste u atmosferskim uvjetima.

Prelazak metanola je pojava kod koje metanol difundira kroz membranu bez reakcije i time značajno smanjuje efikasnost jer dolaskom na katodu odmah reagira sa zrakom i krajnji rezultat je redukcija napona članaka. Prelazak je tako glavni faktor neefikasnosti te je često polovica metanola izgubljena pri prelasku. Navedeni problem može biti ublažen na sljedeće načine:

1. razvijanjem alternativnih membrana,
2. unaprijeđenjem elektro-oksidacijskog procesa u sloju katalizatora te unaprijeđenjem strukture katalizatora i difuzijskih slojeva i
3. optimiziranjem dizajna polja strujanja.

Ostali problemi koji prate ovu vrstu članaka je postupanje s ugljičnim dioksidom, održavanje konstantne količine otopine u vodi te tromo dinamičko ponašanje. Jedini otpadni produkti su ugljični dioksid i voda [5].

Metanol i voda se apsorbiraju na katalizatoru uglavnom napravljenom od platine i čestica rutenija te gube protone dok se ne formira ugljični dioksid. Nije moguće koristiti čisti metanol jer je na anodi potrebna voda za reakciju [1].

Reakcije kod DMFC članka prikazane su u tablici 2.

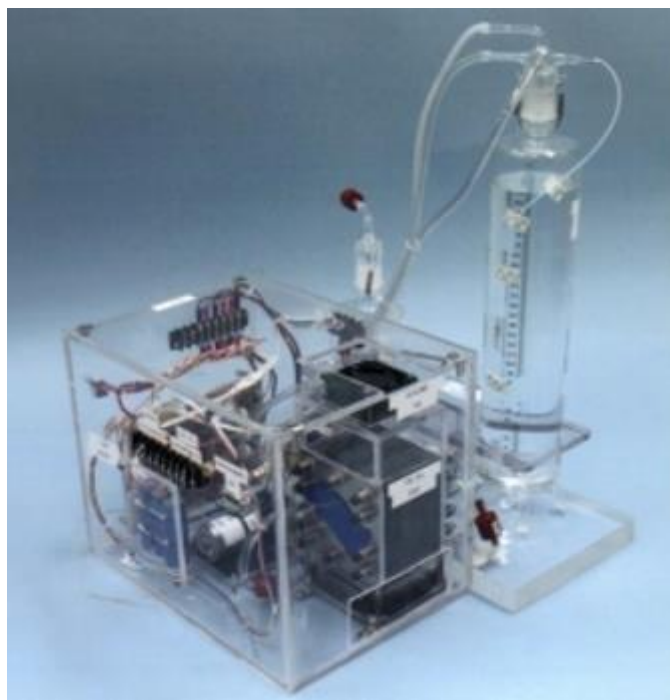
Anoda	$CH_3OH + H_2O \rightarrow 6H^+ + 6e^- + CO_2$
Katoda	$\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$
Ukupna reakcija	$CH_3OH + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$

**Tablica 2. Kemijske reakcije kod DMFC članka**

Platina se koristi kao katalizator u obje reakcije što doprinosi smanjenju napona članka jer sav metanol koji je prisutan na katodi oksidira. Ukoliko bi bio pronađen neki drugi katalizator za redukciju kisika, problem prelaska metanola bi vrlo vjerojatno bio značajno smanjen.

Tijekom oksidacije metanola formira se ugljični monoksid koji se snažno apsorbira na platinasti katalizator smanjujući broj dostupnih mjesta za reakciju te samim time i svojstva članka. Dodavanjem drugih metala, kao što su rutenij ili zlato umanjuje se problem na platinastom katalizatoru [17].

DMFC članci u trenutnom stanju razvijenosti ograničeni su snagom koju mogu proizvesti, ali mogu pohraniti puno energije u malom prostoru što znači da mogu proizvoditi male vrijednosti snage u dužem vremenu. To ih čini neprihvatljivima za veće snage, ali idealne za male poput viličara te potrošačku robu kao što su mobilni telefoni, digitalne kamere, laptopi i slično [2].



**Slika 4. Prototip DMFC članka korištenog u svrhu punjača Li-ion baterija [1].**

### **3.3. AFC (Alkaline fuel cell) članak**

Gorivni članci s alkalnim elektrolitom najrazvijenija su tehnologija gorivnih članaka te spadaju među najefikasnije članke s potencijalom da dosegnu 70% iskoristivosti. Koriste vodik i čisti kisik za proizvodnju pitke vode, topline te električne energije [2].

Dvije elektrode odvojene su poroznom matricom zasićenom vodenom alkalnom otopinom kao što je kalij hidroksid (KOH). Takve otopine ne odbacuju ugljični dioksid pa gorivni članak može postati „otrovan“ pri pretvorbi KOH u kalijev karbonat ( $K_2CO_3$ ) te iz tog razloga gorivni članci uglavnom rade sa čistim kisikom ili barem pročišćenim zrakom kojem je tada potrebno sredstvo koje bi očistilo što je više moguće ugljičnog dioksida. Dokazano je da se takav problem ne događa pri visokim temperaturama odnosno pri višim radnim temperaturama nema smanjenja u performansama kao što je slučaj pri sobnoj temperaturi gdje je pad performansi značajan.

---

Zbog efekta trovanja postoje dvije glavne varijante AFC članaka:

### 1. Statički elektrolit

AFC članci sa statičkim elektrolitom korišteni u Apollo i Space Shuttle koriste azbestni separator zasićen u kalij hidroksidu. Proizvodnja vode kontrolirana je isparavanjem na anodi.

### 2. Tekući elektrolit

Rješenje koristi otvoreniju matricu koja omogućuje elektrolitu da putuje između elektroda (paralelno s elektrodama) ili kroz elektrode poprečnim smjerom (EloFlux gorivni članak). U paralelnom toku proizvedena voda ostaje u elektrolitu, a stari elektrolit se može zamijeniti novim. Takvom sustavu potrebno je više prostora između elektroda kako bi se omogućio tok, a to povećava i otpor članaka smanjujući snagu na izlazu. Ovakvo rješenje koristi platinaste i neplemenite metale kao katalizator rezultirajući povećanom efikasnošću i cijenom. EloFlux rješenje s poprečnim tijekom elektrolita ima prednost jeftinije konstrukcije i zamjenjivog elektrolita. Elektrode se sastoje od dvoslojne strukture: aktivnog elektrokatalizatorskog i hidrofobnog sloja. Aktivni sloj sastoji se od organske smjese koja je mljevena te zatim valjana na sobnoj temperaturi kako bi se stvorio unakrsno povezani samonosivi sloj. Hidrofobna struktura spriječava curenje elektrolita kroz kanale protoka reaktantnog plina i osigurava difuziju plinova na mjesto reakcije. Navedena dva sloja se potom prešaju na provodljivu metalnu mrežu te se sinteriranjem dovršava postupak.

AFC gorivni članci su najjeftiniji članci za proizvodnju jer katalizator potreban za elektrode može biti jedna od mnogih različitih kemikalija koje su jeftinije u usporedbi s onima koje se koriste u ostalim vrstama članaka [6].

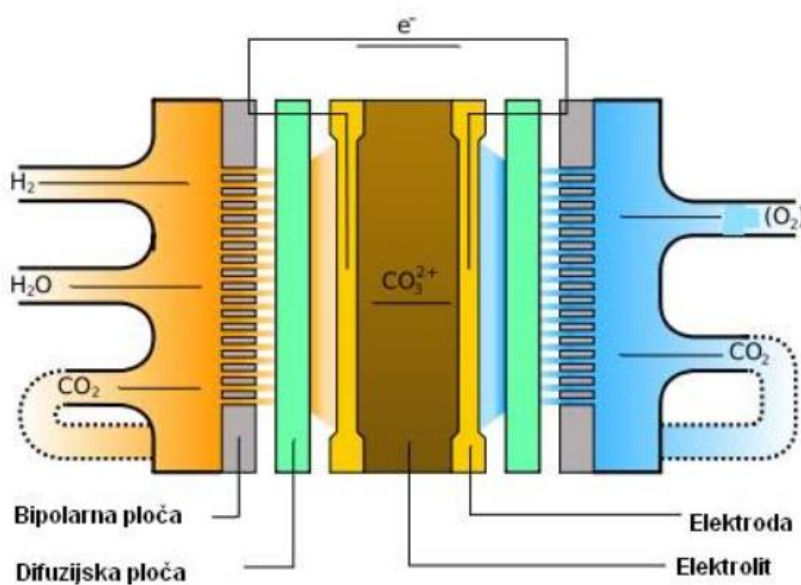
### 3.4. PAFC članak

PAFC (Phosphoric acid fuel cells) članci su razvijeni u srednjim 1960-im godinama te su od tada značajno napredovali u stabilnosti, učinku te cijeni. To su prvi gorivni članci koji su komercijalizirani te ih je trenutno u upotrebi više od ostalih vrsta članaka. Namjenjeni su stacionarnoj uporabi te kao elektrolit koriste visokokonzentriranu ili čistu tekuću fosfornu kiselinu zasićenu u matrici silicij karbida. Radna temperatura je u rasponu od 150 do 210°C, a elektrode su napravljene od karbon papira prevučenog fino raspršenim platinastim katalizatorom. Pri takvim radnim temperaturama istisnuta voda može biti pretvorena u paru za grijanje vode ili zraka te to potencijalno povećava efikasnost do 70%. PAFC članci mogu podnijeti  $CO_2$  plin te čak i koncentracije do 1,5%  $CO$  što svakako širi izbor mogućeg goriva za korištenje, no ako se koristi benzin mora se odstraniti sumpor. Problem pri nižim temperaturama je što fosforna kiselina postane slab vodič iona te „trovanje“ platinastog katalizatora s  $CO$  na anodi postaje značajno. Nedostatak je i u maloj gustoći snage te agresivnom elektrolitu [7].

PAFC članci se trenutno koriste u stacionarnim generatorima snage najčešće 100kW-400kW te u većim vozilima poput autobusa.

### 3.5. MCFC članak

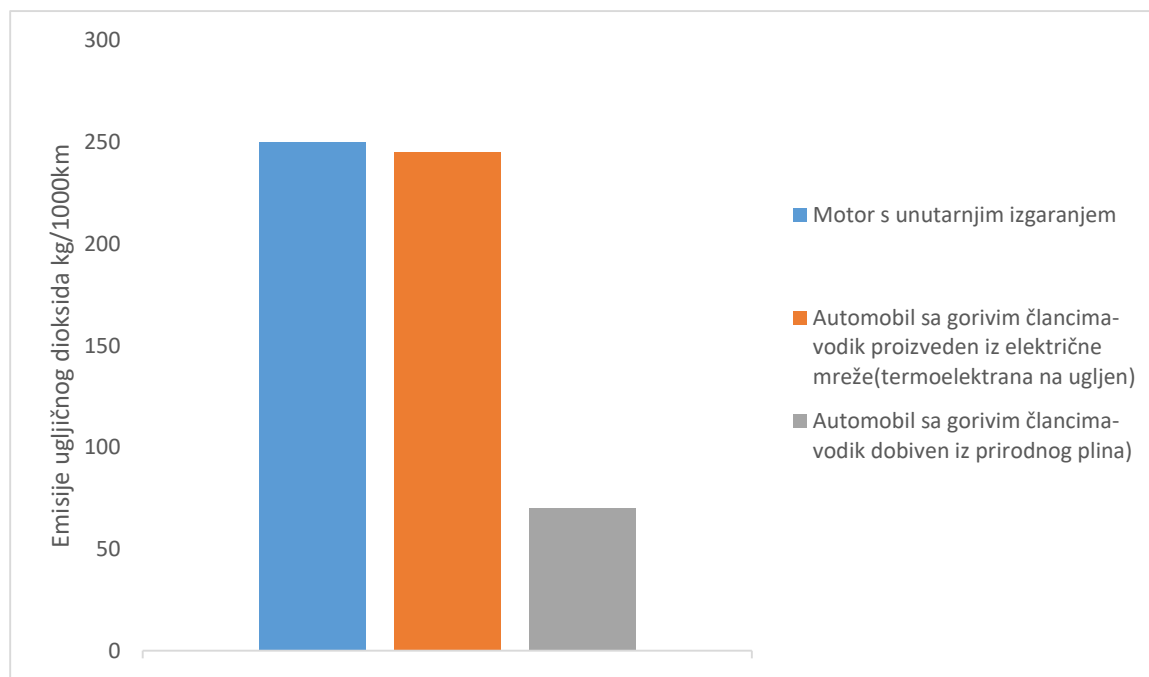
Gorivni članci s otopljenim karbonatom kao elektrolitom su visokotemperaturni članci (temperature više od  $600^{\circ}\text{C}$ ). Trenutno se razvijaju za elektrane bazirane na prirodnom plinu, bioplenu i ugljenu za električne, industrijske te vojne upotrebe. Elektrolit se sastoji od rastopljene smjese karbonatne soli zatvorene u poroznoj, kemijski inertnoj keramičkoj matrici beta-aluminijskog čvrstog elektrolita. Zbog visokih temperatura nedragocjeni metali također mogu biti korišteni kao katalizatori na anodi i katodi, te je time cijena manja. U usporedbi s PAFC člancima imaju veću efikasnost [8].



Slika 5. Prikaz presjeka MCFC gorivnog članka [15].

## 4. Proizvodnja vodika

Jako važno pitanje je na koji način će se proizvoditi vodik jer, primjerice, ako se vodik proizvodi elektrolizom vode, a postupak elektrolize je napajan iz električne mreže pri čemu je struja proizvedena u termoelektrani sagorijevanjem ugljena, tada redukcije ugljičnog dioksida ne bi bilo u usporedbi s razinama ugljičnog dioksida koje proizvodi motor s unutarnjim izgaranjem (u takvom slučaju zapravo bi bilo povećanje zagađivanja okoliša). Razlika emisija ugljičnog dioksida vidljiva je iz dijagrama na slici 6. No ako se proces elektrolize napaja iz obnovljivog izvora energije (energija sunca-solarne elektrane, energija vjetra-vjetroelektrane i sl.) nema emisija ugljičnog dioksida. Obzirom da je industrija gorivnih članaka još uvijek u ranoj fazi, nije determinirana vodeća metoda proizvodnje vodika [1].



**Slika 6. Usporedba emisija ugljičnog dioksida u automobilima pri različitim načinima dobivanja goriva[14].**

### 4.1. Reformacija ugljikovodičnih goriva

Zbog obilja prirodnog plina i dostupnosti metanola i propana te nedostatka infrastrukture za korištenje vodika očekuje se da, na kratko vrijeme, ugljikovodična goriva budu dominantna goriva za korištenje u stacionarnim gorivnim člancima. Dokle god su ova goriva dostupna po

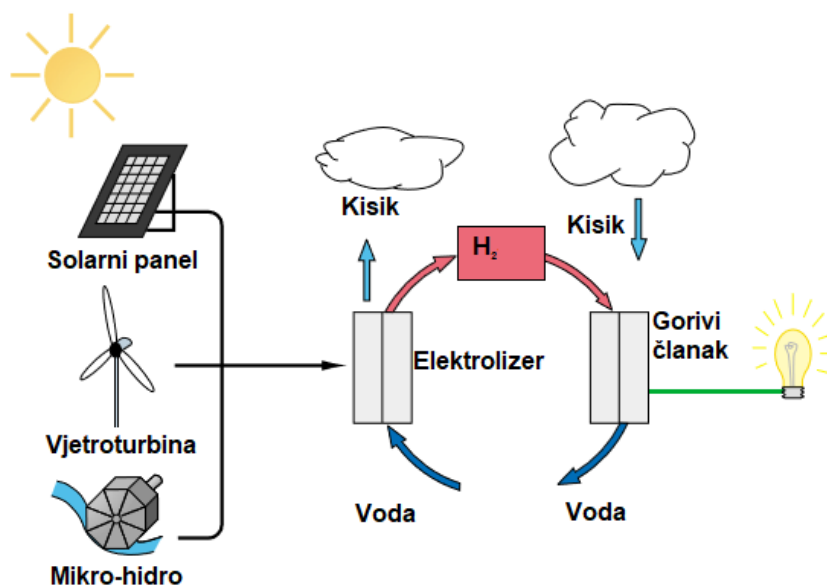


niskoj cijeni, reformacija ugljikovodičnih goriva je cjenovno najefikasnija metoda proizvodnje vodika. Nedostatak kod postupka reformiranja ugljikovodičnih goriva je emisija ugljičnog dioksida što ne zagađuje okoliš, ali se smatra da je ugljični dioksid uzrok globalnom zatopljenju [1].

## 4.2. Obnovljivi izvori energije

Vodik se može proizvoditi održivo bez emisije ugljičnog dioksida iz obnovljivih izvora energije. Primjeri su korištenje solarnih panela, vjetroturbine ili mikro-hidroelektrane kako bi se energija sunčevog zračenja pretvorila u električnu snagu koja pokreće elektrolizator. Elektrolizer razdvaja vodu proizvodeći plinove vodika i kisika. Vodik se zatim sprema za korištenje u gorivnom članku, a kisik se ispušta u atmosferu. Kada sunce sija, vjetar puše ili voda teče, elektrolizer može proizvoditi vodik.

Energetski sustav sjedinjen s vodikom iz obnovljivih izvora i gorivni članak je zatvoren sustav jer niti jedan produkt ili reaktant (voda, vodik, kisik) se ne gubi u okoliš. Voda korištena u elektrolizeru pretvara se u plinove koji se kasnije opet pretvaraju u vodu. Električna energija proizvedena iz solarnih panela prenosi se u kemijsku energiju u obliku plinova. Plinovi mogu biti pohranjeni i transportirani kako bi bili ponovno pretvoreni u elektricitet [1], slika 7.



**Slika 7. Proizvodnja, transport i pohrana energije pri korištenju gorivnih članaka s proizvodnjom vodika iz obnovljivih izvora energije [1].**

### **4.3. Biološke metode**

Istražuje se i razvija proizvodnja vodika biološkim metodama, te se tako proizveden vodik naziva biovodik. Primjer je tzv. metabolički prekidač u zelenoj algi koji uzrokuje da alga oksidira vodu i proizvodi čisti plin vodik kada su sumporne hranjive tvari iscrpljene iz medija za rast alge. Ta i ostale metode proizvodnje biovodika su tek u fazi razvoja, ali jednoga dana bi mogle osigurati još jedan način proizvodnje vodika.

### **4.4. Mjere opreza pri rukovanju vodikom**

Pri korištenju vodika kao goriva potrebno je pridržavati se nekih mjera opreza kako korištenje vodika ne bi prouzročilo više štete nego koristi. Posebno treba obratiti pažnju pri projektiranju, određivanju radnog vijeka i održavanju opreme koja ima svrhu manipulacije vodika tako da se onemogući nekontrolirano ispuštanje vodika u okoliš.

Kod korištenja spremnika pod visokim tlakom potrebno je spremnike smjestiti na otvoren prostor koji je dobro ventiliran kako bi se spriječila mogućnost zapaljenja. Ukoliko se vodikom rukuje na odgovarajući način, on može biti manje opasan od nekih konvencionalnih goriva poput benzina ili prirodnog plina. U slučaju da dođe do istjecanja vodika iz spremnika s obzirom na to da je lakši od zraka, diže se i širi u atmosferu pa su šanse da se zapali, male.

## 5. Načini spremanja vodika

### 5.1. Nestacionarni spremnici

Kod nestacionarnih spremnika postoje samo dvije razrađene tehnologije spremanja vodika. Tekući vodik može biti korišten kao u primjeru Space Shuttle-a, međutim taj oblik vodika zahtijeva krio-spremnike i vrije iznad 20.268K (-252.882 °C) te se zbog potrebe spuštanja temperature vodika tako nisko pojavljuju veliki gubici energije. Spremnici također moraju biti jako dobro izolirani kako bi spriječili kuhanje, ali dodavanje izolacije povećava cijenu. Tekući vodik ima manju gustoću energije po volumenu naspram ugljikovodika kao primjerice benzin koji ima 4 puta veću gustoću energije. U jednoj litri benzina nalazi se oko 116 grama vodika (64%) dok se litra čistog tekućeg vodika sastoji od samo 71 grama vodika što dodatno naglašava problem gustoće vodika.

Komprimirani vodik se sprema nešto drugačije te ima veću gustoću energije po masi, ali lošu gustoću energije po volumenu u odnosu na ugljikovodike te stoga zahtijeva velike spremnike. Veliki spremnik vodika je teži nego mali spremnik ugljikovodičnog goriva potrebnog za pohranjivanje jednake količine energije dok su svi drugi faktori podjednaki. Povećanjem tlaka plina poboljšava se gustoća energije i smanjuje potreban spremnik, ali ga ne čini lakšim. Komprimirani vodik treba 2,1% sadržaja energije kako bi se napajao kompresor [10].



Slika 8. Prototip prijenosnog gorivog članka snage 50W [1].

## 5.2. Stacionarni spremnici

Suprotno od nestacionarnih primjena, kod stacionarnih gustoća energije nije veliki problem. Kao i kod mobilnih, stacionarne primjene koriste tehnologije komprimiranog i tekućeg vodika.

### 5.2.1. Podzemni spremnik vodika

Plinoviti vodik se skladišti u podzemnim špiljama ili osiromašenim naftnim i plinskim poljima. Za korištenje turboekspandera uz spremnik pod tlakom od 200 bara potrebno je 2,1% spremljene energije. U Texasu se vodik od 1980.-ih godina sprema u solnoj špilji oblika cilindra s promjerom 49 m i visinom od 300 m. Iskoristiv kapacitet je  $30,2 * 10^6 m^3$  ili 2.520 tona [11].

### 5.2.2. Power to gas tehnologija

Power to gas (P2G) je tehnologija koja pretvara električnu energiju u plinovito gorivo. Kada se koristi višak energije generirane od vjetrova koncept se naziva windgas. Trenutno se koriste 3 metode te svaka od njih koristi elektricitet za razdvajanje vode na vodik i kisik putem elektrolize. U prvoj metodi dobiveni vodik se ubrizgava u mrežu prirodnog plina ili se koristi u transportu ili industriji. Druga metoda kombinira vodik s ugljičnim dioksidom i pretvaraju ih u metan putem Sabatier-ovom reakcijom. Metan tada može biti u mreži prirodnog plina ili pretvoren u ukapljeni naftni plin (LPG) sintenziranjem zamjenskog prirodnog plina s djelomično reverznim hidrogeniranjem pri visokom tlaku i niskoj temperaturi. Treća metoda koristi izlaz generatora plina ili bioplinskog postrojenja. Nečistoće, poput ugljičnog dioksida, vode, sumporovodika i čestica, moraju se ukloniti iz bioplina ako se plin koristi za skladištenje u plinovodima kako bi se spriječilo oštećenje [12].

## 6. Procjena utjecaja životnog vijeka na okoliš

LCA (Life Cycle Assessment) je pomagalo za procjenu potencijalnih utjecaja proizvoda i usluga na okoliš kroz cijeli životni ciklus od eksploatacije i dobivanja materijala i goriva do izrade predmeta te odlaganja/recikliranja istog. Kada je riječ o vozilima i njihovom pogonu, razmatraju se sljedeća dva ciklusa:

### 1) Ciklus vozila

- a) proizvodnja vozila - u ovoj se fazi računaju emisije stakleničkih plinova tijekom proizvodnje vozila. U vozilima pogonjenim motorom s unutarnjim izgaranjem i vozilima s gorivnim člankom računaju se čelici koji se koriste za proizvodnju vozila. Osim čelika, u ovom dijelu analize uzimaju se u obzir i materijali potrebni za proizvodnju gorivnih članaka, kao što su polimerna membrana, platina kao katalizator, grafit itd.
- b) sastavljanje vozila – u ovoj fazi se kvantificiraju potrebna energija i emisije stakleničkih plinova za prijevoz vozila tijekom sastavljanja. Zbog kompleksnog opskrbnog lanca u automobilske industriji i povezanih poteškoća u procjeni energetske potrebe sastavljanja vozila, energija sastavljanja se procjenjuje kao linearna funkcija mase vozila
- c) održavanje vozila - uključuje potrošnju energije i emisije stakleničkih plinova tijekom održavanja i popravaka tijekom životnog vijeka za koji se pretpostavlja da iznosi 300.000 km
- d) zbrinjavanje vozila (recikliranje) - na kraju životnog vijeka vozila ono se usitnjava. Energija za zbrinjavanje je zbroj energije potrebne za premještanje vozila od rastavljača do usitnjavača i energije za usitnjavanje

### 2) Ciklus goriva - sastoji se od koraka:

- a) proizvodnja sirovina - potrošnja energije i emisije stakleničkih plinova tijekom proizvodnje sirovina za dobivanje potrebnog goriva (vodik ili benzin)
- b) transport sirovina - sirovina za benzin i vodik mora se prevesti u rafinerije i postrojenja za reformiranje. U ovoj fazi se računa potrošnja energije i emisije stakleničkih plinova tijekom prijevoza sirovina
- c) proizvodnja goriva - potrošnja energije i emisije stakleničkih plinova tijekom prerade sirovina

- d) distribucija goriva (npr, benzina i vodika)
- e) korištenje goriva - tijekom uporabe vozila, a uključuje potrošnju energije (gorivo) i emisije stakleničkih plinova tijekom potrošnje (izgaranja) goriva.

Cjelovitu procjenu životnog ciklusa (LCA) u industriji goriva / transportu potrebno je izvršiti na način da se za svaku fazu životnog ciklusa kvantificiraju emisije u vodu, tlo i zrak. Te faze su pred-operacije (istraživanje i razvoj, izrada i gradnja), operacije i post-operacije (recikliranje, odlaganje i rastavljanje). Formiranje oksida, zakiseljavanje, eutrofikacija, globalno zatopljenje, stratosfersko oštećenje ozonskog omotača, ekotoksikološki utjecaji, smanjenje biološke raznolikosti i promjene staništa su primjeri utjecaja na okoliš. Utjecaji na okoliš konvencionalnih elektrana ili motora s izgaranjem su obično najveći prilikom proizvodnje goriva i kod izgaranja. Konstrukcija postrojenja i potrebna infrastruktura obično su za red veličine manje ekološki važni od pretvorbe energije zbog visoke propusnosti i dugog vijeka trajanja sustava. Korisno je istražiti buduće energetske sustave, kao što je PEMFC, u ranoj fazi razvoja tržišta. To je povezano s metodološkim problemom predviđanja tehnološkog (npr. buduća potrošnja energije za određene faze proizvodnje) i društvenog razvoja [14].

### **6.1. Proizvodnja materijala za vozilo i sastavljanje vozila**

Proces proizvodnje sastoji se od sljedećih odvojenih faza: proizvodnja elektrode za difuziju plina (GDE) uključujući primjenu katalizatora; proizvodnja membrane; spajanje GDE i membrane; izrada bipolarne ploče; sastavljanje stoga; naknadno ispitivanje. Za svaki od ovih koraka određeni su potrebni ulazi, uključujući materijale, pomoćne tvari i električna energija, kao i izravne emisije tijekom proizvodnje. Svi utjecaji okoliša prikazani su u tablici 3. Iz tablice je vidljivo da stacionarni stogovi u slučaju ne recikliranja metala imaju najviše neobnovljive energije te najviše emisija dok su mobilni stogovi s recikliranjem metala platinaste grupe ekološki najčišći.

	Mobilni stog		Stacionarni stog	
Recikliranje metala iz platinaste grupe	Nema	75%	Nema	90%
Neobnovljiva primarna energija(MJ/kW)	940	744	5100	1446
Globalne emisije (kg = kW)				
<b>CO<sub>2</sub></b>	57	40	275	78
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,1	0,1	0,5	0,2
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0,005	0,005	0,019	0,014
Lokalne emisije (kg = kW)				
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,17	0,1	0,73	0,17
<b>CO</b>	0,02	0,02	0,014	0,01
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,17	0,07	0,74	0,14
<b>NMHC</b>	0,02	0,02	0,09	0,04
Prašina i čestice	0,03	0,01	0,14	0,03
<b>NH<sub>3</sub></b>	1,4 <sup>-3</sup>	1,4 <sup>-3</sup>	2,5 <sup>-3</sup>	2 <sup>-3</sup>
benzol	2,7 <sup>-5</sup>	2,7 <sup>-5</sup>	4,3 <sup>-5</sup>	3,6 <sup>-5</sup>

Tablica 3. Utjecaji stogova gorivnih članaka na okoliš [14].

## 6.2. Proizvodnja sirovina

Vodik i benzin predstavljaju konačni proizvod nekolicine modernih tehnologija. Konvencionalne metode proizvodnje su reformiranje prirodnog plina (vodik) i destilacija

sirove nafte (benzin). Primjena ekološki prihvatljivih obnovljivih tehnologija smatra se atraktivnom za generiranje vodika [14].

### 6.3. Distribucija sirovina

Prirodni plin i sirova nafta prevoze se cjevovodima. Toplina izgaranja koja se pretvara u plinskoj turbini u mehaničku energiju može se koristiti za komprimiranje plina za transport duž cjevovoda. Potrošnja energije prirodnog plina dobivena je formulom za izotermnu kompresiju. Emisije iz izgaranja prirodnog plina dane su u tablici 4. [14].

Onečišćivalo	Emisije g/g(prirodnog plina)
$CO_2$	2,69
$CO$	$1,88^{-3}$
$CH_4$	$5,15^{-5}$
$N_2O$	$4,93^{-5}$
$NO_x$	$2,24^{-5}$
$SO_2$	$1,34^{-5}$
Hlapivi organski spojevi	$12,3^{-5}$
Čestice	$17,05^{-5}$

Tablica 4. Emisije iz izgaranja prirodnog plina [14].

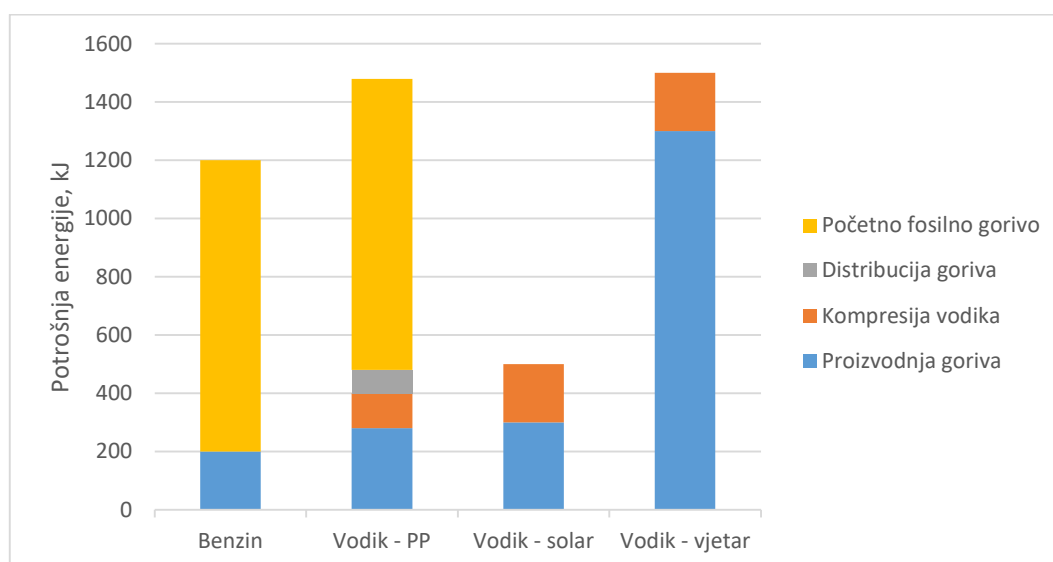
### 6.4. Proizvodnja goriva

Sirova nafte i prirodni plin glavni su energenti koji se koriste u tim procesima. Proizvodnja benzina iz sirove nafte učinkovitija je od proizvodnje vodika iz prirodnog plina. Slika 9 prikazuje potrošnju fosilnih goriva za proizvodnju 1MJ benzina i 1MJ vodika primjenom različitih tehnologija. Korištenje obnovljivih tehnologija za proizvodnju vodika karakterizira nepostojanje izravne uporabe fosilnih goriva. Proizvodnja vodika putem vjetroelektrane i elektrolize ima najnižu indirektnu potrošnju fosilnih goriva. Fotonaponski sustav ima najveću energiju fosilnih goriva utjelovljenih u materijalima i opremi.

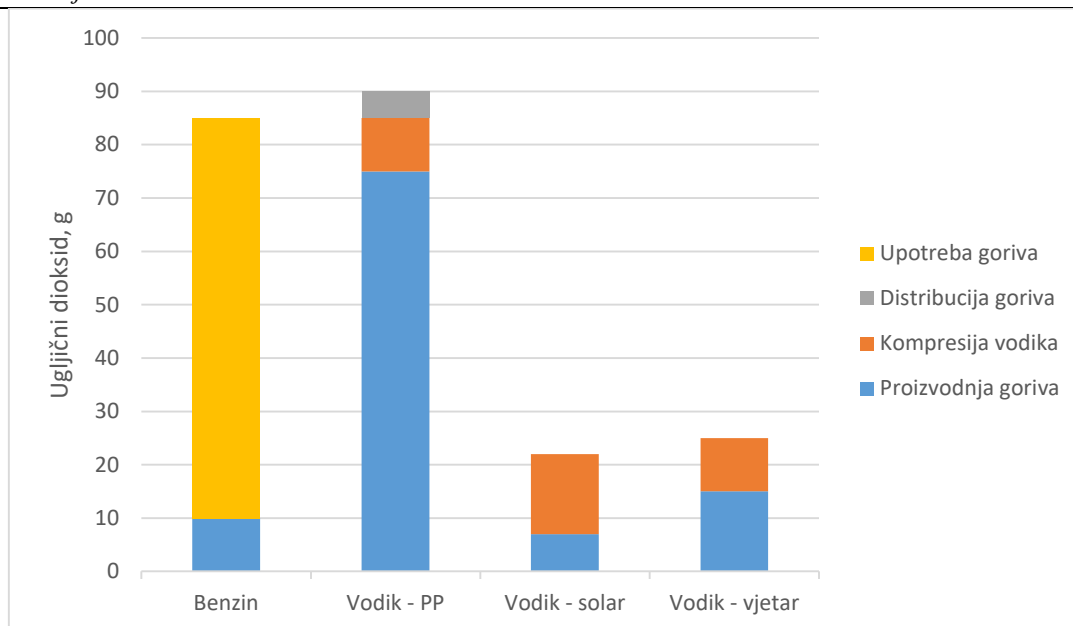
Tablica 6 prikazuje emisije stakleničkih plinova za životne cikluse goriva, od proizvodnje do korištenja u vozilima. Budući da je upotreba 1 MJ benzina popraćena smanjenjem od 71,7 g  $CO_2$ , iz dijagrama se vidi da benzin i vodik iz prirodnog plina proizvode gotovo jednake



emisije stakleničkih plinova. Proizvodnja vodika korištenjem vjetra i solarne energije znatno smanjuje emisije stakleničkih plinova. Računajući za veću učinkovitost PEMFC motora, emisije stakleničkih plinova mogu se smanjiti za 40% kada se vodik dobiva iz prirodnog plina do 86% kada se vodik dobiva iz obnovljive energije vjetra. Procjena životnog ciklusa korištena je za uspoređivanje PEMFC vozila s vodikom i tradicionalnih vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem koji koristi benzin. Korištenje vjetroelektrane za proizvodnju vodika elektrolizom te njenu primjena na PEMFC vozilu karakterizira najniža emisija stakleničkih plinova i potrošnja fosilnih goriva. Ipak, ekonomski gledano, vjetroelektrane značajno ovise o omjeru troška za vodik i prirodni plin. Po omjeru 2:1 za trošak vodika naprema trošku za prirodni plin, ulaganja su oko pet puta niža za proizvodnju vodika preko prirodnog plina nego za proizvodnju vodika putem vjetroenergije. Fotonaponski sustav danas je vrlo skup i zahtijeva najbolju tehnologiju za povećanje stupnja konverzije [14].



**Slika 9. Potrošnja fosilnih goriva za proizvodnju 1MJ benzina i 1MJ vodika primjenom različitih tehnologija [14].**



**Slika 10. Emisije stakleničkih plinova za životne cikluse goriva[14].**

## 6.5. Transport goriva

Transport komprimiranog vodika nakon proizvodnje reformiranjem prirodnog plina sličan je onom za tekuće benzine, no komprimirani vodik karakterizira niži volumetrijski kapacitet energije i veći zahtjevi materijala za spremnik vodika. Transport vodika zamijenjen je distribucijom električne energije u slučajevima korištenja energije vjetra i sunca. Komprimirani vodik distribuira se na benzinske postaje u kamionima koji koriste dizel gorivo. Troškovi distribucije se pridodaju u izračun ukupne cijene proizvodnje vodika [14].

## 6.6. Korištenje goriva

Moguće je usporediti rezultate proizvodnje LCA stogova s utjecajima na okoliš tijekom korištenja goriva, tj. korištenja vozila s gorivnim člancima. U tu svrhu je Martin Pehnt pretpostavio da automobil s gorivnim člankom radi s vodikom ili metanolom kao gorivom, a kasnije s ugrađenim reformatorom. Opisao je reformiranje prirodnog plina za proizvodnju vodika i kombinirano reformiranje prirodnog plina za proizvodnju metanola. U istraživanju su izračunate emisije tijekom životnog vijeka uporabe (uz pretpostavku 160 000 km životnog vijeka) osobnih automobila na gorivne članke (uključujući proizvodnju i transport goriva i emisije automobila), tablica 5. Za usporedbu, emisije stakleničkih plinova za buduća vozila s

benzinskim motorom s unutarnjim izgaranjem s optimiziranom tehnologijom prikazane su u tablici 6. To vozilo ima istu osnovnu masu i potrošnju benzina od 1,62 MJ / km koristeći iste parametre vozila kao za vozilo s gorivnim člancima. Proizvodnja stoga gorivnih članaka dovodi do emisija globalnog zagrijavanja od 8% do 10% emisija koje emitira korištenje vozila (vožnje 160.000 km) za vodik i metanol iz prirodnog plina, te 40% emisije zakiseljavanja [14].

Vozilo s gorivnim člancima (750kg)	Vodik iz prirodnog plina	Metanol iz prirodnog plina
Neobnovljiva primarna energija(MJ/km)	1,8	2,32
Globalne emisije (mg/km)		
<b>CO<sub>2</sub></b>	97585	119430
<b>CH<sub>4</sub></b>	239	165
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0,29	0,42
Lokalne emisije (mg/km)		
<b>SO<sub>2</sub></b>	34	72
<b>CO</b>	32	33
<b>NO<sub>x</sub></b>	63	94
<b>NMHC</b>	73	79
Prašina i čestice	4	8
<b>NH<sub>3</sub></b>	9 <sup>-3</sup>	3,5 <sup>-2</sup>
benzol	2,6 <sup>-2</sup>	8,2 <sup>-2</sup>
benzopiren	7,6 <sup>-5</sup>	7,7 <sup>-5</sup>

**Tablica 5. Rezultati LCA za vozila s gorivnim člancima tijekom vožnje od 1 km s vodikom i metanolom kao gorivom [14].**

Kategorija utjecaja	Vodik	Metanol	Motor s unutarnjim izgaranjem
Primarna energija, MJ	270,000	348,000	289,350
Ekvivalent globalnog zatopljenja ( $CO_2$ ekvivalent), kg	18,349	18,440	20,275
Zakiseljavanje ( $SO_2$ ekvivalent), kg	12	21	30

**Tablica 6. LCA tijekom korištenja vodika i metanola u vozilima s gorivnim člancima i vozilima s motorom s unutarnjim izgaranjem[14].**

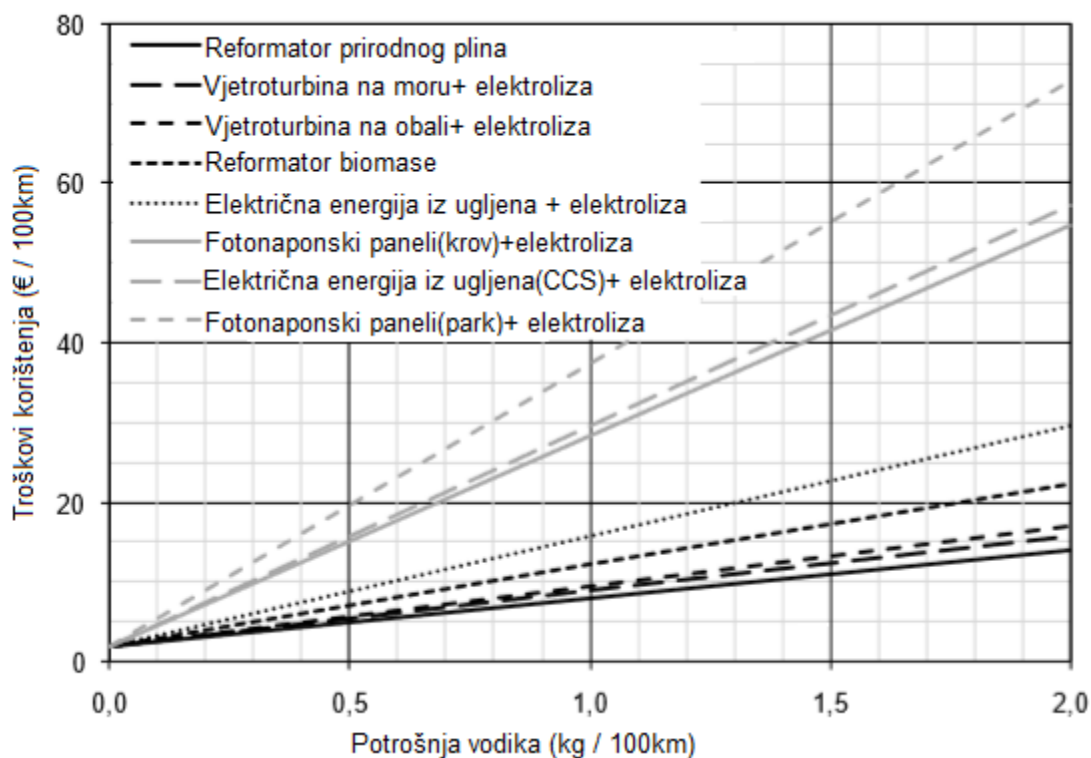
### 6.7. Zaključno o usporedbi procjene utjecaja životnog vijeka na okoliš

Izračun pokazuje da proizvodnja stogova gorivnih članaka dovodi do većeg utjecaja na okoliš u usporedbi s korištenjem stogova u vozilu gdje su utjecaji na okoliš neznatni. Ti utjecaji većinom su uzrokovani materijalima koji se upotrebljavaju kao katalizator te materijalima i energijom za ploče polja strujanja. Recikliranje tih materijala može biti značajan ekonomski uvjet za buduće stogove. Energetske učinkovitosti i emisije stakleničkih plinova analizirane su iz različitih metoda proizvodnje vodika: reformiranje prirodnog plina, vjetroelektrana i solarna energija, proizvodnja vodika kroz elektrolizu vode. Ekonomska atraktivnost tehnologije obnovljivih izvora energije značajno utječe na omjer troškova vodika i prirodnog plina. Budući da su potvrđeni svi ostali korisni aspekti zaštite okoliša povezani s gorivnim člancima, daljnja poboljšanja potrebna su u postupcima proizvodnje vodika.

### 6.8. Troškovi životnog vijeka vozila s gorivnim člancima

Vozila s gorivnim člancima su električna vozila koja koriste gorivni članak kao električni generator na vozilu. Za posljedicu, trošak ulaganja u pogon takvih vozila ne sastoji se samo od spremnika vodika i sustava gorivnih članaka već i električnih motora te mogućih baterija ili super kondenzatora. Danas gotovo svako vozilo s gorivnim člancima koje ima za svrhu prijevoz putnika pogonjeno je PEM gorivnim člancima koje rade na relativno niskim temperaturama ( $<100^\circ C$ ). Sustav gorivnih članaka može biti proizveden za oko 70€/kW. U ovom primjeru ukupni troškovi pogonskog sustava su oko 12.500€ (156€/kW) i uključuju električni pogon (50€/kW) te spremnik komprimiranog vodika na 700 bara (kapacitet 5,5kg, 20€/kWh). Pogonski sustav može jednostavno biti konfiguriran u hibridni raspored s

baterijama ili super kondenzatorima te potencijalno smanjiti troškove zadržavanjem performansi vozila. Troškovi korištenja predstavljaju drugi dio ukupnog iznosa vrijednosti vozila te prvenstveno uključuju troškove vodika i troškove održavanja. Ako vozilo koristi 1kg/100km, tada troškovi variraju od 8€/100km za vodik dobiven iz prirodnog plina do 38€/100km za vodik proizveden električnom energijom dobivenom iz fotonaponskih ćelija. Troškovi servisiranja su procijenjeni na oko 0,02 €/km, slika 11.[18].



Slika 11. Troškovi korištenja vozila s gorivnim člancima koji koriste vodik obzirom da način dobivanja vodika [18].

## 7. Prednosti i prepreke za korištenje gorivnih članaka

### 7.1. Prednosti

- Efikasnost – pretvaraju vodik i kisik direktno u elektricitet i vodu bez sagorijevanja tijekom procesa, a rezultirajuća efikasnost je 50-60% što je oko 2 puta više od motora s unutarnjim izgaranjem
- Čistoća – ako je vodik gorivo tada nema emisija onečišćujućih tvari iz samog gorivog članka već samo čista voda. U usporedbi s motorom s unutarnjim izgaranjem, gorivni članci ne proizvode emisije sumporovog dioksida koji uzrokuje kisele kiše, niti dušičnih dioksida koji proizvode smog ili prašinu
- Tišina – sami gorivni članci ne sadržavaju nikakve pokretne dijelove, ali mogu koristiti pumpe i ventilatore, a kao rezultat električna energija se proizvodi relativno tiho.
- Modularnost – gorivni članci različitih veličina mogu biti međusobno spojeni kako bi osigurali potrebnu količinu energije
- Ekološka sigurnost – ne proizvode nikakve opasne otpadne tvari te je jedini nusproizvod čista voda (ili voda i ugljični dioksid u slučaju korištenja etanola) [1].

### 7.2. Prepreke za korištenje gorivnih članaka

- Prihvatanje masovnog tržišta – kako bi gorivni članci bili korišteni moraju biti prihvaćeni na masovnom tržištu, a prihvatljivost u velikoj mjeri ovisi o cijeni, pouzdanosti, dugovječnosti gorivnih članaka te dostupnosti i cijeni goriva. U usporedbi s cijenom današnjih alternativa npr. baterijama, gorivni članci su relativno skupi. Kako bi bili konkurentni gorivni članci moraju biti masovno proizvedeni s razvijenim jeftinijim materijalima.
- Infrastruktura – trenutne infrastrukture za vodik ili metanol skoro da i nema. Ako gorivo nije moguće nabaviti povoljno i priuštivo, masovno tržište se ne može razvijati
- Investicije – najveći broj investicija u gorivne članke i tehnologiju vodika dolazi od proizvođača automobila, međutim ako se dokaže da gorivni članci nisu prikladni za

---

korištenje u automobilima biti će potreban novi izvor investicija kako bi se nastavilo razvijanje tehnologija

- Platina – trenutno je platina ključ gorivnih članaka odnosno najvažniji korišteni materijal no platina je rijedak prirodni resurs te samim time znatno povećava cijenu. Najveće zalihe platine se nalaze u Južnoj Africi, Rusiji te Kanadi [1].

## 8. ZAKLJUČAK

Stalnim povećanjem potražnje za električnom energijom postaje sve važnije pronaći novi način za odgovornim i sigurnim zadovoljavanjem potreba. Najveći problem korištenja obnovljivih izvora energije bilo je spremanje i transport energije što se korištenjem gorivnih članaka može obaviti te tako pohranjena energija dostaviti gdje god i kad god je potrebno na čist i efikasan način.

Gorivni članci su obećavajuća alternativa trenutnim automobilskim gorivima. Kombiniraju gustoću energije i prednost tekućih goriva sa čistim i učinkovitim radom električnih goriva. Mnogi hoteli i odmarališta mogu koristiti gorivne članke umjesto generatora s dizelskim motorom za glavno ili rezervno napajanje u slučaju nestanka struje.

Tehnički problemi mogu biti riješeni provedbom dodatnih istraživanja i razvojem. Proizvođači već smanjuju količinske potrebe za platinom, te razvijaju jeftinije, pouzdanije i kompaktnije sustave, a jednom kada se prevladaju tehničke prepreke, komercijalizacija će biti raspostranjenija, što će pomoći smanjenju cijena.



## LITERATURA

- [1] Brian, C.: An introduction to fuel cells and hydrogen technology, s Interneta, [https://www.ogniwapaliwowe.info/download/introduction\\_to\\_fuel\\_cells\\_and\\_hydrogen\\_technology.pdf](https://www.ogniwapaliwowe.info/download/introduction_to_fuel_cells_and_hydrogen_technology.pdf), 17.svibnja 2018.
- [2] Karim, N. i Jonathan, S.: How Fuel Cells Work: Polymer Exchange Membrane Fuel Cells, s Interneta, <https://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/alternative-fuels/fuel-cell2.htm>, 17.svibnja 2018.
- [3] fuelcelltoday.com, About fuel cells-History, s Interneta, <http://www.fuelcelltoday.com/history> 17.svibnja 2018.
- [4] Lee, J. S.; Polymer electrolyte membranes for fuel cells, s Interneta, <https://www.cheric.org/PDF/JIEC/IE12/IE12-2-0175.pdf>, 17.svibnja 2018.
- [5] Wei Y.; A novel membrane for DMFC – Na<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>7</sub> Nanotubes/Nafion® composite membrane, 24.svibnja 2018.
- [6] Alkaline fuel cell, Wikipedia, s Interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline\\_fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline_fuel_cell), 24.svibnja 2018.
- [7] fuelcellstock.com, Phosphoric acid fuel cells, <http://www.fuelcellstock.com/cell-types/pafc>, 24.svibnja 2018.
- [8] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, United States Department of Energy: Types of Fuel Cells, s Interneta, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells#molten>, 24.svibnja 2018.
- [9] What Types of Fuel Cells are There?, s Interneta, <http://www.chfca.ca/education-centre/how-fuel-cells-work/>, 28. svibnja 2018.
- [10] Dolf G. I Giorgio S.: Prospects for hydrogen and fuel cells, s Interneta, <https://web.archive.org/web/20080307082839/http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/hydrogen2005.pdf>, 15. lipnja 2018.
- [11] C. W. Forsberg: Assessment of Nuclear-Hydrogen Synergies with Renewable Energy Systems and Coal Liquefaction Processes, s Interneta, <https://web.archive.org/web/20081206092054/http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rt/125102.pdf>, 23. lipnja 2018.

- [12] Melaina M.W., Antonia O. i Penev M.: Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, s Interneta, <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>, 23. lipnja 2018.
- [13] Gorivi članak, Wikipedia, s Interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Gorivi\\_članak](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gorivi_članak), 24. lipnja 2018.
- [14] S. R. Dhanushkodi, N. Mahinpey, A. Srinivasan and M. Wilson: Life Cycle Analysis of Fuel Cell Technology , s Interneta, [https://www.researchgate.net/publication/233823627\\_Life\\_Cycle\\_Analysis\\_of\\_Fuel\\_Cell\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/233823627_Life_Cycle_Analysis_of_Fuel_Cell_Technology), 4. srpnja 2018.
- [15] Gorive ćelije, project-rec.eu, s Interneta, <http://project-rec.eu/obnovljivi-izvori-energije/gorive-celije>, 5. svibnja 2018.
- [16] EnergyGroove.net: Fuel Cells - EnergyGroove.net, s Interneta, <http://www.energygroove.net/technologies/fuel-cells>, 17. svibnja 2018.
- [17] Motoo, S. i Watanabe, M.: Electrolysis by Ad-Atoms Part II. Enhancement of the Oxidation of Methanol on Platinum by Ruthenium Ad-Atoms, 1927
- [18] Bruno G.: Comparative Life-Cycle Cost Analysis of Hydrogen Fuel Cell Vehicles, s Interneta, [https://www.researchgate.net/profile/Bruno\\_Gnoerich/publication/48693615\\_Comparative\\_Life-Cycle\\_Cost\\_Analysis\\_of\\_Hydrogen\\_Fuel\\_Cell\\_Vehicles/links/5643918f08ae9f9c13e05149/Comparative-Life-Cycle-Cost-Analysis-of-Hydrogen-Fuel-Cell-Vehicles.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bruno_Gnoerich/publication/48693615_Comparative_Life-Cycle_Cost_Analysis_of_Hydrogen_Fuel_Cell_Vehicles/links/5643918f08ae9f9c13e05149/Comparative-Life-Cycle-Cost-Analysis-of-Hydrogen-Fuel-Cell-Vehicles.pdf), 26. kolovoza 2018.