

GIMNAZIJA  
JOŽETA  
PLEČNIKA  
LJUBLJANA

SEMINARSKA NALOGA

# **SODOBNI VIRI ENERGIJE – TOPLOTNE ČRPALKE IN GORIVNE CELICE**

**Mentorici:**

**Helena KREGAR, prof.kemije**

**mag. Darja SILAN, prof.biologije**

**Avtor: Leon Noe JOVAN**

**Ljubljana, marec 2007**

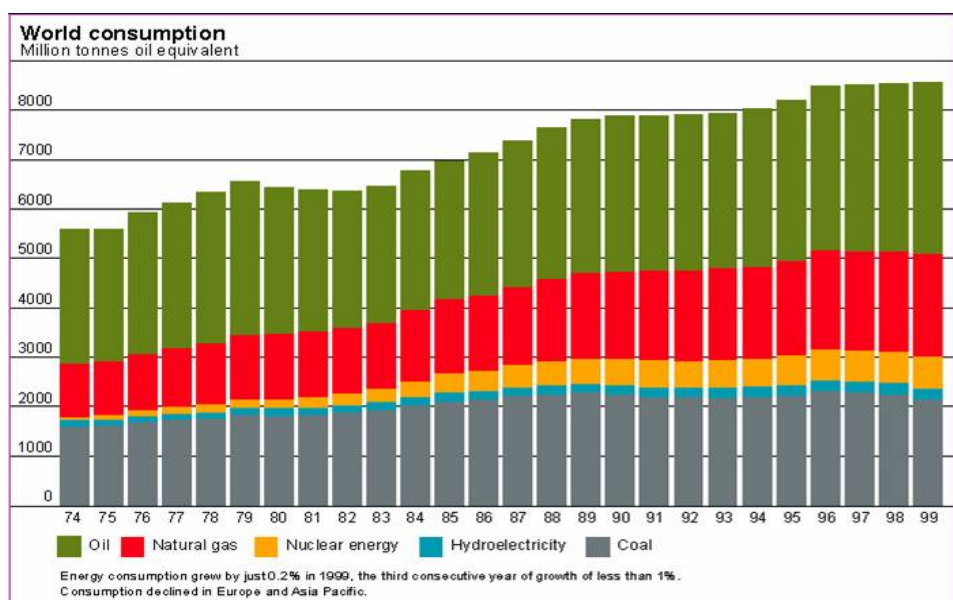
## KAZALO

1	Pomen energije v sodobnem svetu .....	3
1.1	Evropska energetska politika .....	5
1.2	Potrebni ukrepi .....	6
2	Toplotne črpalke .....	9
2.1	Uvod .....	9
2.2	Kaj je toplotna črpalka .....	9
2.3	Princip delovanja toplotne črpalke .....	10
2.4	Vrste toplotnih črpalk, prednosti in slabosti .....	11
2.4.1	Toplotna črpalka z vrtino .....	11
2.4.2	Toplotna črpalka z zemeljskimi kolektorji .....	12
2.4.3	Toplotna črpalka z jezerskimi kolektorji .....	13
2.4.4	Zračna toplotna črpalka .....	14
2.4.5	Zračna toplotna črpalka na zrak iz ventilacijskega sistema .....	14
2.4.6	Toplotna črpalka zrak - voda .....	15
2.4.7	Toplotna črpalka zrak - voda – kombinirana z obstoječim ogrevalnim sistemom .....	15
3	Gorivne celice .....	16
3.1	Zgodovina razvoja gorivnih celic .....	17
3.2	Princip delovanja gorivne celice .....	19
3.3	Vrste gorivnih celic .....	20
3.3.1	PEM gorivne celice .....	21
3.3.2	Bazične gorivne celice .....	22
3.3.3	PAFC gorivne celice .....	23
3.3.4	MCGC gorivne celice .....	23
3.3.5	SOFC gorivne celice .....	24
3.4	Lastnosti sestavnih delov gorivnih celic: .....	25
3.4.1	Elektrode .....	25
3.4.2	Katalizator .....	25
3.4.3	Elektrolit .....	25
3.4.4	Goriva in oksidanti .....	25
3.5	Prednosti gorivnih celic .....	26
3.6	Slabosti gorivnih celic .....	26
3.7	Uporaba gorivnih celic .....	26
3.7.1	Stacionarni sistemi .....	26
3.7.2	Gorivne celice v transportu .....	27
3.7.3	Vojaške aplikacije .....	30
3.7.4	Široko-namenska uporaba gorivnih celic .....	31
3.8	Pridobivanje električne energije na čist način .....	33
4	Viri in literatura .....	33

## 1 Pomen energije v sodobnem svetu

Danes (po podatkih iz leta 2002) premog, nafta in naravni plin predstavljajo 80% svetovne proizvodnje primarne energije. Ocenjena skupna poraba energije na svetu v vseh oblikah je približno 7.000 milijonov ton nafte (Mtoe) letno, kar povzroči približno 24 000 milijonov ton emisij CO<sub>2</sub>.

Če upoštevamo, da obsega svetovna populacija približno 6,195 milijard ljudi, nam izračuni pokažejo letno povprečje porabljenega nafte, tj. 1,13 tone na prebivalca oziroma 3.87 ton emisij CO<sub>2</sub> na prebivalca [1]. Ta številka vključuje vso porabljeno energijo v industriji, gospodinjstvih, trgovini itd. Vključuje tudi velike količine porabljenega lesa in drugih bioloških goriv, večinoma v državah v razvoju. Številke so seveda povprečne in ne prikazujejo občutnih razlik, ki obstajajo med regijami.



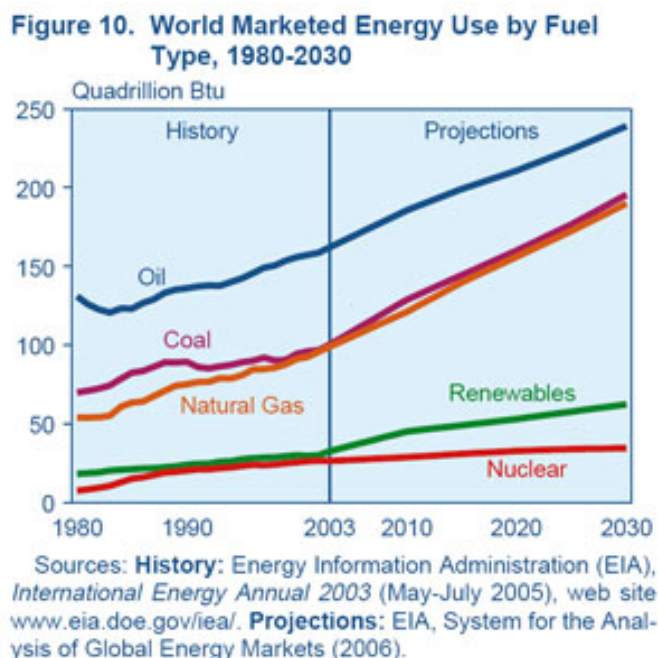
Slika 1. Struktura in obseg porabe energentov v svetu

Goriva, ki so porabljena na osebo v razvitem svetu, so približno sedemkrat višja kot na osebo v državah v razvoju. Čeprav v razvitih državah živi le tretjina svetovne populacije, le-te porabijo dvakrat več goriv kot države v razvoju. Več kot polovico porabe energije in izpustov CO<sub>2</sub> povzročijo razvite države iz OECD.



Slika 2. Poraba električne energije v sodobnem mestu

Kljub temu, da države v razvoju bistveno zaostajajo za razvitimi v rabi energije, njihova poraba energije ni zanemarljiva. Poraba energije v Aziji (vključno s Kitajsko) in v Afriki se je od začetka 70-ih pa do danes približno potrojila. Razsežnost energetskega problema, ki ga bodo čutile prihodnje generacije, tako postaja še večja.



Slika 3. Projekcija porabe energentov v svetu

## **1.1 Evropska energetska politika**

Evropa je vstopila v novo energetsko obdobje. Ugotovitve v [1] so sledeče:

- Nujno so potrebna vlaganja. V naslednjih 20 letih bo treba samo v Evropi nameniti okoli tisoč milijard evrov sredstev za pokritje pričakovanega povpraševanja po energiji in zamenjavo zastarele infrastrukture.
- Naša odvisnost od uvoza narašča. Unija danes 50 % potreb po energiji pokrije z uvozom. Če ne bomo povečali konkurenčnosti domačih virov energije, bo ta delež v naslednjih 20 do 30 letih narasel na 70 % – del tega bo uvožen iz regij, ki jim grozi negotovost.
- Zaloge so zgoščene v nekaj državah. Danes približno polovica plina, porabljenega v EU, prihaja iz samo treh držav (Rusije, Norveške in Alžirije). Glede na sedanje trende bi se odvisnost od uvoza plina v naslednjih 25 letih povečala na 80 %.
- Svetovno povpraševanje po energiji se povečuje. Pričakuje se, da se bodo do leta 2030 svetovno povpraševanje po energiji in emisije CO<sub>2</sub> povečali za približno 60 %. Svetovna poraba nafte se je od leta 1994 povečala za 20 %, svetovno povpraševanje po nafti pa bo predvidoma naraščalo po stopnji 1,6 % letno.
- Cene nafte in plina naraščajo. V EU so se v zadnjih dveh letih skoraj podvojile in sledijo jim tudi cene električne energije. To predstavlja težavo za porabnike. Glede na naraščajoče svetovno povpraševanje po fosilnih gorivih, preobremenjene dobavne verige in naraščajočo odvisnost od uvoza se visoke cene nafte in plina po vsej verjetnosti ne bodo znižale. Vendar lahko spodbudijo večjo energetske učinkovitost in inovativnost.
- Podnebje se vse bolj segreva. Po podatkih Medvladnega foruma o podnebnih spremembah (IPCC) se je zaradi emisij toplogrednih plinov Zemlja že segrela za 0,6 stopinj. Če ne bomo ukrepali, se bo temperatura do konca tega stoletja povečala od 1,4 do 5,8 stopinj. Vse svetovne regije, vključno z EU, se bodo soočile z resnimi posledicami za svoja gospodarstva in ekosisteme.
- Evropa še ni razvila notranjih trgov z energijo, ki bi bili v celoti konkurenčni. Šele ko bodo takšni trgi obstajali, bodo državljani in podjetja v EU uživali vse koristi varnosti oskrbe in nižjih cen. Da se doseže ta cilj, je treba razviti medsebojne povezave, vzpostaviti učinkovite zakonodajne in ureditvene okvire in jih v celoti uporabljati v praksi ter dosledno izvajati pravila Skupnosti o konkurenci. Poleg tega bi moralo biti

utrjevanje energetskega sektorja tržno pogojeno, če naj se Evropa uspešno odzove na številne izzive, s katerimi se sooča, in ustrezno vlaga v prihodnost.



*Slika 4. Onesnaževanje okolja*



*Slika 5. Obstoječa termoelektrarna*

## **1.2 Potrebni ukrepi**

To je nova energetska podoba 21. stoletja. Zanj je značilno, da so svetovne gospodarske regije pri zagotavljanju varnosti oskrbe z energijo in stabilnih gospodarskih razmer ter pri zagotavljanju učinkovitih ukrepov proti podnebnim spremembam odvisne druga od druge. Učinke te podobe neposredno občutimo vsi. Dostop do energije je temeljnega pomena v vsakodnevnem življenju vsakega Evropejca. Višje cene, grožnje varnosti oskrbe z energijo

in sprememb evropskega podnebja vplivajo na naše državljane. Trajnostna, konkurenčna in varna energije je eden od temeljev našega vsakdanjega življenja.

Ta nova podoba zahteva skupen evropski odziv. Oktobra in decembra 2005 so to ugotovili tudi voditelji držav in vlad na srečanjih na vrhu in pozvali Komisijo, naj nadaljuje s pobudami. Nedavni dogodki so potrdili, da se je treba odzvati na ta izziv. Pristop, ki bi temeljil samo na 25 posameznih energetske politikah, ni dovolj.

EU razpolaga s sredstvi, ki bi lahko pomagala. Z več kot 450 milijoni porabnikov predstavlja drugi največji energetski trg na svetu. Če deluje skupaj, je dovolj močna, da zaščiti in uveljavi svoje interese. EU ni samo dovolj velika, ampak ima tudi politična sredstva, potrebna za soočenje s to novo energetske podobo. EU je vodilna na svetu na področju upravljanja povpraševanja, spodbujanja novih in obnovljivih oblik energije ter razvoja tehnologij na osnovi nizke vsebnosti ogljika. Če bo EU podprla novo skupno politiko s skupnim stališčem do energetske vprašanj, lahko Evropa vodi svetovno iskanje rešitev energetske vprašanj.

Če želimo omejiti bližajoči se dvig globalnih temperatur na dogovorjeno raven, ki je največ 2 stopinji nad predindustrijskimi vrednostmi, bi morale globalne emisije toplogrednih plinov doseči najvišjo vrednost najkasneje do leta 2025, nato pa bi se morale glede na ravni iz leta 1990 zmanjšati za najmanj 15 %, ali pa celo za 50 %. Zaradi tega ogromnega izziva mora Evropa takoj ukrepati, še posebej na področju energetske učinkovitosti in obnovljivih virov energije.



Dve perspektivni tehnologiji, ki omogočata izrabo obnovljivih virov energije, učinkovito proizvodnjo toplotne ali električne energije, zmanjšujeta emisijo toplogrednih plinov in s tem prispevata k boljšemu ozračju, sta:

- toplotne črpalke
- gorivne celice.



*Slika 6. Sončna elektrarna - alternativni vir energije*



*Slika 7. Vetrna elektrarna - alternativni vir energije*



## **2 Toplotne črpalke**

### **2.1 Uvod**

Bliskovit razvoj toplotnih črpalk sega 30 let nazaj, v dobo velike naftne krize, kjer so mnogi proizvajalci iskali rešitve za zamenjavo fosilnih goriv v drugih virih. Eden od odgovorov je bil uporaba odpadne toplote oziroma toplote okolice. Takratne tehnične rešitve in izvedbe toplotnih črpalk niso dale pričakovanih rezultatov glede izkoristka ter so bile z končanjem naftne krize dejansko za daljšo dobo pozabljene. S povečanjem ekološke zavesti pri potrošnikih ter naraščanjem cen energije, postajajo toplotne črpalke kot energetsko učinkovit in okolju prijazen sistem za ogrevanje in pripravo tople vode, ponovno vse zanimivejše. Z razvojem novih tehnologij, izboljšanjem izkoristka delovanja, zmanjšanjem dimenzij in mase, se uporaba toplotnih črpalk ponovno vrača. Toplotne črpalke nove generacije so znižale mejo delovanja do najnižjih temperatur zunanega zraka celo do  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Leta 1978 je bilo razmerje vložene električne energije in pridobljene toplotne energije 1 : 2, danes pa znaša 1 : 5 in pri določenih izvedbah celo več.

Predvideva se, da bodo toplotne črpalke v bodočnosti predstavljale osnovne ogrevalne naprave na nizkotemperaturnih sistemih. Najnovejši izračuni in meritve na številnih izvedbah toplotni črpalk so pokazali, da toplotne črpalke porabijo med 34 in 49 % manj primarne energije kot plinski in oljni kondenzacijski kotli. Prav tako se z uporabo toplotnih črpalk zelo zmanjša emisija  $\text{CO}_2$  in drugih škodljivih plinov, v primerjavi s plinskimi in oljnimi kondenzacijskimi kotli. To zmanjšanje znaša med 31 in 60 %.

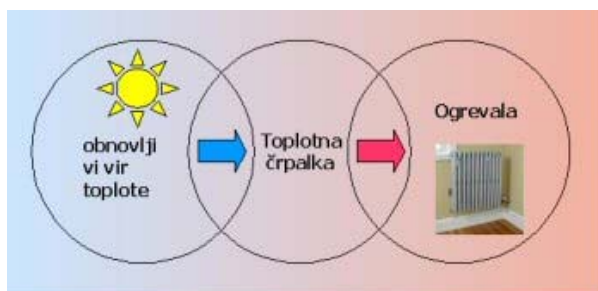
### **2.2 Kaj je toplotna črpalka**

Toplotne črpalke so naprave, ki izrabljajo toploto iz okolja in jo pretvarjajo v uporabno toploto za segrevanje zgradb in pripravo tople sanitarne vode. Ogrevanje s toplotno črpalko imenujemo tudi alternativno ogrevanje, saj spada pod alternativne vire energije, ravno tako kot sonce, veter, biomasa, itd, v nasprotju s fosilnimi gorivi, ki so eden glavnih virov onesnaženja na našem planetu.

Toplotne črpalke so namenjene ogrevanju prostorov ter pripravi tople sanitarne vode, za kar pa potrebujejo vir toplote. Pri ogrevalnih sistemih s toplotnimi črpalkami imamo tri med seboj povezane sklope:

- vir toplote
- toplotna črpalka
- ogrevala.

Vsi trije sklopi morajo biti med seboj pravilno usklajeni, ker bomo le tako dobili učinkovit sistem, ki bo nudil uporabniku ugodje in nizke stroške obratovanja.

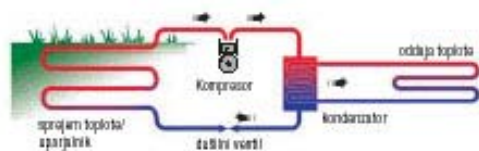


Slika 8. Povezava sklopov

### **2.3 Princip delovanja toplotne črpalke**

Fizikalno načelo delovanja toplotne črpalke je, da prenaša toplotno energijo iz nižjega temperaturnega potenciala na višjega ali obratno. Primer hladilnika: ta odjema toploto iz notranjosti hladilnika in jo prenaša na okolico. (hladi notranjost, segreva zunanost). Toplotna črpalka predstavlja v principu obrnjen hladilnik.

Toplotna črpalka za delovanje potrebuje medij. Medij imenujemo tudi hladivo. Hladiva so snovi ki se uparjajo pri nižji temperaturi. Pri višjih temperaturah in tlakih pa kondenzirajo in ob tem oddajajo kondenzacijsko toploto. Okolico predstavljajo mediji, ki jim odvezemamo toploto (zrak, podtalna ali površinska voda in drugi viri), uporabni medij pa je tisti, kateremu dovajamo toploto (sanitarna voda, voda za ogrevanje, zrak).



*Slika 9. Segrevanje in hlajenje medija  
pri toplotni črpalki*

Toplotna črpalka izkorišča pojav, da se tekočine pri višjem tlaku uparijo pri višji temperaturi kot pa je temperatura uparjanja pri nižjem tlaku. Kompresor stiska pare prenosnega medija. Zaradi zvišanega tlaka se medij v kondenzatorju utekočinja in pri tem oddaja koristno toploto. Tekoč medij se skozi dušilni ventil, kjer se tlak zopet zniža (ekspanzija) pomika proti drugemu koncu zaprtega kroga, kjer se v uparjalniku medij upari in za to črpa toploto iz svoje okolice.

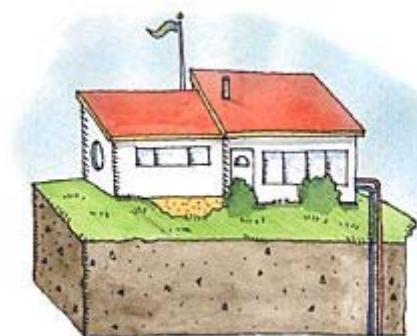
Bistveno je to, da nam sistem toplotne črpalke vrne več toplotne energije, kot smo vložili v delo kompresorja. Razmerje med pridobljeno toplotno energijo  $Q_0$  na kondenzatorju in vložnim delom  $A_K$  na kompresorju imenujemo grelno število ( $e = Q_0 / A_K$ ). Sodobne toplotne črpalke dosegajo grelno število 5 [2].

## **2.4 Vrste toplotnih črpalk, prednosti in slabosti**

### **2.4.1 Toplotna črpalka z vrtino**

Temperatura zemlje se med letom le rahlo spreminja. Izvrtamo eno ali več vrtin, običajno v globino med 70 do 150 metrov, odvisno od geoloških in klimatskih pogojev. Kolektorsko cev vstavimo v izvrtino, ki jo zalije voda iz podtalnice. Toplotna črpalka z vrtino zmanjša porabo energije za ogrevanje vaše hiše za približno 60–70 odstotkov.

### **Prednosti toplotne črpalke z zemeljsko vrtino**



- + Zelo stabilen vir energije
- + Zanesljiv
- + Primeren tudi za manjše parcele
- + Neznaten vpliv na okolje
- + Zagotavlja nam lahko tudi hlajenje v poletnem času.

### **Slabosti toplotne črpalke z zemeljsko vrtino**

- Vrtanje izvrtine predstavlja večje stroške inštalacije
- Včasih so potrebna posebna dovoljenja
- Potrebno je paziti, da ne poškodujemo vodnih virov
- V mestnih območjih je treba biti pozoren tudi na možnost poškodbe obstoječih jaškov in kanalov

### **2.4.2 Toplotna črpalka z zemeljskimi kolektorji**

Sonce oddaja svojo energijo v zemljo. 200 do 500 metrov dolg kolektorski sistem položen v zavojih po parceli vkopljemo v globino, na kateri ni več pričakovati zamrzovanja – približno en meter. Kolektorski krogotok absorbira toploto iz zemlje in jo uporabi za uparitev hladilne tekočine v toplotni črpalci. Toplotna črpalka z zemeljskimi kolektorji zmanjša porabo energije za ogrevanje vaše hiše za približno 60–70 odstotkov.



#### **Prednosti toplotne**

#### **črpalke z zemeljskimi kolektorji**

- + Ker ni potrebno vrtanje, so stroški inštalacije nižji
- + Relativno še vedno zelo stabilen vir toplote

#### **Slabosti toplotne črpalke z zemeljskimi kolektorji**

- Za izvedbo potrebujemo veliko parcelo
- Potrebno je odgrniti celotno površinsko plast zemlje do globine enega metra

### **2.4.3 Toplotna črpalka z jezerskimi kolektorji**

Toplotna črpalka z jezerskimi kolektorji učinkovito deluje na enak način, kot toplotna črpalka z zemeljskimi kolektorji tako, da uporablja toploto jezerske vode in jezerskega dna. Kolektorski krogotok je položen na dnu jezera in lahko ogreva objekte, postavljene ob vodi. Toplotna črpalka z jezerskimi kolektorji zmanjša porabo energije za ogrevanje vaše hiše za približno 60–70 odstotkov.

#### **Prednosti toplotne črpalke z jezerskimi kolektorji**

- + Ker ni potrebno vrtanje, so stroški inštalacije nižji
- + Relativno še vedno zelo stabilen vir toplote
- + Neznaten vpliv na okolje

#### **Slabosti toplotne črpalke z jezerskimi kolektorji**

- Potreben je dostop do bližnjega vodnega vira

- V primeru zamrznitve celotnega jezera v zimskem času, se izkoristek zmanjša
- Potrebna so posebna dovoljenja

#### 2.4.4 Zračna toplotna črpalka

Tudi mrzel zrak (do  $-10^{\circ}\text{C}$ ) vsebuje dovolj toplote, da je mogoče upariti hladilno tekočino toplotne črpalke. Zračna toplotna črpalke ne potrebuje nobenega kolektorskega krogotoka. Namesto tega se toplota prenaša z direktnim uparjevanjem, ob prehodu zraka skozi toplotni izmenjevalnik. Obstajajo trije različni tipi zračnih toplotnih črpalok.

##### Prednosti zračne toplotne črpalke

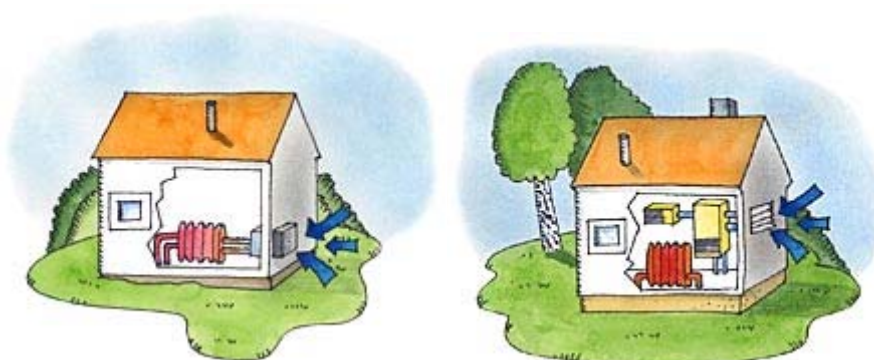
- + Nizki stroški investicije
- + Ni potrebna vgradnja nikakršnega kolektorskega krogotoka
- + Enostavna inštalacija
- + Visoka učinkovitost

##### Slabosti zračne toplotne črpalke

- Neprimerna namestitvev lahko povzroči hrup v okolici hiše
- Deluje le do temperature  $-10^{\circ}\text{C}$
- Njen izkoristek je najslabši, ko je zahteva po ogrevanju največja (v zimskem času).

#### 2.4.5 Zračna toplotna črpalka na zrak iz ventilacijskega sistema

Ta toplotna črpalka jemlje toploto iz zraka v izpuhu ventilacijskega sistema, ko ta zapušča zgradbo. Učinkovito ogrevanje dosežemo z uporabo ogretega zraka z ventilacijskega sistema za uparitev hladilne tekočine v toplotni črpalci. Ena od slabosti tega principa je povečan hrup med njenim delovanjem. Z uporabo te toplotne črpalke zmanjšamo porabo energije za ogrevanje za približno 25–35 odstotkov.



#### 2.4.6 Toplotna črpalka zrak - voda

Toplotna črpalka zrak – voda odjema energijo iz zunanjega zraka (do  $-15^{\circ}\text{C}$ ). To toploto nato prenesemo v sistem centralnega ogrevanja in/ali ogrevanja sanitarne vode. Sistem zrak – voda je pogosto nameščen v kombinaciji z poprej obstoječim ogrevalnim sistemom (elektrika, peleti ali olje). Zračna toplotna črpalka zmanjša porabo energije za ogrevanje vaše hiše za približno 50–60 odstotkov.



#### 2.4.7 Toplotna črpalka zrak - voda – kombinirana z obstoječim ogrevalnim sistemom

Namesto zamenjave vašega celotnega ogrevalnega sistema je mogoče toplotno črpalko namestiti tako, da deluje skupaj z vašim že nameščenim ogrevalnim sistemom, na primer oljnim kotlom ali dvo-stenskim potopnim ogrevalnim sistemom. Regulacijski sistem omogoča celovito izrabo zmogljivosti toplotne črpalke, obstoječi kotel ali potopni grelec pa se uporabi le takrat, ko potrebujemo dodatno ogrevanje; če na primer potrebujemo posebej vročo vodo ali kadar temperatura zunaj pade posebej nizko (običajno v pogojih pod  $-15^{\circ}\text{C}$ ). To pomeni, da bo začetna investicija manjša kot bi bila, če bi bilo potrebno vgraditi popolnoma nov sistem, obstoječ sistem ogrevanja, pa se bo uporabljal le še kot dodatek ogrevanju v zanemarljivo kratkih letnih obdobjih.

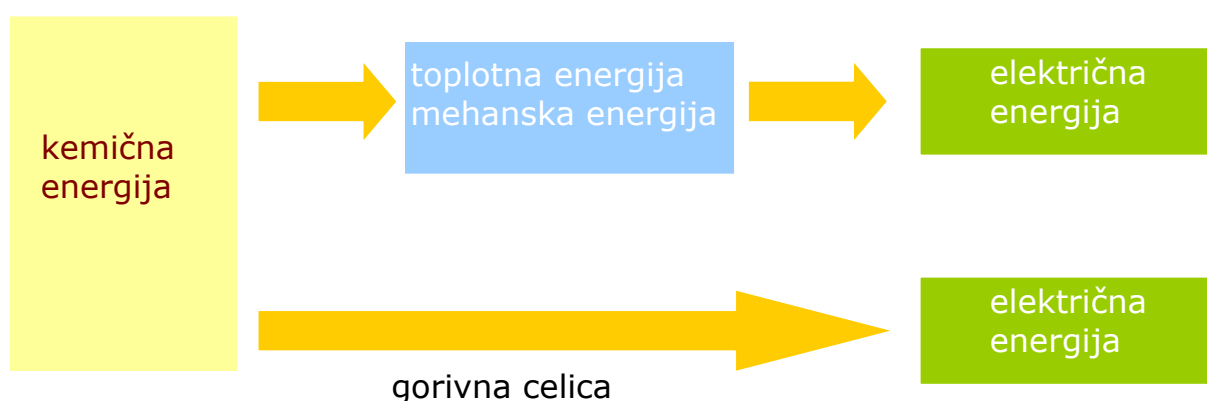




### 3 Gorivne celice

Gorivne celice predstavljajo danes enega najbolj obetavnih virov električne energije. Potrebe za raziskave in razvoj področja gorivnih celic izhajajo iz projekcije energetskega virov, ki so postavili v prvi plan vprašanja alternativnih virov električne energije, boljšega izkoristka, zmanjšanje emisije, npr. skozi rabo električnih vozil in prednosti, ki jih uvedba tovrstne tehnologije omogoča. Obsežne raziskave so se začele po prvi t.i. naftni krizi (po 1970), ko so se razvojne institucije začele ukvarjati z raziskavami na področju alternativnih virov energije. Na področju gorivnih celic so trenutno v znatni prednosti ZDA in Japonska, medtem ko se Evropa pospešeno vključuje v raziskovalne in razvojne aktivnosti na tem področju.

Gorivna celica je elektrokemična naprava za direktno pretvorbo energije. Podobno kot baterije proizvaja nizko napetost enosmernega toka. Baterija in akumulator porabljata kemično substanco v celici za proizvodnjo elektrike. V gorivni celici pa se gorivo kontinuirno dovaja v celico podobno kot pri motorju z notranjim zgorevanjem. Najbolj pomembna reakcija vodikove celice je zgorevanje vodika. Pri tlaku 1 bara in temperaturi 25 °C je odgovarjajoča napetost reakcije 1,229 V.



Slika 10. Načini pretvorbe kemične energije v električno

### 3.1 Zgodovina razvoja gorivnih celic

sega v leto 1839, ko je Anglež Sir William Robert Grove uspel prikazati, da je elektroliza



*Slika 11. Sir William Robert*

vode v razredčeni žvepleni kislini reverzibilni proces. Z uporabo vodika in kisika ob primerni metodi nastaja električna. Da bi ugotovil razloge reakcije, je naredil napravo – prvo plinsko baterijo, kasneje preimenoval v gorivno celico. Njegov izum je doživel uspeh ter s tem preusmeril njegove raziskave v razumevanje principov shranjevanja energije in reverzibilnosti. Kasneje je zanimanje za njegovo plinsko baterijo pojemale z vedno večjo uporabo takrat poceni fosilnih goriv ter izumom parnega stroja.



*Slika 12. Francis Thomas Bacon*

Okoli sto let kasneje se je ukvarjal z razvojem celice Anglež Francis Thomas Bacon. Uporabil je bazični elektrolit KOH namesto kislega in s tem zmanjšal korozijo na elektrodah. Bacon-ovo celico so sestavljale porozne (plinsko difuzijske) elektrode namesto masivnih, ki jih je uporabljal Grove. Porozne elektrode so tako povečale reakcijsko površino, kjer je potekala reakcija med elektrodo,

elektrolitom in gorivom. Poleg tega je vzdrževal normalni zračni tlak, kar je preprečilo elektrolitu, da bi “poplavlil” drobne pore v elektrodah. V naslednjih dvajsetih letih je Bacon naredil dovolj napredka z bazično celico za predstavitve večjih razsežnosti.

Ena od prvih predstavitev je bil iz leta 1959 Allis-Chalmers traktor poganjan s skupkom 1008 celic. Z močjo 15.000 vatov je traktor generiral dovolj moči za vleko 1.500 kg tovora. Traktor so kasneje donirali muzeju Smithsonian, Allis-Chalmers pa je ohranjal

razvojni program še nekaj let in naredil gorivne celice za pogon vozila na golf igriščih, podmornico in viličarja. V projektu je sodelovala tudi U.S. Air Force [3].



*Slika 13. Traktor na gorivne celice*



Z bazičnimi celicami je eksperimentiral tudi Union Carbide v poznih 1950. in 1960. letih. Osnove so črpali iz del raziskovalcev G. W. Heise-a in E. A. Schumacher-ja iz 30. let. **Karl Kordesch** je z ekipo naredil bazično celico z grafitnimi plinsko difuzijskimi elektrodami. Predstavili so mobilni radar za ameriško vojsko, kolo z motorjem (1967) in načrt za podvodno bazo.

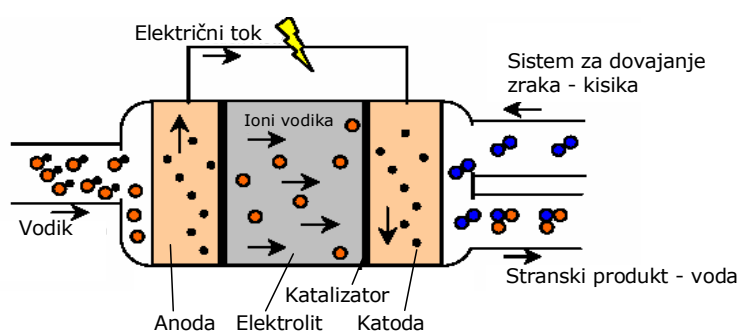
*Slika 14. Motor na gorivne celice*

### 3.2 Princip delovanja gorivne celice

Gorivna celica je sestavljena iz gorivne elektrode (anoda) in kisikove elektrode (katoda), ki sta medsebojno povezani z ionsko prevodnim elektrolitom. Elektrode so s tokokrogom povezane na porabnika električne energije preko kovinskih vodnikov izven celice.

Anoda je oskrbovana z vodikom kot gorivom, ki elektrokemično razpade na protone in elektrone na reakcijski površini elektroda/elektrolit. Elektroni, ki opravljajo električno delo na zunanjem tokokrogu tečejo na katodo, kjer reducirajo kisik v vodo na mejni površini elektroda/elektrolit.

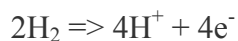
Potrebni protoni pridejo preko anode skozi elektrolit. Kot je razvidno iz slike, mora biti elektroda prepustna za pline (porozna). V celici s tekočim elektrolitom, ki deluje pod vreliščem vode moramo imeti sistem pretoka elektrolita z zunanjim odstranjevanjem vode (n.pr. izparevanje). Pri celici s trdnim elektrolitom pa se nastala voda neposredno odstrani iz elektrolita v plinskem prostoru ob katodi.



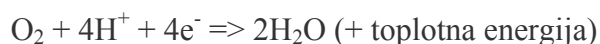
Slika 15. Osnovni princip delovanja gorivne celice

Poteka reakcija:

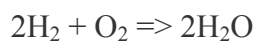
Na anodi:



Na katodi:



Celotna reakcija:



Posledice reakcije:

- Med anodo in katodo steče električni tok
- Sprosti se precej toplotne energije.

### **3.3 Vrste gorivnih celic**

Dosedanji razvoj različnih tehnologij gorivnih celic in na njih temelječih generatorjev električnega toka in toplote je pripeljal do naslednjih praktičnih ugotovitev glede uporabnosti posameznih tipov gorivnih celic (Tabela 1):

Tabela 1.

Tip	Elektrolit	Obrat. T (°C)	Elektrokemična reakcija	Področja uporabe	Prednosti	Pomanjkljivosti
Polimerne elektrolitske membrane (PEM)	Trden organski polimer	60-100	A: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ K: $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	Proizvodnja električne energije, Prenosne naprave, mobilne naprave, transport	Nizka temperatura, hiter zagon, dolga življenjska doba, lahko upravljanje	Dragi katalizatorji, občutljivost na nečistoče v gorivu
Alkalna (AFC)	Vodna raztopina KOH v matrici	90-100	A: $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ K: $1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	Vojaške in vesoljske naprave	Katodna reakcija je hitra – zato visoke performanse	Zelo občutljiva na CO <sub>2</sub> v gorivu in zraku
Fosforna kislina (PAFC)	Fosforna kislina v matrici	175-200	A: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ K: $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	Proizvodnja električne energije, transport	85% učinkovitost pri kogeneraciji, lahko uporablja vodik + 2% CO	Pt katalizator, majhna gostota moči, velika specifična teža in prostornina
Taljeni karbonati (MCFC)	Talina alkalijskih karbonatov v matrici	600-1000	A: $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ K: $1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ $H_2 + 1/2O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$	Proizvodnja električne energije	Kogeneracija, možen interni reforming goriva	Korozijski problemi (visoka temperatura), krajša življenjska doba
Trdni oksidi (SOFC)	ZrO <sub>2</sub> stabiliziran z Y (YSZ)	600-1000	A: $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ K: $1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	Proizvodnja električne energije	Kogeneracija, možna direktna uporaba goriva	Slaba obstojnost materialov (visoka temperatura), kratka življenjska doba

### 3.3.1 PEM gorivne celice

(proton exchange membrane) delujejo s polimernim elektrolitom v obliki tanke prepustne membrane pri temperaturah okoli 80 °C.

- izkoristek: 40 – 50 %
- izhodna moč: 50 – 250 kW
- primerne so za hiše in avtomobile
- trden in elastičen elektrolit (ne puščajo)
- gorivo mora biti očiščeno

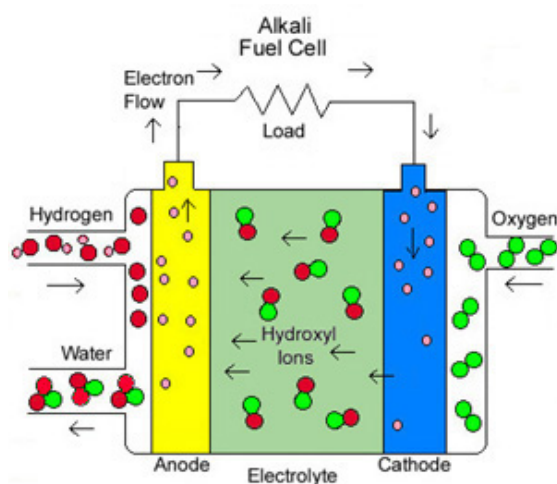
- kot katalizator se uporablja Pt (velik strošek)



### 3.3.2 Bazične gorivne celice

delujejo s stisnjanim vodikom in kisikom. Največkrat se uporablja raztopina KOH v vodi kot elektrolit. Ta tip celic se je uporabil v raketoplanu Apollo za pridobivanje elektrike in vode.

- izkoristek je okoli 70 %
- temperatura delovanja je med 150 in 200 °C
- izhodna moč je med 300 W in 5 kW
- potreben je čisti vodik kot gorivo
- elektrode so iz Pt (velik strošek)
- možnost puščanja

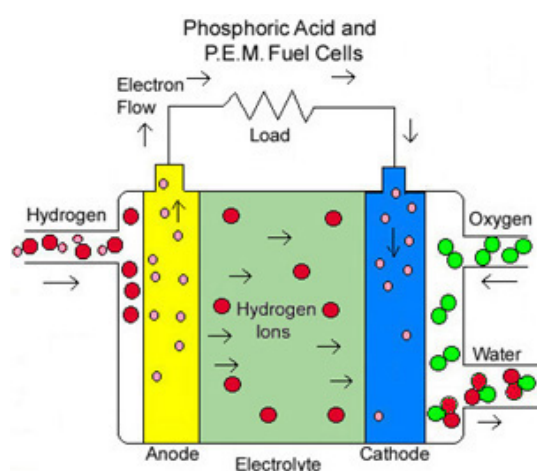




### 3.3.3 PAFC gorivne celice

uporabljajo za elektrolit fosforno kislino.

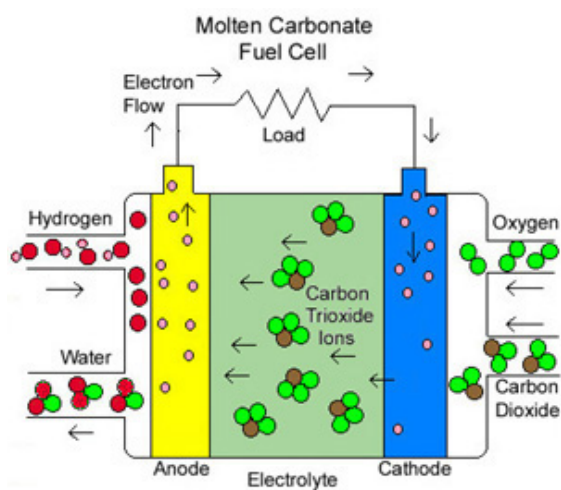
- izkoristek je med 40 in 80 %
- temperatura delovanja je med 150 in 200 °C
- izhodna moč je do 200 kW (testiranja do 11 MW)
- celice tolerirajo koncentracijo CO do 1,5 % kar poveča izbiro goriva
- elektrode so iz Pt (visok strošek)
- če se uporablja naftno gorivo je potrebno izločiti žveplo
- notranji deli morajo biti korozijsko odporni (kislina)



### 3.3.4 MCGC gorivne celice

(staljen karbonat) uporabljajo za elektrolit visokotemperaturne sestavine soli (Na, Mg) in karbonatov ( $\text{CO}_3$ ).

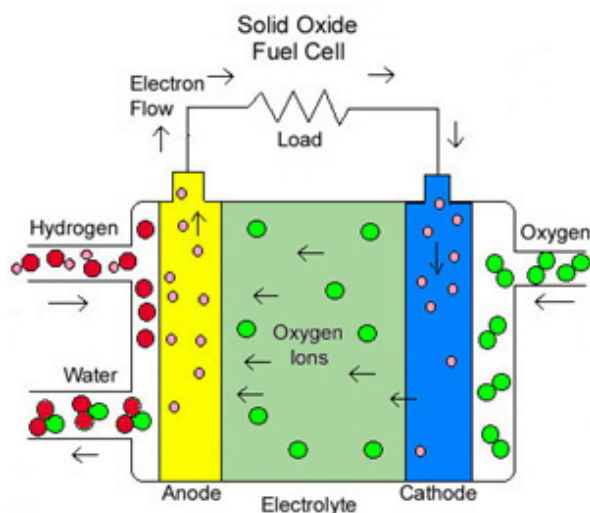
- izkoristek je med 60 in 80 %
- temperatura delovanja je okoli 650 °C
- izhodna moč je trenutno do 100 MW
- odpadno toploto je mogoče reciklirati za pridobivanje dodatne elektrike
- elektrode so iz Ni (nizek strošek)
- visoka temperatura zoža uporabo materialov in uporabnosti, onemogoča pa "zastropitev" celice s CO
- karbonatni ioni iz elektrolita se porabljajo in jih je potrebno nadomestiti z dovajanjem  $\text{CO}_2$



### 3.3.5 SOFC gorivne celice

(solid oxide) uporabljajo za elektrolit trdno keramično zmes kovin (Ca, Zr) in oksidov.

- izkoristek je okoli 60 %
- temperatura delovanja je pri 1000 °C
- izhodna moč je do 100 kW
- celice so velikih dimenzij
- elektrode so iz Pt (visok strošek)
- zaradi visokih temperatur se izloči vodik sam iz goriva
- odpadno toploto je mogoče reciklirati za pridobivanje dodatne elektrike
- vsled visokih temperatur je omejena namembnost
- celice ne morejo puščati, lahko pa pokajo



### **3.4 Lastnosti sestavnih delov gorivnih celic:**

#### **3.4.1 Elektrode**

- ker prevajajo elektrone, so iz kovin ali iz materialov s polprevodniškimi lastnostmi
- površina mora delovati kot katalizator elektrokemijske reakcije.
- Imeti morajo dobre mehanske lastnosti ter porozne, da lahko gorivo in zrak prideta v stik z elektrolitom
- elektrode ne smejo korodirati v elektrolitu gorilnega elementa
- snovi iz katerih so elektrode so: platina, paladij, radij, rutenij, nikelj, srebro in grafit

#### **3.4.2 Katalizator**

- tok elektrokemijske reakcije in gostota toka sta odvisna od katalizatorskih pojavov na površini elektrode
- elektroda je lahko hkrati katalizator (elektrokatalizator), če jo obdelamo s posebnim postopkom, ali če se katalizator adsorbira na njeno površino
- izbira katalizatorja je odvisna od najpočasnejše elementarne stopnje celotne reakcije, ki jo je treba pospešiti

#### **3.4.3 Elektrolit**

- uporabljajo se trdni in tekoči elektroliti
- elektrolit je lahko vsaka polarna snov, ki topi ionske kristale, raztaljene soli, soli alkalnih kovin – kloride in karbonate.
- od trdnih elektrolitov so najpomembnejši membransko grajeni polimeri (polistiren). Takšne membrane ločujejo katodni del od anodnega ter zmanjšujejo dimenzije gorilnih elementov (vesoljska vozila)
- v novejšem času raziskujejo elektrolitsko prevodne membrane, izdelane iz nikelj - borida ali bor – nitrída

#### **3.4.4 Goriva in oksidanti**

- gorivo v gorivnih celicah je lahko vsak element ali spojina, ki lahko notranjo energijo sprosti z oksidacijo in preide v ione
- najpogostejša goriva so vodik in ogljikovodiki
- oksidanti so lahko kemijske snovi, ki imajo močno afiniteto do elektronov in ki z redukcijo preidejo v ionsko stanje
- najpogostejši oksidant je kisik
- v nekaterih reakcijah se kot oksidanti uporabljajo tudi halogeni elementi (Cl, Br, F)

### 3.5 Prednosti gorivnih celic

- Možnost mehanskih okvar je minimalna, saj nimajo gibljivih delov.
- Izkoristek je približno dvakrat večji, kot pri motorjih z notranjim izgorevanjem.
- Ne onesnažujejo okolja, saj je glavni produkt vodna para, kar je zelo pomembno za mestna jedra.
- Države, ki bi uspele pridobivati energijo na ta način bi postale energijsko neodvisne od fosilnih goriv.
- Zmanjšanje uničevanja okolja in možnosti ekoloških nesreč.
- Vodika je dovolj skoraj v vseh državah sveta.

### 3.6 Slabosti gorivnih celic

- ✦ Vodik kot gorivo ni prosto dostopen, zato ga je potrebno proizvajati.
- ✦ Vodik je zelo eksploziven in s tem zelo problematičen za skladiščenje in transport.
- Gornja hiba se da odpraviti z uvajanjem »reformerjev«, ki proizvajajo vodik iz ogljikovodikov ali alkoholnih goriv, žal pa se tako zmanjša izkoristek celic, izpuh pa ni več samo vodna para ampak vrsta drugih plinov

### 3.7 Uporaba gorivnih celic

Povsod, kjer potrebujemo vir električne energije in toplote.

#### 3.7.1 Stacionarni sistemi



Slika 16. Instalacija petih PC 25TM gorivnih celic v Anchorage-u na Aljaski za zagotavljanje električne energije in toplote v mestu



Slika 17. 7kW PEM gorivna celica za hišno uporabo firme Plug Power. Plug Power testira enoto od leta 1998. V letošnjem letu nameravajo gorivno celico ponuditi tržišču.

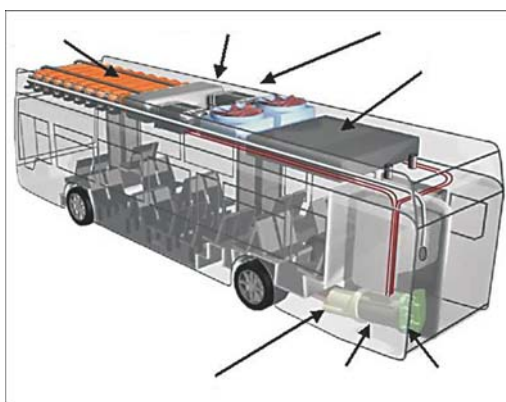
### 3.7.2 Gorivne celice v transportu



Slika 18. Gorivna celica v testnem vozilu Volkswagen



Slika 19. Vozilo Honda na gorivne celice



Slika 20. Avtobus z gorivnimi celicami





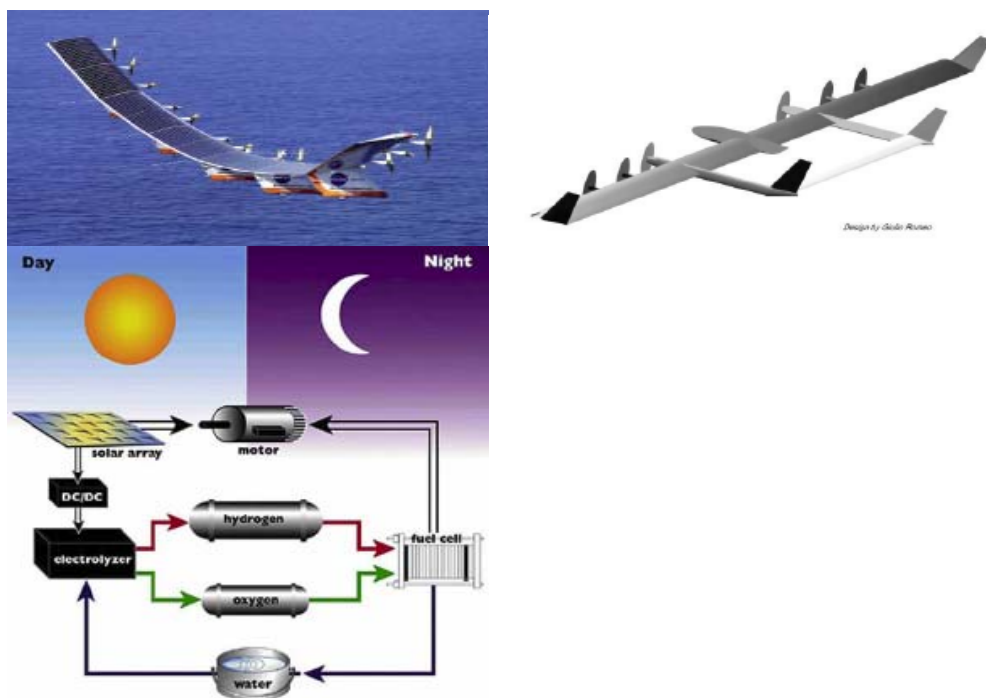
*Slika 21. MOJITO FC skuter na pogon z gorivnimi celicami.*

*Rezervoar vodika je pod sedežem*



*Slika 22. Kolo, opremljeno z električnim pogonom na gorivne celice*





Slika 23. Eksperimentalno letalo z električnim pogonom. Letalo je lahko stalno v zraku. Podnevi se iz sončnih celic pridobi elektrika za pogon letala in hkratno elektrolizo vode, ki daje vodik. Shranjeni vodik se ponoči uporablja za gorivne celice, ki ob odsotnosti sonca dajejo električno energijo za pogon motorjev.

### 3.7.3 Vojaške aplikacije

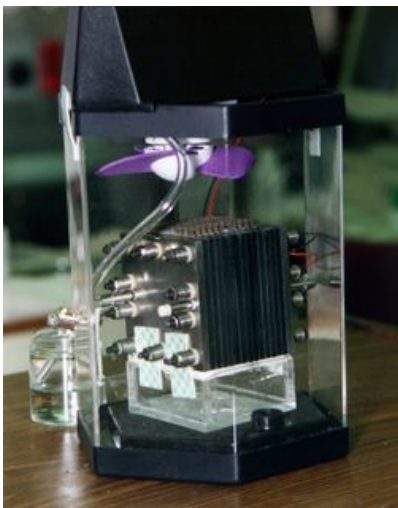


*Slika 24. Opazovalni sistem bojnega vozila uporablja električno energijo iz vgrajenih gorivnih celic*



*Slika 25. Vsi računalniki in ostala elektronska oprema v izvidniškem vozilu uporabljajo električno energijo iz gorivnih celic*

#### **3.7.4 Široko-namenska uporaba gorivnih celic**



*Slika 26. Laboratorijska gorivna celica na metanol, iz katerega kot gorivo pridobimo vodik*



Slika 27. Prenosna gorivna celica



Slika 28. Televizor priključen na gorivno celico



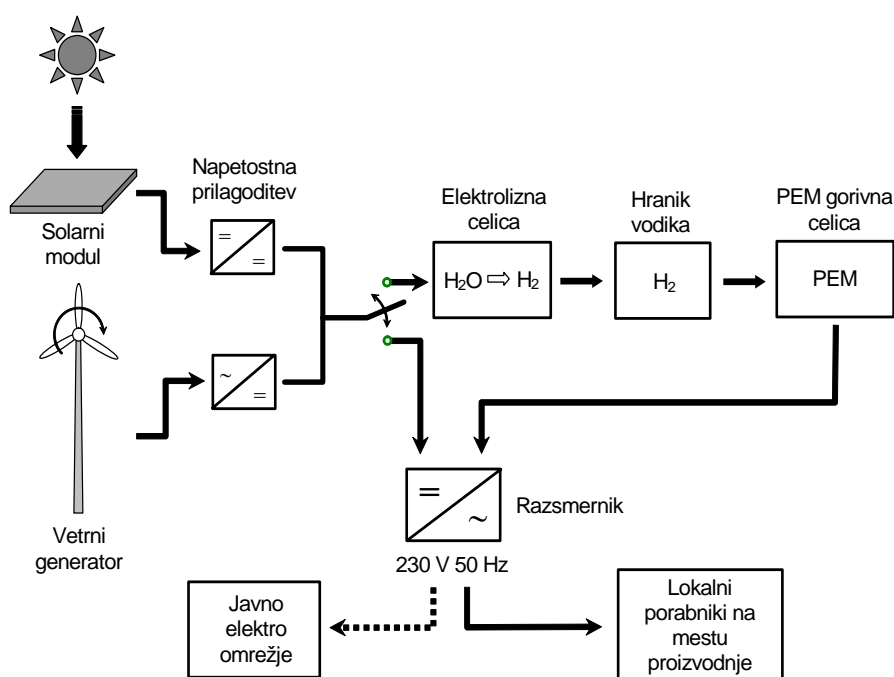
Slika 29. Notesnik, ki za napajanje uporablja gorivne celice



Slika 30. Telefon z gorivno celico

### 3.8 Pridobivanje električne energije na čist način

Gorivne celice kot gorivo potrebujejo vodik. Naravnega vodika v naravi ni, zato njegovo pridobivanje iz drugih snovi prav tako onesnažuje okolje. Razen elektrolize, ki pa za pridobivanje vodika potrebuje precej električne energije, je sprejemljiv postopek pridobivanja vodika in nato električne energije uporaba sončnih celic (ali vetrnih elektrarn) za električno energijo, s katero pridobimo z elektrolizo vodik, ki ga potem uporabimo kot gorivo za gorivne celice, ki spet proizvedejo električno energijo.



Slika 31. Koncept pridobivanja »čiste« električne energije

## 4 Viri in literatura

- [1] KOMISIJA EVROPSKE SKUPNOSTI: ZELENA KNJIGA - Evropska strategija za trajnostno, konkurenčno in varno energijo, Bruselj, 8.3.2006
- [2] dostopno na <http://www.thermo-dm.si/toplotnecrpalke.php>
- [3] Medved, Jože: Gorivne celice- Termodinamika elektrokemijskih reakcij, dostopno na [http://193.2.100.82/nimages/static/712/gorivne\\_celice.ppt.pdf](http://193.2.100.82/nimages/static/712/gorivne_celice.ppt.pdf)
- [4] Slovenska tehnološka platforma za vodik in gorivne celice, Strateški razvojni program, Verzija 1, 15. november 2005, str. 1-30 (dokument je dostopen na <http://www.sihfc.si>)