

DUŠAN D. STANOJEVIĆ¹
MILORAD TOMIĆ²

¹"Zorka" – Centar za istraživanja,
Šabac, Srbija i Crna Gora

²Tehnološki fakultet Zvornik,
Republika Srpska,
Bosna i Hercegovina

STRUČNI RAD

621.351:658.264:621.365

GORIVNA ĆELIJA JUČE, DANAS I SUTRA

Gorivna ćelija ima neke osobine primarnog hemijskog izvora struje, a obavlja direktnu konverziju hemijske, u električnu energiju. U odnosu na klasične sisteme za konverziju hemijske energije u električnu energiju preko toplotne energije i mehaničkog rada, gorivna ćelija ima značajno veću efikasnost. Termičko–mehanička konverzija hemijske u električnu energiju u termoelektranama odigrava se uz efikasnost od oko 30%, dok efikasnost konverzije hemijske u električnu energiju kod gorive ćelije iznosi i do 60%.

Izuzev u kosmičkom programu, komercijalna upotreba gorivne ćelije nije postojala sve do 1990. godine od kada su najrazvijenije zemlje počele izdašnije da finansiraju razvoj ovog izvora energije. Do 1995. godine preko stotinu gorivnih ćelija je instalirano za proizvodnju energije u Evropi, SAD i Japanu, a danas postoji više hiljada instalacija, zbirno, značajnog energetskog kapaciteta.

Zbog svojih osobina gorivna ćelija superiornu, u odnosu na druge komercijalne proizvođače električne energije, ispunjava danas sve važniji uslov – da pri radu ne zagađuje, ili minimalno zagađuje okolinu. Kao takva, gorivna ćelija može da pomogne razrešenju rastućeg konflikta između daljeg ekonomskog razvoja čovečanstva i očuvanja čiste i zdrave prirodne sredine.

Gorivnu ćeliju izumeo je 1842. godine William R. Grove. Međutim, zbog složenih tehničkih zahteva i cene, nije imala praktičnu upotrebu sve do 1960. godine. Tada je ovaj energetski izvor uključen u Gemini, a kasnije i Apollo svemirske programe, gde je alkalna gorivna ćelija korišćena u 18 svemirskih misija u trajanju od 10.000 h, bez ijednog kvara. Afimacija u svemirskom programu, otvorila je gorivnoj ćeliji vrata intenzivnijeg razvoja [1].

Gorivna ćelija u osnovi ima neke osobine primarnog hemijskog izvora struje. Kao sistem koji obavlja direktnu konverziju hemijske energije u električnu, u odnosu na klasične sisteme za konverziju hemijske energije u toplotnu, pa dalje, toplotne energije u koristan rad, i najzad u električnu energiju, gorivna ćelija ima značajno veću efikasnost. Na primer, termičko–mehanička konverzija hemijske u električnu energiju u termoelektranama odigrava se uz efikasnost od oko 30%, dok efikasnost konverzije hemijske u električnu energiju kod gorive ćelije iznosi i do 60% [1].

Šira komercijalna upotreba gorivne ćelije nije postojala sve do 1990. godine od kada su najrazvijenije zemlje počele izdašnije da finansiraju razvoj ovog izvora energije. Do 1995. godine preko stotinu gorivnih ćelija je instalirano za proizvodnju energije u Evropi, Japanu, SAD i na Dalekom Istoku, a danas postoji više hiljada instalacija, zbirno, značajnog energetskog kapaciteta [2].

Najveća jedinica za proizvodnju električne energije na bazi tehnologije gorivne ćelije, ima snagu od 35 MW a trenutno je grade General Motors i DOW Chemical Company u Freeportu (Teksas). Postrojenje je dovoljno kapaciteta da u potpunosti zadovolji potrebe za električnom energijom grada od oko 25.000 stanovnika [2].

Zbog svojih povoljnih osobina gorivna ćelija superiornu, u odnosu na druge proizvođače električne energije, ispunjava danas sve važniji uslov – da pri radu ne

zagađuje, ili minimalno zagađuje okolinu. Kao takva, gorivna ćelija može da pomogne razrešenju rastućeg konflikta između nastavka ekonomskog razvoja čovečanstva i očuvanja čiste i zdrave prirodne sredine.

OSNOVNE KARAKTERISTIKE GORIVNE ĆELIJE

Gorivna ćelija, pored osobina primarnog izvora struje deli i druge značajne osobine sa baterijom – bešuman rad, i odsustvo pokretnih delova. Za razliku od sekundarnog izvora struje, gorivna ćelija radi neprekidno – nema potrebe za prekidom u radu zbog ponovnog punjenja. Najčešće primenjena hemijska reakcija koja teče u gorivnoj ćeliji, odvija se, između vodonika i kiseonika. Ovi gasovi se dovode na pogodne elektrode u ćeliji, gde se vodonik oksidiše, a kiseonik redukuje, pri čemu nastaje električna energija, voda i toplota, što je prikazano na slici 1.

Srce gorive ćelije čine elektrode razdvojene jonski–provodljivim elektrolitom na kojem se odigravaju elektrohemijske reakcije. Elektromotorna sila pojedinačne gorivne ćelije, u zavisnosti od tipa, kreće se od 0,7 do 1,5 volti. Više povezanih ćelija (baterija), daje dovoljno energije za rad komercijalnih uređaja [3].

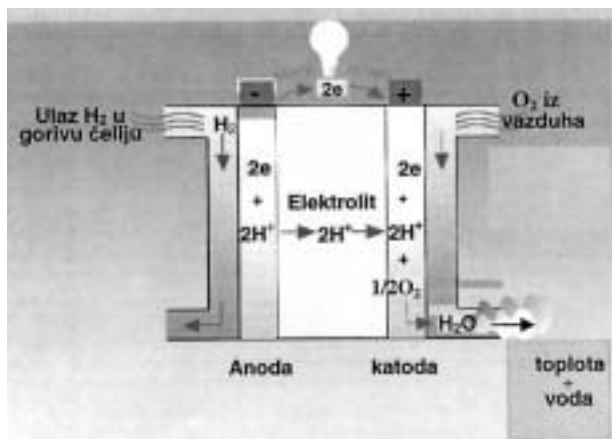
Vodonik se uglavnom dobija iz ugljovodoničnih goriva kao što je metan, prirodni gas ili iz drugih organskih supstanci, npr. metanola. Goriva koja sadrže vodonik se razlažu u tzv. reformeru, uz oslobađanje vodonika, dok se kiseonik, potreban za oksidaciju goriva, ako je moguće, uzima direktno iz atmosfere (slika 2) [4].

Goriva ćelija proizvodi jednosmernu struju, a kako većina elektronskih naprava i transmisionih sistema zahtevaju naizmeničnu struju, koriste se odgovarajući pretvarači da jednosmernu struju konvertuju u naizmeničnu. U terminološkom pogledu, pojam gorivna ćelija često podrazumeva, ne samo pojedinačnu ćeliju, nego i bateriju ćelija u kojoj ona radi, a koja uključuje neophodne pomoćne agregate: reformer, sistem za iskorišćenje otpadne toplote i strujni pretvarač (slika 2) [4].

Adresa autora: D.D. Stanojević, "Zorka" – Centar za istraživanja,
Šabac, Hajduk Veljkova bb, Srbija i Crna Gora

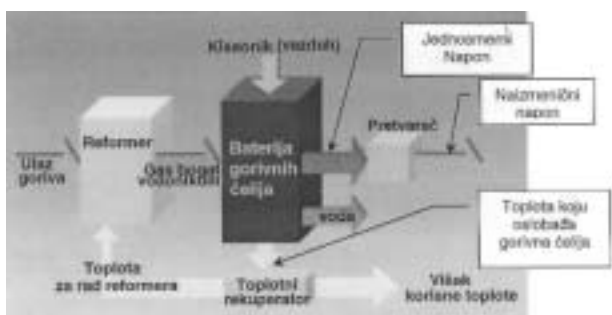
Rad primljen: Jun 20, 2004

Rad prihvaćen: April 23, 2005



Slika 1. Šema gorivne ćelije koja radi na reakciji vodonika i kiseonika

Figure 1. Scheme of a fuel cell based on the reaction of hydrogen and oxygen



Slika 2. Tehnološka šema postrojenja gorivnih ćelija

Figure 2. Technological scheme of a fuel cell plant

Termodinamički aspekt rada gorivne ćelije

U klasičnoj toplotnoj mašini, toplotna energija koja se može dobiti iz različitih izvora, pretvara se u mehanički rad. Pri tome, Karnoov termodinamički stepen korisnog dejstva toplotne mašine je:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

gde su T_1 , i T_2 , apsolutne temperature toplog gasa i ohlađenog gasa (posle ekspanzije u mašini). Da bi ovako definisan stepen korisnog dejstva bio što veći, potrebno je da temperatura toplog gasa, T_1 bude što viša, a temperatura hladnog gasa T_2 , što niža. I jedan i drugi zahtev opterećeni su brojnim ograničenjima (viša temperatura, tehničkim i tehnološkim osobinama mašine, a niža, temperaturom okolne sredine), što utiče da je stepen korisnog dejstva toplotnih mašina relativno nizak [5].

Ključna prednost gorivne ćelije u transformaciji energije može se sagledati u poređenju sa klasičnom toplotnom mašinom. U gorivnoj ćeliji reakcije između goriva i kiseonika lokalno su odvojene zbog odvijanja procesa oksidacije i redukcije na različitim elektrodama. Kako u gorivnoj ćeliji nema klasičnog sagorevanja goriva, sa termodinamičke tačke gledišta može se govoriti o goriv-

noj ćeliji kao o jedno-temperaturnom sistemu, za razliku od toplotne mašine, koja je najmanje dvo-temperaturni sistem [6].

Ako se elektrodne reakcije u gorivnoj ćeliji tretiraju kao ravnotežne (povratne), što, naravno, predstavlja aproksimaciju, na osnovu termodinamičke ravnoteže povratnih procesa moguće je određivanje nekoliko osnovnih parametara kod gorivne ćelije, uključujući efikasnost ćelije (η), i elektromotornu silu, tj. napon otvorenog kola (E) [6].

Da bi se opisali procesi u gorivnoj ćeliji, model gorivne ćelije se može predstaviti dvema elektrodama povezanim elektrolitom, povezanim u električno kolo spoljnjim provodnikom, kao što je prikazano na slici 1.

Ako gorivna ćelija radi pod stalnim pritiskom (p), i na temperaturi (T), reverzibilni termodinamički proces može biti opisan funkcijom Φ , čije su vrednosti 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 gorivnoj ćeliji, $\Delta\Phi$ je jednako ΔG , gde je ΔG promena Gibbsove slobodne energije. Pri tome, maksimalni korisni rad (L), koji se dešava u tom slučaju u sistemu, iznosi $\Delta G = -L$ [5].

Pod uslovom da su pritisak, p i temperatura, T konstante, važi (2):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

gde je H entalpija, a S – entropija.

Veličina ΔH predstavlja toplotni efekat reakcije u gorivnom spregu.

Vrednost ΔG je za reverzibilne elektrohemijske procese povezana sa elektromotornom silom (p_a , tako i elektromotornom silom gorivne ćelije, E), jednačinom (3):

$$\Delta G = -nFE \quad (3)$$

gde je n – broj elektrona koji učestvuju u reakciji, a F , Faradejeva konstanta (96.487C).

Promena entropije ΔS , na bazi jednačina (2) i (3), može biti definisana izrazom:

$$\Delta S = \left[\frac{\partial (\Delta G)}{\partial T} \right]_p = -nF \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \quad (4)$$

Oslanjajući se na prethodne izraze, promena Gibbsove slobodne energije, što je istovremeno i maksimalan koristan rad L koji gorivna ćelija daje, može se predstaviti jednačinom:

$$\Delta G = \Delta H + T \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_p = -L \quad (5)$$

Razvijajući izraz (5), preko (3), dolazi se do izraza za elektromotornu silu gorivne ćelije (6):

$$E = \frac{\Delta h}{nF} + T \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right) \quad (6)$$

Da bi se analizirala termička efikasnost gorive ćelije, definiše se stepen termičkog iskorišćenja gorivne ćelije [7]:

$$\eta_t = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (7)$$

U svetlu jednačine (6), očigledno je, da stepen termičkog iskorišćenja gorivne ćelije može, respektivno biti, manji od jedinice, jednak jedinici, ili veći od jedinice ($\eta_t < 1$; $\eta_t = 1$, i $\eta_t > 1$).

U idealnom slučaju elektrohemijske konverzije, kod gorivne ćelije, promena Gibsove slobodne energije reakcije ΔG , raspoloživa je kao korisna električna energija na temperaturi konverzije. Za najčešće korišćenu reakciju u gorivnom spregu, između vodonika i kiseonika:



standardna promena Gibsove slobodne energije je:

$$\Delta G^0 = G_{\text{H}_2\text{O}(l)}^0 - G_{\text{H}_2}^0 - \frac{1}{2}G_{\text{O}_2}^0 \quad (9)$$

gde je voda tretirana kao proizvod reakcije u tečnom obliku ($T = 298 \text{ K}$).

Kao uporedni parametar, definiše se idealni (maksimalni) stepen termičkog iskorišćenja gorivne ćelije $\eta_{i,t}$, koji se zasniva na jednačini (7), a odnosi se na standardne uslove:

$$\eta_{i,t} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} \quad (10)$$

Zamenom vrednosti entalpija stvaranja iz termodinamičkih tablica u jednačinu (9) dobija se da je za reakciju (8), $\Delta G^0 = 237,1 \text{ kJ/mol}$, a uvođenjem tablične vrednosti za istu reakciju ($\Delta H^0 = 285,8 \text{ kJ/mol}$), u jednačinu (10) dobija se numerička vrednost za $\eta_{i,t}$ [6]

$$\eta_{i,t} = \frac{237,1}{285,8} = 0,83 \quad (11)$$

Termička efikasnost gorivne ćelije se može, uz pomoć vrednosti definisane jednačinom (11), prikazati i preko odnosa radnog napona U pri proticanju struje I , i ravnotežnog napona ćelije E . Razlika između ravnotežnog i radnog napona na elektrodama gorivne ćelije uzrokovana je sumom polarizacija zbog proticanja struje (odnosno, realnih, a ne ravnotežnih uslova rada ćelije), za koliko je radni napon manji od ravnotežnog napona, tj. elektromotorne sile gorivnog sprega.

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{\text{korisna energija}}{\Delta H} = \frac{\text{korisna energija}}{\Delta G / 0,83} = \\ &= \frac{U \cdot I}{(E \cdot I) / 0,83} = \frac{0,83 \cdot U}{E} \end{aligned} \quad (12)$$

Ako se za reakciju vodonika i kiseonika na temperaturi od 298 K i pod pritiskom $101,3 \text{ kPa}$, uzme tablična vrednost za standardnu elektromotornu silu, koja iznosi $1,229 \text{ V}$, tada se, na osnovu jednačine (12), može definisati idealna termička efikasnost kao [1]:

$$\eta_{i,t} = 0,83 \cdot \frac{U}{E} = 0,83 \cdot \frac{U}{1,229} = 0,675 \cdot U \quad (13)$$

Stvarna efikasnost gorivne ćelije η , međutim, zavisiće od mnogih faktora i može se predstaviti kao proizvod termičkog iskorišćenja, strujnog iskorišćenja i naponskog iskorišćenja gorivne ćelije, i data je jednačinom (14) [7]:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_u \quad (14)$$

gde je η_i – strujno iskorišćenje gorivne ćelije, definisano sledećom jednačinom:

$$\eta_i = \frac{(nF)_{\text{akt.}}}{nF} \quad (15)$$

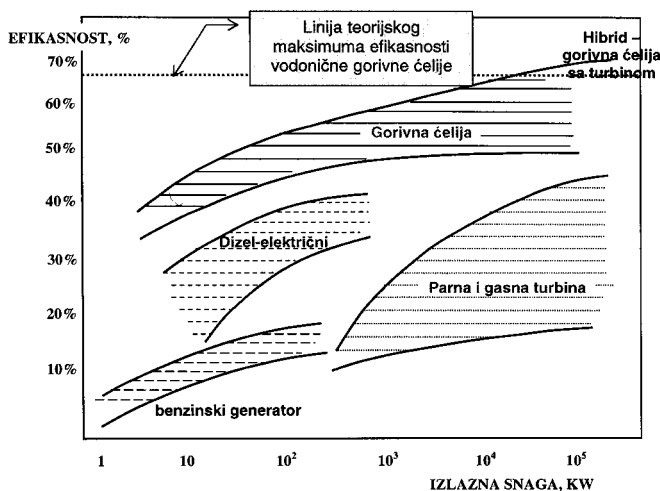
U jednačini (15), $(nF)_{\text{akt.}}$ predstavlja stvarnu količinu elektriciteta koju gorivna ćelija daje, dok je nF teorijski očekivana količina elektriciteta gorivne ćelije.

η_u u jednačini (14) predstavlja iskorišćenje napona gorivne ćelije, a mera je gubitaka u gorivnoj ćeliji koji su uzrokovani nepovratnošću procesa zbog različitih vrsta prenapetosti na elektrodama. Iskorišćenje napona gorivne ćelije definisano je odnosom napona na elektrodama gorivne ćelije U pri određenoj struji, i elektromotorne sile (napona otvorenog kola) gorivne ćelije E , a definisano je jednačinom:

$$\eta_u = \frac{U}{E} \quad (16)$$

Na slici 3 prikazani su realno dostignuti stepeni korisnog dejstva različitih sistema za transformaciju energije u zavisnosti od instalisane snage [1].

Iz dijagrama na slici 3 zapaža se da gorivna ćelija, ne samo što ima najveću efikasnost u odnosu na sve ostale sisteme (benzinski agregat; dizel-agregat; parnu ili gasnu turbinu), nego se ovaj parametar relativno malo menja u širokim granicama opterećenja (snage agregata), što kod drugih sistema (toplotnih mašina), nije slu-



Slika 3. Efikasnost različitih sistema za transformaciju energije u električnu energiju

Figure 3. Efficiency of different systems for the transformation of energy into electric energy

čaj. Kombinovanje gorivne ćelije sa mikroturbinom (hibridna gorivna ćelija), još više ističe superiornu efikasnost gorivne ćelije u odnosu na druge sisteme za transformaciju energije goriva.

Kinetika reakcija u gorivnoj ćeliji

Da bi gorivna ćelija mogla da bude primenjena kao komercijalni proizvod, bilo je neophodno otkloniti čitav niz ograničenja. Osnovni problem u primeni gorivne ćelije kao specifičnog izvora struje bile su njegove efektivne karakteristike (specifična snaga, napon, maksimalna radna struja itd.). Naime, prema ovim karakteristikama, gorivne ćelije dugo nisu mogle biti interesantne kao komercijalni izvori struje, jer su, za praktično značajne vrednosti struje, poprimale velike gabarite, veliku masu, zahtevale velika kapitalna ulaganja, a bile tehnički inferiorne u odnosu na druge hemijske izvore struje. Tehnološki napredak u domenu visoko-aktivnih elektrodnih materijala i elektrolita i konsekvantna primena najnovijih dostignuća elektrohemijske katalize, doveli su do značajnog poboljšavanja karakteristika gorivnih ćelija i njihove sve masovnije primene.

Problem efikasnosti gorive ćelije leži u elektrodnim reakcijama koje se (posebno što je gasovito gorivo u pitanju), odvijaju uz značajnu prenapetost, tj. previše sporo. Fenomen proticanja struje pri odvijanju elektrohemijske reakcije vezan je za istovremeno kretanje elektrona kroz provodnik, i kretanje jona kroz elektrolit, što se odvija veoma različitim brzinama. Ako se proces na elektrodi odvija reverzibilno, (odnosno, beskrajno malim strujama, a to znači beskrajno sporo), efekat razlike u brzinama procesa transporta elektrona i jona neme uticaja, pa potencijal elektrode zadržava ravnotežnu vrednost. Međutim, tehnička primena gorivne ćelije kao izvora električne struje, zahteva proticanje značajnih vrednosti struja kroz elektrode, što po pravilu, rezultuje značajnim odstupanjem aktuelnog potencijala elektroda od ravnotežne vrednosti [6].

Pri radu gorivne ćelije moguće je nastajanje više vrsta polarizacija (prenapetosti), od kojih su za procese na elektrodama ćelije najznačajnije: aktivaciona, omska i koncentraciona polarizacija.

Aktivaciona polarizacija η_{act} , nastaje zbog sporosti elektrohemijske reakcije na elektrodi (može biti anodna i katodna), što ukazuje na uzrokovanost koja potiče od same prirode elektrohemijske reakcije. Ako je aktivaciona prenapetost jedne elektrohemijske reakcije $\eta_{act} \geq 50-100$ mV, tada se opisuje Tafelovom jednačinom:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha \cdot nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (17)$$

gde je α koeficijent prenosa naelektrisanja, i – gustina struje koja protiče kroz elektrodu, a i_0 gustina struje izmene.

Koncentraciona polarizacija (prenapetost), predstavlja odstupanje potencijala elektrode od stacionarnog, odnosno, ravnotežnog potencijala, zbog promene

koncentracije elektrohemijskog reaktanta na površini elektrode. Na katodi koncentracionu polarizaciju izaziva smanjivanje koncentracije reaktanta usled trošenja reakcijom na elektrodi, a istovremeno, sporog nadoknađivanja potrošenog reaktanta difuzijom što dovodi do promene potencijala elektrode, odnosno polarizacije. Analogno, na anodi nastaju produkti reakcije koji se, usled spore difuzije, nagomilavaju na površini elektrode. Zbog tako izazvanog porasta koncentracije jona metala, dolazi do promene potencijala anode, tj. anodne (koncentracione) polarizacije [8].

Gustina struje na elektrodi i , može se prikazati i kao broj čestica reaktanta koji stižu na elektrodu u jedinici vremena. Kada je transport čestica ka elektrodnoj površini dominantno izazvan difuzijom, važi jednačina (18) koja odgovara formulaciji I Fikovog zakona difuzije:

$$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\delta} \quad (18)$$

gde je D koeficijent difuzije, C_B i C_S respektivno, koncentracije reaktanta u dubini rastvora elektrolita, i na površini elektrode, a δ je debljina difuzionog sloja. Ukoliko se elektrohemijska reakcija na elektrodi odvija većom brzinom nego što reagujuće čestice difuzijom pristižu iz dubine rastvora na površinu elektrode, u jednom trenutku će koncentracija reagujuće supstance na elektrodi postati jednaka nuli ($C_S = 0$). Struja koja tada protiče kroz elektrodu i_L , naziva se granična difuziona struja, a odgovara maksimalnoj brzini prispevanja reagujućih specija na elektrodnu površinu:

$$i_L = \frac{nFDC_B}{\delta} \quad (19)$$

Postavljajući jednačinu Nernsta za ravnotežne uslove na površini elektrode, kada struja ne teče, i kada zbog protoka struje, koncentracija na površini C_S , postane niža od koncentracije u dubini rastvora, sledi:

$$\Delta E = \eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_B}{C_S} \quad (20)$$

Jednačina (2.20) može se i drugačije formulirati:

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (21)$$

U ovom prikazu, pretpostavljeno je da je aktivaciona polarizacija zanemarljiva u odnosu na koncentracionu polarizaciju, što je veoma blisko realnosti kod gorivnih ćelija koje rade na visokoj temperaturi.

Omska polarizacija predstavlja pad napona u elektrolitu i elektrodama gorivne ćelije pri proticanju struje, a potiče od električnih otpora koji karakterišu ove sredine. Dominantan električni otpor, pa samim tim i omska polarizacija ćelije otpada na elektrolit jer je njegova elektrolitička provodnost neuporedivo manja od provodnosti metalnih provodnika i elektroda. Iz tih razloga uloga jonske provodnosti elektrolita veoma je značajna za rad i radne karakteristike gorivne ćelije. Pošto se proces pro-

vođenja struje i kroz elektrolit, a i kroz elektrode pokorava Omovom zakonu, omska polarizacija, η_{ohm} , se može matematički formulisati izrazom (22):

$$\eta_{ohm} = iR \quad (22)$$

gde je i gustina struje koja protiče kroz ćeliju, a R , ukupan otpor gorivne ćelije koji uključuje otpor metalnih delova elektroda, električnih kontakata i elektrolita [9].

Bilans napona gorivne ćelije

Napon gorivne ćelije U_{cel} čini razlika potencijala elektroda (uključujući polarizacije) umanjena za vrednost omske polarizacije:

$$U_{cel} = E_{kat,i} - E_{an,i} - iR \quad (23)$$

gde su $E_{kat,i}$ i $E_{an,i}$ potencijali katode i anode pri proticanju struje i , sa pripadajućim polarizacijama.

Razvijanjem jednačine (23), nastaje:

$$U_{cel} = E_{kat} - |\eta_{kat}| - (E_{an} + |\eta_{an}|) - iR \quad (24)$$

gde su E_{kat} i E_{an} ravnotežni potencijali katode i anode; η_{kat} i η_{an} su ukupne polarizacije katode i anode.

Jednačina (24) pokazuje da protok struje kroz gorivnu ćeliju izaziva smanjenje napona na gorivnoj ćeliji zbog polarizacija elektroda, i omskog pada napona u elektrolitu.

Iz ovih razloga, permanetni cilj kod projektovanja, konstrukcije i daljeg usavršavanja gorivnih ćelija je minimiziranje pojave polarizacije. Ovo se postiže modifikovanjem konstrukcije gorivne ćelije, unapređenjem konstrukcije elektroda, efikasnijim elektrodnim materijalima, elektrokatalizom, primenom elektrolita veće električne provodnosti, primenom tanjeg sloja elektrolita i drugih komponenata koje sačinjavaju gorivnu ćeliju [10].

Za zadati ćelijski dizajn, polarizacija gorivne ćelije se može smanjiti izmenom operativnih uslova rada (pritisak, temperatura,...). Međutim, za ma koju gorivnu ćeliju, nužan je kompromis između potrebe za postizanjem boljih performansi, koje su tipične za rad na višoj tempe-

raturi i pritisku, sa jedne, i neophodne stabilnosti i veka trajanja komponenata ćelije, sa druge strane [7].

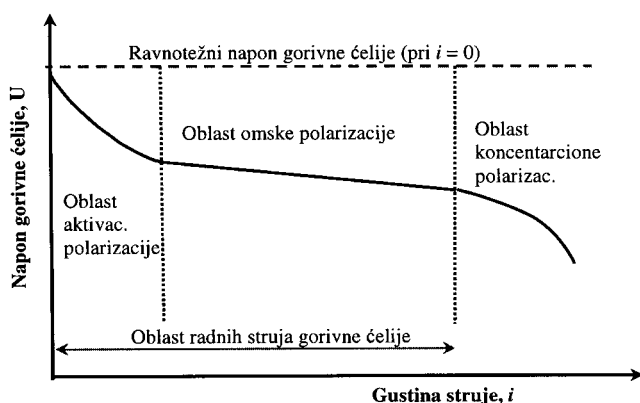
Na slici 4 prikazan je dijagram polarizacija elektroda gorivne ćelije.

Karakteristike i radni parametri gorivne ćelije

Karakteristike gorivne ćelije zavise su od primenjenih radnih parametara (npr. temperature, pritiska, sastava gasa – goriva, iskorišćenja goriva, gustine struje), kao i drugih faktora uticaja – prisutnih nečistoća u gorivu, vremena rada ćelije itd. Menjajući radne parametre ćelije (temperaturu i pritisak), utiče se na promenu karakteristika ćelije, ili pratećih, pomoćnih delova sistema, zbog čega ove uticaje treba brižljivo optimizovati.

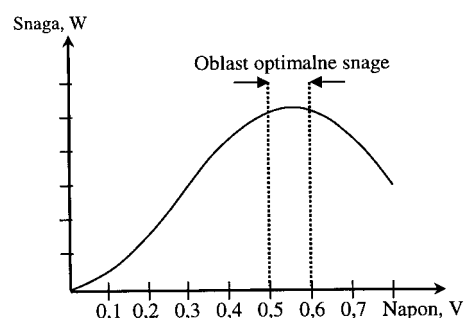
Radni parametri gorivne ćelije zavise od specifičnih zahteva: kao na primer, zahtevana snaga, napon, masa sistema, itd., koji se pred sistem gorivne ćelije kao isporučioća električne energije, stavljaju. Kod definisanja radnih parametara sistema teži se zadovoljenju što više važnih karakteristika sistema, kao što su: najniža cena, najmanja masa, najveća specifična snaga,...). Na primer, projektni zahtev da sistem daje visoku gustinu struje uz male dimenzije i niska kapitalna ulaganja, može se postići, ali po cenu niske efikasnosti (nizak napon baterije) i visokih specifičnih troškova eksploatacije. Ovakav zahtev tipičan je za baterije gorivnih ćelija koji se koriste u vozilima. Rad sistema sa nižom gustinom struje, ali višim naponom povećava efikasnost sistema, snižava operativne troškove, a zbog nužno većih dimenzija, pogodniji je za stacionarne namene. Rad gorivne ćelije sa reaktantima pod višim pritiskom, poboljšava karakteristike sistema i snižava mu cenu, ali traži dodatnu energiju (i troškove) za prethodno sabijanje gasova (reaktanata) i podrazumeva skuplja konstrukciona rešenja samog sistema za takve uslove rada, što povećava kapitalna ulaganja [6].

Za mnoge namene, a i za određivanje optimalne konstrukcije i radnih parametara gorivne ćelije, potrebno je imati u vidu zavisnost snage gorivne ćelije od radnog napona. Električna snaga gorivne ćelije, kao proizvod radnog napona i odgovarajuće struje ćelije, u zavisnosti od napona, ima tipičan izgled predstavljen na slici 5 [1].



Slika 4. Tipični izgled polarizacione krive gorivne ćelije

Figure 4. A typical polarization curve of a fuel cell



Slika 5. Tipičan izgled zavisnosti snage gorivne ćelije, sa vodonikom kao gorivom, od radnog napona ćelije

Figure 5. A typical fuel cell power dependence, with hydrogen as the fuel, on the working voltage of the cell

Za gorivnu ćeliju čija je zavisnost snage od napona predstavljena na slici 5, zapaža se da maksimum snage odgovara oblasti napona od 0,5 do 0,6V. Međutim, pošto, kao što je poznato, efikasnost gorivne ćelije opada sa porastom napona, potrebno je odrediti da li dati prednost visokoj efikasnosti ćelije (što podrazumeva snagu manju od maksimalno moguće), ili pri maksimalno mogućoj snazi ćelije, prihvatiti nižu efikasnost, što prvenstveno zavisi od njene namene.

TIPOVI GORIVNIH ČELIJA

Gorivne ćelije se mogu podeliti prema tipu elektrolita koji koriste, a elektrolit, dalje, određuje radnu temperaturu ćelije, koja među različitim tipovima gorivnih ćelija, veoma varira.

Visoko–temperатурne ćelije rade na temperaturama iznad 600°C, i zbog toga omogućuju spontan unutrašnji reforming lakih ugljovodonika u prisustvu vode, kakav je npr. metan. Unutrašnji reforming eliminiše primenu posebnog reformera goriva i dozvoljava upotrebu i drugih goriva (ugljovodonika), pored čistog vodonika, što povećava ukupnu efikasnost gorivne ćelije za oko 15%. U tom slučaju, u elektrohemijском procesu u visoko–temperатурnim ćelijama, pored pretvaranja hemijske energije reakcije vodonik–kiseonik, u električnu energiju uz nastajanje vode, i hemijska energija reakcije ugljen–monoksida i kiseonika pri čemu nastaje ugljen dioksid, takođe biva transformisana u električnu energiju [11].

Zbog rada na visokoj temperaturi, ova vrsta gorivne ćelije nije pogodna za brz start, ali oslobađa visoko–temperатурnu otpadnu toplotu koja je pogodna za iskorišćavanje u različite svrhe.

Visoko–temperатурne gorivne ćelije ne zahtevaju skupe katalitičke elektrodne materijale na bazi platinskih metala, ali zbog rada na visokim temperaturama podležu intenzivnijoj koroziji, pa podrazumevaju primenu kvalitetnih konstrukcionih materijala.

Najznačajnije visoko–temperатурne gorivne ćelije su ćelije sa elektrolitom od istopljenog karbonata (uobičajena skraćena u literaturi, MCFC) i ćelija sa elektrolitom od čvrstih oksida (SOFC) [12].

Nisko–temperатурne gorivne ćelije rade na temperaturama nižim od 250°C. Ove temperature ne omogućuju unutrašnji reforming goriva, pa je potrebno snabdeti ih izvorom čistog vodonika, odnosno spoljašnjim reformerom. Nisko–temperатурne gorivne ćelije su pogodne za brz start, a manje su izložene riziku od korozionog oštećenja konstrukcionih materijala. Najznačajniji tipovi nisko–temperатурnih ćelija su ćelija sa alkalnim elektrolitom (skraćeno, AFC), ćelije sa elektrolitom od fosforne kiseline (skraćeno, PAFC), i ćelije sa proton–izmenljivom membranom (ćelije sa elektrolitom – čvrstim polimerom) (skraćeno, PEFC) [12].

Pored pomenutih vrsta gorivnih ćelija koje su do sada bile i najzastupljenije u komercijalnoj upotrebi, danas se javljaju i novi tipovi gorivnih ćelija koje imaju najrazličitije namene – pa su im i konstrukcije specifične.

Ove ćelije često koriste i drugačija goriva (npr. metale, cink, aluminijum,...); priključuju im se druge energetske mašine radi povećavanja ukupne efikasnosti (hibridne gorivne ćelije), itd. [13].

Gorivna ćelija sa elektrolitom od istopljenog karbonata (MCFC)

Gorivna ćelija sa elektrolitom od istopljenog karbonata radi na temperaturi od 650°C i pritisku od 1 do 10 bara, a daje napon od 0,7 do 1,0 V. Ćelija ovog tipa koristi rastop mešavine Li_2CO_3 i K_2CO_3 koja je smešten u strukturu matrice od litijum–aluminata na koju sa obe strane naležu elektrode. Na radnoj temperaturi, elektrolit ima konzistenciju paste koja u konstruktivnom rešenju baterije, omogućuje zaptivanje ćelija.

Gorivne ćelije sa istopljenim karbonatom postižu do 60% efikasnosti pri transformaciji energije goriva u električnu energiju, ali ako se otpadna toplota iskorišćava posredstvom efikasnih sistema za rekuperaciju, ukupna efikasnost se povećava i do 80%. Da sada postoje jedinice snage od 2MW, koje su u funkciji, a postoje projekti gorivnih ćelija spremni za realizaciju, snage do 100 MW [13].

Dobre strane ćelije sa istopljenim karbonatom su brojne: omogućuje unutrašnji spontani reforming ugljovodoničnih goriva, daje visoko–temperатурnu otpadnu toplotu, pokazuje dobru reakcionu kinetiku, ima visoku efikasnost, ne zahteva katalizatore od plemenitih metala.

Gorivna ćelija sa istopljenim karbonatom ima i izvesnih nedostataka, kao, na primer: zbog visoke radne temperature, zahteva visoko–kvalitetnih konstrukcionih materijala otpornih na koroziju, elektrodni materijali degradiraju hemijski i dimenziono, što vodi opadanju radnih karakteristika ćelije. Zamena jeftinih elektoda od niki–oksida, platinom, otklanja ovaj problem, ali veoma povećava kapitalna ulaganja kod izgradnje gorivne ćelije. Visoka osetljivost na sumpor. (Inaktivacija anodne reakcije gorivne ćelije, pri sadržaju sumpora većem od 1–5 ppm, u obliku H_2S , značajno snižava karakteristike ćelije); upotreba tečnog elektrolita, sa problemima koje rukovanje takvim elektrolitom proizvodi (zaptivanje, veća mogućnost korozije, održavanje konstantnog sastava,...); relativno dugo vreme pripreme (predgrevanja), su nepovoljne karakteristike da bi se gorivna ćelija sa istopljenim karbonatom stavila u funkciju.

Gorivna ćelija sa istopljenim karbonatom može da radi sa čistim vodonikom kao gorivom, ali takođe i sa lakim ugljovodonicima.

Kombinujući katodne i anodne reakcije, dobijaju se zbirne reakcije gorivne ćelije sa istopljenim karbonatom:



Gorivna ćelija sa istopljenim karbonatom proizvodi vodu bez obzira na primenjenu vrstu goriva, a ugljen di-

oksid, ako se koristi ugljovodonično gorivo. Oba produkta je neophodno kontinualno eliminisati iz sistema, da bi se reakcije u ćeliji vodile u potrebnom pravcu, uz zadovoljavajuću kinetiku.

Gorivna ćelija sa elektrolitom od čvrstog oksida (SOFC)

Elektrolit, kod ovog tipa ćelija sastoji se od čvrstih oksida, najčešće cirkonijuma stabilizovanog nekim od lantanida (npr. itrijumom), a ima formu i konzistenciju keramičkog materijala. Anoda ovog tipa ćelija su od poroznog nikal-cirkonijum metalokeramičkog materijala, a katoda je izrađena od magnezijuma dopovanog lantan-manganatom.

Ćelije sa elektrolitom od čvrstog oksida imaju tubularnu ili pločastu konstrukciju, da bi se olakšalo zaptivanje i povezivanje pojedinačnih ćelija u bateriju. Ovaj tip ćelija može dati napon od 0,8 do 1V, radi na temperaturi od oko 1000°C i pod pritiskom 1 bar, pri čemu postižu efikasnost transformacije energije goriva u električnu energiju od 45%, dok, kod ćelije pod povišenim pritiskom, efikasnost može da poraste do 60%.

Ćelije sa elektrolitom od čvrstog oksida rade i do 30.000 sati, a pri naponu od 0,6 V po ćeliji, daju gustinu struje od 2.600 A/m².

Gorivna ćelija sa elektrolitom od čvrstog oksida ima niz dobrih osobina, kao na primer: omogućava spontani unutrašnji reforming ugljovodoničnih goriva; može da koristi gotovo svako gasovito gorivo, koje može biti suvo ili vlažno; proizvodi visokotemperaturnu otpadnu toplotu koja se lako može iskoristiti; ima dobru reakcionu kinetiku i visoku efikasnost; može da radi sa većim gustinama struje od ćelija sa istopljenim karbonatom; koristi čvrst elektrolit, što pojednostavljuje rukovanje i održavanje; ne zahteva skupe katalizatore od plemenitih metala.

Međutim, ovaj tip gorivnih ćelija ima i izvesne nedostatke: Zahteva specifične materijale tražene električne provodnosti kompatibilne sa drugim materijalima u ćeliji koji ostaju u čvrstom stanju na visokoj temperaturi, zadržavajući pri tome dimenzionu stabilnost; izabrani materijal mora da je dovoljne gustine da spreči mešanje gasovitog goriva i oksidansa sa kojim je u stalnom kontaktu, uz uslov da neophodnu otpornost na gasnu koroziju, zadrži dovoljno dugo, što predstavlja značajan problem ovih ćelija. Ovaj tip gorivnih ćelija pokazuje značajnu osetljivost na sumpor koja je manja nego kod ćelije sa istopljenim karbonatom, ali ostaje u granicama prisustva ukupnog sumpora do 50 ppm. Pri većem sadržaju sumpora u gorivu, radne karakteristike ćelije se snižavaju.

Gorivna ćelija sa čvrstim oksidom može da koristi ili čist vodonik, ili ugljovodonično gorivo, kao i ćelija sa istopljenim karbonatom, pa je moguće ćeliju snabdevati i smešom vodonika i ugljenmonoksida.

Zbirna reakcija u ćeliji se može predstaviti jednačinom (26):



Gorivna ćelija sa čvrstim oksidom pri radu, bez obzira na vrstu goriva, proizvodi vodu, a ako koristi ugljovodonično gorivo, i ugljendioksid. Oba ova proizvoda moraju se kontinualno uklanjati sa katode da bi se reakcija odvijala potrebnom dinamikom [1].

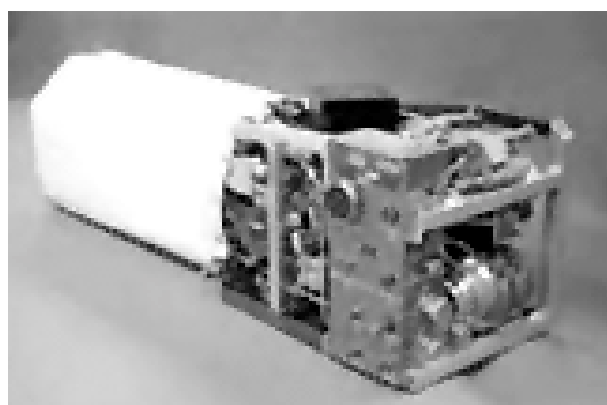
Alkalna gorivna ćelija (AFC)

Alkalna gorivna ćelija radi sa elektrolitom koji tipično sadrži rastvor KOH, i može biti pokretan i nepokretan. Pokretni elektrolit kontinualno cirkuliše pored elektroda odnoseći vodu koja nastaje kao proizvod reakcija i otpadnu toplotu. U ćelijama sa nepokretnim elektrolitom, proizvedena voda isparava u struju vodonika kojom se anoda snabdeva, i naknadno se izdvaja kondenzacijom [1].

Pošto je sporedni proizvod rada ove vrste ćelija čista, na nepristupačnim mestima, dragocena – voda, Američka nacionalna agencija za svemirska israživanja NASA je još 1960. godine upotrebila baterije ovih ćelija kompanije Pratt&Whitney za opremanje svemirskih brodova Gemini programa. Svemirska letilica za višekratnu upotrebu, Space Shuttle, i danas koristi gorivne ćelije ovog tipa za snabdevanje kabinskog prostora električnom energijom [14].

Alkalne ćelije rade pri temperaturi od 65 do 220°C i pritisku od oko 1 bar, proizvodeći napon na pojedinačnoj ćeliji od 1,1 do 1,2 V. Na slici 6 prikazan je izgled gorivne ćelije sa alkalnim elektrolitom.

Alkalna gorivna ćelija u eksploataciji pokazuje niz dobrih osobina, kao što su: rad na niskoj temperaturi; veoma brzo startuje i daje oko 50% snage već pri tem-



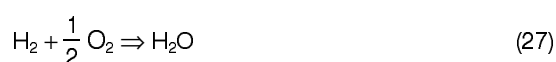
Slika 6. Fotografija baterije alkalnih gorivnih ćelija koja se ugrađuje u letilicu Space Shuttle (sadrži 96 pojedinačnih ćelija ukupne dimenzije: 35x37,5x112 cm, masa 118 kg, snaga 12 kW, 28V, 70% električna efikasnost)

Figure 6. Picture of an alkaline battery of fuel cells built into the Space Shuttle (containing 96 single cells, total dimension: 35x37,5x112 cm, mass 118 kg; power 12 kW, voltage 28 V, 70% electrical efficiency)

peraturi okoline; ima visoku efikasnost (do 70%); zahteva veoma malo, ili nimalo, skupih platinskih materijala za katalizovanje elektrodnih reakcija; trpi minimalnu koroziju; ima malu zapreminu i masu

Među nedostatkama gorivne ćelije sa alkalnim elektrolitom ubraja se: Pokazuje značajnu osetljivost na prisustvo CO₂ (oko 350 ppm, max.), i relativnu osetljivost na prisustvo CO, što je ozbiljan nedostatak jer u ulozu oksidansa zahteva ili čist kiseonik, ili vazduh iz koga je prethodno uklonjen ugljendioksid; koristi tečni elektrolit, što uključuje probleme manipulacije takvim elektrolitom; zahteva složen sistem upravljanja vodom koja je produkt rada ćelije; relativno kratak vek trajanja.

Alkalna gorivna ćelija pri radu kao gorivo koristi čist vodonik, oslobođen ugljen-dioksida, a zbirna reakcija ove gorivne ćelije je:



Voda koja nastaje kao produkt rada gorivne ćelije sa alkalnim elektrolitom mora se kontinualno udaljavati iz ćelije, pri čemu, u sistemu sa nepokretnim elektrolitom voda isparava i uključuje se u struju vodonika kojim se snabdeva anoda odakle se lako kondenzuje i izdvaja, odnosno, u sistemu sa pokretnim elektrolitom, napušta ćeliju zajedno sa elektrolitom.

Gorivna ćelija sa elektrolitom sa fosforom kiselinom (PAFC)

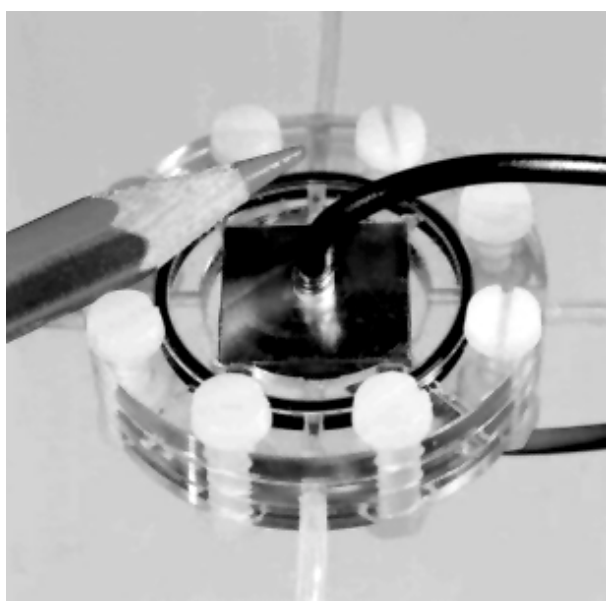
Gorivne ćelije sa fosforom kiselinom spadaju u najzreliji proizvod tehnologije gorivnih ćelija, koji je više od dvadeset godina sistematski razvijan da bi dostigao komercijalnu valorizaciju.

U gorivnoj ćeliji sa fosforom kiselinom vodonični joni se prenose od anode ka katodi kroz elektrolit koji sačinjava fosforna kiselina. Ova gorivna ćelija radi na temperaturi od 150 do 205°C, pri pritisku od 1 bar, pri radnom naponu od oko 1,1 V.

Gorivne ćelije sa fosforom kiselinom opremljene su elektrodama od platinom impregniranog poroznog, grafitnog materijala. Postrojenje gorivnih ćelija ovog tipa ima efikasnost od 36 do 42%, a dozvoljava gustinu energije od 5,5 kW/m² aktivne površine ćelije [13].

Najznačajnije povoljne osobine ove gorivne ćelije sa fosforom kiselinom su: visoka tolerantnost na ugljen-dioksid (do 30% vol.), zbog čega je u gorivnoj ćeliji ovog tipa moguće koristiti neprečišćen oksidans (vazduh); rad na niskoj temperaturi, ali višoj nego kod drugih nisko-temperaturnih gorivnih ćelija, zbog čega, proizvodi kvalitetniju otpadnu toplotu, upotrebljivu za različite namene; stabilne osobine elektrolita uz nisku isparljivost (čak kada je radna temperatura 200°C).

Gorivne ćelije sa elektrolitom sa fosforom kiselinom ima i neke nepovoljne osobine: nedovoljna tolerantnost na ugljen-monoksid; (samo do 2% vol.); niska tolerantnost na sumpor, (do 50 ppm ukupnog sumpora);



Sljka 7. Izgled gorivne ćelije koja direktno koristi kao gorivo metanol, kao izvor napajanja mobilnog telefona [15]

Figure 7. Design of a fuel cell that directly uses methanol as a fuel for supplying power to a mobile telephone [15]

koristi koroziono-aktivan elektrolit koji na radnoj temperaturi izaziva koroziona oštećenja opreme; koristi tečni elektrolit, sa svim problemima koji prate rukovanje tečnim elektrolitom, uključujući postepeno isparavanje; voda nastala u procesu razblažuje elektrolit; velika masa i zapremina ćelije; ne omogućuje unutrašnji reforming ugljovodoničnih goriva; zahteva prethodno predgrevanje do uspostavljanja radne temperature.

Zbirna reakcija u ćeliji sa fosforom kiselinom data je jednačinom:



Voda koja se generiše reakcijom u gorivnoj ćeliji ovog tipa sakuplja se u oblasti katode. Ovu vodu je neophodno kontinualno udaljavati da bi se održala potrebna kinetika reakcija u ćeliji.

Gorivna ćelija sa proton–izmenljivom membranom (PEMFC)

Gorivna ćelija sa proton–izmenljivom membranom – čvrstim polimerom kao gorivo koristi vodonik. Elektrolit se sastoji od čvrstog polimernog filma koji ima formu acidifikovanog teflona. Ova vrsta ćelija radi na temperaturama od 70 do 90°C i pritisku od 1 do 2 bara, pri radnom naponu od oko 1,1 V.

Elektrode ove vrste ćelije se impregniraju malom količinom platine (oko 18 g/kW), a eksperimentalni primeri nove generacije ćelija već rade sa redukovanom količinom platine na 1 g/kW. Ćelije sa proton–izmenljivom membranom postižu veće specifične snage, po jedinici površine i zapremine, u odnosu na druge vrste gorivnih ćelija (npr. i do 150 kW/m³). Efikasnost transformacije energije od goriva do električne energije se kreće oko 45%, uz vek trajanja ćelije do 30.000 radnih časova [13].

Povoljne osobine gorivne ćelije sa proton–izmenljivom membranom su: dobra tolerantnost na ugljen–dioksid, zbog čega se može koristiti neprečišćen oksidans (vazduh); niska radna temperatura, što pojednostavljuje izbor konstrukcionih materijala, omogućuje brz start ćelije i povećava sigurnost u radu (potpuna operativnost ćelije postiže se u roku od 3 minuta); koristi čvrst, suv elektrolit, što eliminiše manipulaciju tečnostima i kretanje elektrolita; koristi koroziono ne–agresivan elektrolit; visoka vrednost napona na ćeliji, velike gustine radne struje i specifične snage ćelije; rad pod niskim pritiskom što unapređuje bezbednost; kompaktna, robusna i jednostavna konstrukcija.

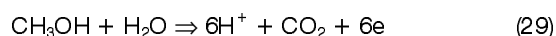
Među značajnije nedostatke gorivne ćelije sa proton–izmenljivom membranom ubraja se: niska tolerantnost na sadržaj CO; ćelija podnosi samo do 50 ppm ugljen–monoksida; minimalna tolerantnost na sumporna jedinjenja (svega nekoliko ppm); zahteva ovlaživanje reagujućih gasova što podrazumeva značajan utrošak energije, a to smanjuje količinu otpadne toplote koja se može eksterno iskoristiti, dok sistem čini konstruktivno složenijim; zahteva platinski katalizator i skupu membranu što povećana kapitalna ulaganja.

U ćeliji sa proton–izmenljivom membranom reaguju vodonik i kiseonik. Reakcije na elektrodama, i zbirna reakcija u gorivnoj ćeliji je identična kao odgovarajuće reakcije u ćeliji sa fosfornom kiselinom.

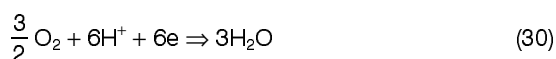
Gorivna ćelija sa direktnim korišćenjem metanola (DMFC)

Gorivna ćelija sa direktnim korišćenjem metanola može da koristi metanol kao gorivo – direktno, bez prethodnog reforminga do vodonika, uz efikasnost transformacije u električnu energiju od oko 40%. Mada je energetski efekat ovakve varijante procesa u gorivnoj ćeliji manji nego ako se kao gorivo koristi sam vodonik, konstrukcija gorivne ćelije se veoma pojednostavljuje jer ne zahteva složen i skup sistem za napajanje vodonikom [3].

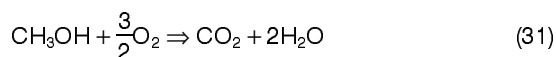
U ćeliji koja direktno koristi metanol, mešavina metanola i vode se neposredno dovodi na anodu, a vazduh na katodu. Na temperaturi od oko 130°C, katalizator od plemenitih metala razlaže metanol prema reakciji:



Kiseonik iz vazduha se na katodi jonizuje i reaguje sa vodoničnim jonima nastalim u reakciji (jednačina 29):



Na bazi reakcija na elektrodama, ukupna reakcija u gorivnoj ćeliji sa direktnom upotrebom metanola je prikazana jednačinom:



Na slici 7 a i b prikazan je izgled minijaturne gorivne ćelije sa direktnim korišćenjem metanola, kao izvor napajanja za mobilni telefon, i njene veličine u poređenju sa vrhom olovke.

Gorivna ćelija sa direktnim korišćenjem metanola spada u red perspektivnih autonomnih hemijskih izvora električne energije. Kod primene na vozilima, ovakav energetski izvor, na primer, daje mogućnost jednostavnog rešenja snabdevanja gorivom iz običnog rezervoara, odnosno, pruža jeftinu autonomiju, za razliku od drugih gorivnih ćelija koje nužno skladište gasovito ugljovodonično gorivo ili čist vodonik.

Novi tipovi gorivnih ćelija

Pored do sada razvijenih gorivnih ćelija, u različitim fazama ispitivanja je čitav niz originalnih gorivnih ćelija koje ukazuju na pravce daljeg razvoja ove dinamične oblasti.

U razvoju novih gorivnih ćelija zapaža se težnja ka eliminisanju najznačajnijih nedostataka postojećih sistema: niska tolerantnost prema ugljendioksidu, ugljenmonoksidu, jedinjenjima sumpora; povećanje specifične snage, gustine struje ili radnog napona, eliminisanje skupih katalitičkih materijala i uvođenje novih konstrukcionih materijala otpornijih na koroziju [16].

Najintenzivniji razvoj novih tipova gorivnih ćelija događa se, međutim, u oblasti transporta. Imajući u vidu da transport na bazi fosilnih goriva, u globalnim razmerama figuriše kao jedan od najvećih zagađivača, gorivna ćelija nalazi svoje mesto kao ekološki bezbedan energetski izvor, tako da danas u operativnoj upotrebi ima skutera, automobila, brodova, podmornica, čak i specijalnih izviđačkih, bespilotnih aviona koje pokreće gorivna ćelija [16].

Tipičan primer usmerenog razvoja novog soja gorivnih ćelija je tzv. reverzibilna gorivna ćelija sa proton–izmenljivom membranom. Reverzibilna ćelija može da radi kao gorivna ćelija, ali i kao elektrolizer. Ovakav model gorivne ćelije daje specifičnu energiju od oko 450 Wh/kg, što je oko deset puta više od svakog drugog hemijskog izvora struje.

Model reverzibilne gorivne ćelije je ispitivan na lakoj bespilotnoj letilici (Lorens Livermore Nat. Lab, Monrovia, California, USA u okviru svojih istraživačkih aktivnosti u vojnom programu), kao solarno napajan hibrid. Letilica Pathfinder je 1995. godine koristeći reverzibilnu gorivnu ćeliju, ostala na visini od 15.400 m, 11 časova. Novu generaciju ovih letilica štiti informativni embargo, ali se smatra da je generacija gorivne ćelije – hibrida sa solarnim napajanjem nauporedivo bolja.

Direktna ugljenična gorivna ćelija zasniva se na direktnoj konverziji ugljenika, u elektrohemijском procesu na elektrodi, uz kiseonik kao oksidans. Pri tom nastajaje ugljen dioksid i električna energija. Ćeliju je razvila Lorens Livermore National Laboratory, USA. Izvor ugljenika može biti veoma različit – ugalj, petrol–koks, lignit, prirodni gas, petrolej, biomasa i td. Čestice ugljenika su, za primenu kao gorivo u ovom tipu gorivne ćelije veoma sitne, a dispergovane su u istopljenoj smeši karbonata litijuma, natrijuma i kalijuma na temperaturi od 750°C. Ukupna efikasnost ovog tipa gorivne ćelije je oko 70 do 80%, uz specifičnu snagu od 1 kW/m² toplote raspoložive za eksterne namene. Ćelija je još u fazi razvoja, a koncept je potvrđen na eksperimentalnim modelima malih snaga [13].

Hibridnu ćeliju sa elektrolitom od čvrstog oksida razvija kompanija Siemens–Westinghouse, a sačinjava je gorivna ćelija sa elektrolitom od čvrstog oksida koja kao gorivo koristi prirodni gas pod visokim pritiskom, i pridružena mikroturbina koju pokreću izlazni gasovi pod visokim pritiskom, odvođeci otpadnu toplotu. Ovakav koncept, inače, danas predstavlja poslednju reč u tehnologiji gorivnih ćelija, kad su u pitanju stacionarna postrojenja koja proizvode struju i kvalitetnu dodatnu toplotu. Mikroturbina kod ove ćelije pokreće električni generator koji proizvodi dodatnih min. 10% električne energije. Ovakav sistem, u transformaciji hemijske energije prirodnog gasa u električnu energiju trenutno postiže ukupnu efikasnost oko 60%, a očekuje se dostizanje efikasnosti veće od 70%. U eksperimentalnom radu postoji više sistema hibridnog tipa sa najvećom pojedinačnom snagom od 200 kW, dok je u izgradnji jedinica od 1 MW [17].

Baterije gorivnih ćelija

Individualna gorivna ćelija zbog skromnih karakteristika, sama, nema primenu. Radni napon efikasnih ćelija retko prelazi 1V, a pri značajnijim vrednostima gustine struje u radu ćelije, napon zbog polarizacija najčešće pada na 0,5–0,6 V, pa je za tehničku primenu, pojedinačne gorivne ćelije potrebno povezati u grupe – baterije.

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 gorivna 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 gorivna ćelija se sastoji od elektrodne grupe sa membranom, koju čine anoda, katoda, elektrolit i katalizator, a smeštena je između grafitnih ploča sa kanalima kroz koje se sa različitih strana elektrodne grupe, dovode gorivo i oksidans. Istovremeno, da bi se kontrolisala radna temperatura, ćeliju je potrebno hladiti (neke tipove ćelija pre startovanja treba i zagrevati), što se ostvaruje posebnim grafitnim pločama koje razdvajaju susedne ćelije u bateriji, a u sebi sadrže kanale za cirkulaciju medijuma za hlađenje/zagrevanje. Električni kontakti kojim se svaka ćelija uključuje u bateriju mogu biti integrisani u ploče za hlađenje/grevanje. Celokupan ansambl niza gorivnih ćelija sa svim sačinjavajućim elementima u bateriji, mehanički se učvršćuje u celinu na pogodan način. U dizajniranju baterije, posebna pažnja se posvećuje zaptivanju svih elemenata da bi se sprečilo nekontrolisano mešanje goriva i oksidansa, curenje (tečnog) elektrolita ili reakcionih gasova i td, što se rešava odgovarajućim sistemom zaptivanja i veoma preciznom izradom svih elemenata baterije [1].

Elektroliti u svim gorivnim ćelijama moraju ispunjavati nekoliko osnovnih funkcija, i to: da budu provodnici za protone, izolatori za elektrone, a separatori za gasove. Istovremeno, elektrolit, ako je čvrst, treba da ima dobre mehaničke osobine i dimenzionu stabilnost, visoku jonsku provodljivost i da se može lako mehanički obrađivati.

GORIVA ZA GORIVNE ĆELIJE

Prve gorivne ćelije u komercijalnoj upotrebi (alkalne gorivne ćelije), radile su na čist vodonik, da bi se razvojem ove oblasti pojavili i drugi tipovi gorivnih ćelija koje za rad koriste i ugljovodonike, pa i druga goriva (metanol, amonijak, neke metale ili ugljenik). Čist vodonik se najjednostavnije može dobiti elektrolizom vode, ili razlaganjem hidrida međutim, takav vodonik je skup i ne daje željenu ekonomiju rada, pa se koristi jedino u gorivnim ćelijama specifične namene.

Značajan izvor vodonika su i procesi u kojim se ovaj gas javlja kao sporedni proizvod, sam ili sa drugim gasovima. Tako, na primer, Japan, kao jedna od vodećih zemalja u tehnologiji gorivne ćelije bilansno oslanja državne potencijale u vodoniku na odgovarajuće krupne industrijske kapacitete gde se ovaj gas javlja: koksare, rafinerije i postrojenja za elektrolitičku proizvodnju hlora – "hlor–alkalne elektrolize" (ukupno 9,3·10⁹ Nm³ vodonika godišnje) [18].

U razvoju gorivnih ćelija, međutim, zapaža se oštar zaokret prema jeftinim izvorima goriva koji je započeo 1992. godine, kada je u Kaliforniji (Penerose, Sun Valley), instalirana prva baterija gorivnih ćelija koja radi na bio–gas iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda. Ovaj pristup iskorišćavanju jeftinog raspoloživog goriva se ubrzo raširio, prvo u USA – Njujork, Portland, a zatim i drugim velikim gradovima. U Rentonu (država Vašin-

gton), na bazi takvog izvora gasa ubrzo je izgrađeno postrojenje gorivnih ćelija instalisane snage 1 MW. Danas je postalo uobičajeno da se velike komunalne depozije u razvijenim zemljama SAD, Evrope i Dalekog Istoka, posebno, Japana (Tokio, Sapporo, Yokohama, Fukuoka itd.), po pravilu opremaju postrojenjem gorivnih ćelija koje proizvedenu električnu energiju troše za sopstvene potrebe, višak prodaju državnoj distributivnoj mreži, a otpadnu toplotu plasiraju kroz servisiranje komunalnih potreba, poboljšavajući tako ukupnu ekonomiju procesa odlaganja otpada.

Da bi se iz raspoloživih, jeftinih goriva, dobio gas bogat vodonikom koji se može koristiti kao gorivo za rad gorivne ćelije, izabrano gorivo se mora razložiti na vodonik i druge komponente, što zahteva da se gorivnoj ćeliji pridoda i uređaj za reforming.

Reforming

Proces prerade različitih supstanci (sirovog goriva) u gorivo pogodno za anodnu reakciju gorivne ćelije putem reforminga nužno obuhvata fazu eliminisanja štetnih supstanci koje smanjuju efikasnost anodne reakcije. U zavisnosti od specifičnih potreba određenog tipa gorivne ćelije, proces pripreme goriva može sadržavati različite faze. Tako, uopšteno posmarajući, proces reforminga sirovog goriva sadrži:

- Prečišćavanje kojim se iz potencijalnog goriva (ugljevodonika) uklanjaju štetni sastojci, kao na primer, sumpor, halogenidi i amonijak;
- konverziju ugljevodonika u vodonikom bogat gas;
- konverziju ugljenmonoksida, uz pomoć vodene pare iz nastalog gasa, u ugljen dioksid i vodonik;
- selektivnu oksidaciju preostalog CO do CO₂,
- kondenzaciju i izdvajanje vode iz procesa.

Uobičajeno je da se reforming proces, koji je endoterman, održava dovođenjem dela toplote koja se stvara u radu (visokotemperaturne) gorivne ćelije, što omogućuje da gorivna ćelija bude integralno postrojenje sposobno da samostalno radi.

Vodonik kao gorivo

Vodonik je najrasprostranjeniji element u Univerzumu. Na našoj planeti, vodonik se ne nalazi u elementarnom stanju, ali ga ima u ogromnim količinama vezanog sa kiseonikom u vodi koja pokriva 70% zemljine kore, i u znatno manjoj, ali značajnoj količini, u fosilnim gorivima. Sa gomilanjem ekoloških problema na planeti (globalno otopljanje, oštećenje ozonskog omotača planete, zagađenje vazduha produktima sagorevanja fosilnih goriva, smanjenje svetskih upotrebljivih resursa vode za piće, globalne klimatske promene, itd.), vodonik se snažno nametnuo kao energent budućnosti [19].

U poređenju sa drugim gorivima, vodonik pokazuje izrazitu energetsku superiornost, što se može najbolje videti iz vrednosti toplotnih moći vodonika, benzina, dizel goriva i prirodnog gasa prikazanih u tabeli 4.1.

Tabela 1. Tabela toplotnih moći najvažnijih tehničkih goriva
Table 1. Table of the heat capacity of the most important technical fuels

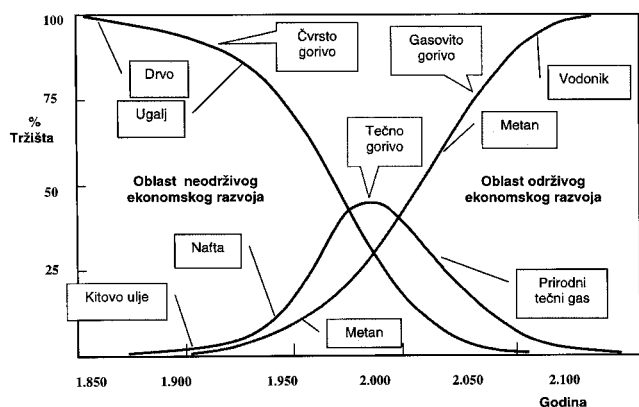
Toplotna moć	G o r i v a				
	Vodoni- k	Benzin	Disel D-2	Propan	Prirodni gas
Gornja toplotna moć, MJ/kg	141,9	43,8–47,5	44,6–46,5	50,2	54,9
Donja toplotna moć, MJ/kg	119,0	41,9–44,2	41,9–44,2	46,1	49,6

Upoređujući podatke iz tabele 1 zapaža se da vodonik ima između 2 i 3 puta veću toplotnu moć od drugih tehničkih goriva. Uz činjenicu da sagorevanjem vodonika nastaje čista voda, a kod svih drugih goriva, nezaobilazni produkti sagorevanja su, pored vode, i štetni gasovi CO, CO₂, NO_x, SO₂, itd. u zavisnosti od tipa i čistoće goriva, vodonik je jedino gorivo koje ekološki ni malo ne opterećuje planetu. Pošto se iz vode ponovo može dobiti različitim postupcima, vodonik se tretira kao obnovljivi izvor energije.

Očigledno izvanredno povoljne osobine vodonika su još pre više od trideset godina navele istraživače i energetičare da postave model tzv. "Globalne vodonične ekonomije", što je sinonim za privredu zasnovanu na vodoniku kao univerzalnom energentu. Umesto fosilnih goriva, vodonik bi bio osnovni energent, a na mestima gde je potrebno, transformisao bi se u potreban vid energije (električnu, toplotnu, itd.). Tada, tek smela predviđanja istraživača i teoretičara razvoja civilizacije, danas dobijaju punu afirmaciju jer, zbog ranije pomenutih globalnih ekoloških problema, najrazvijenije zemlje sveta su konačno spremne da svoje najvitalnije interese u ekonomiji sagledaju u novom svetlu perspektive čovečanstva. Jak razlog da se gorivna ćelija razvije je i proklamovana "Politika održivog razvoja" koja je kao univerzalni proces definisana u poslednjoj deceniji dvadesetog veka. Politika održivog razvoja postavlja za cilj ekonomski razvoj čovečanstva, ali uz uslov neugrožavanja životne sredine na planeti, što garantuje trajni opstanak čovečanstva.

Sporazum o ograničavanju emisije ugljen-dioksida, donet 1997. godine u Kjotou, koji treba da ima globalni značaj, još nije ratifikovan od strane USA i još nekih zemalja [20]. Osnovni razlog taktiziranja velikih razvijenih država je što sporazum predstavlja oštar ograničavajući faktor razvoja pošto zahteva brz prelazak na čistije izvore energije. Ovakva konotacija sporazuma iz Kjotoa predstavlja dodatni stimulans za brže prihvatanje novih izvora energije, pa samim tim i vodonične ekonomije.

Najbolja potvrda da su se stekli uslovi za napredak u oblasti vodonične ekonomije je činjenica da su, prevazišavši rivalstvo, sredinom juna 2003. godine najviši



Slika 8. Globalno tržište energenata u prošlosti i prognoze za budućnost

Figure 8. Global market of energy sources in the past and forecast for the future

državni zvaničnici Evropske Unije i SAD potpisali istorijski dokument o daljem zajedničkom razvoju vodonične ekonomije, što će, kako se očekuje, dramatično ubrzati razvoj ove oblasti [21].

Energetska zasnovanost privrede u globalnim razmerama, sa prijavih fosilnih goriva, kao što je ugalj i nafta, prema predviđanjima, ubrzano se kreće ka čistijim izvorima energije. Na slici 8 prikazana je struktura svetskog tržišta energenata u poslednjih sto pedeset godina i predviđanja za narednih sto godina [2].

Prognoze prikazane na slici 8 pokazuju da će čvrsta goriva nestati sa svetskog tržišta već sredinom, a tečna, krajem XXI veka, dok će vodonik, do kraja ovog veka postati, praktično, jedini energent u svetskim razmerama, što ujedno znači globalno prihvatanje vodonične ekonomije.

S obzirom da transport zasnovan na fosilnim gorivima već danas predstavlja jedan od velikih ekoloških problema dobro je uporediti produkte koje emituju vozila, po kilometru pređenog puta, a koja za svoje pokretanje koriste benzin u motoru sa unutrašnjim sagorevanjem, odnosno različita goriva za gorivne ćelije. Tako se dobija još jasnija slika izvanrednih osobina vodonika kao goriva. U tabeli 2 prikazan je odnos količina izduvnih gasova dva tipa vozila – sa klasičnim benzinskim motorom i sa elektromotorom pokretanim gorivnim ćelijama, pri čemu se posmatraju gorivne ćelije koje rade na čist vodonik, i gorivne ćelije koje se napajaju vodonikom bogatim gasom dobijenim iz različitih ugljovodoničnih izvora. U ovom poređenju je posmatrana samo vodena para i ugljenična komponenta emisije preračunata na CO₂, a ne i emisija NO_x koja kod benzinskog motora postoji i predstavlja rizičnu komponentu izduvnih gasova, a kod gorivne ćelije, odnosno njom pokretanog električnog motora, ne postoji.

Pregledom podataka iz tabele 2 zapaža se da sagorevanjem benzina u klasičnom motoru dolazi do emisije vodene pare i ugljen dioksida. Gorivne ćelije koje rade na čist vodonik emituju kao produkt rada samo vo-

Tabela 2. Količine i sastav izduvnih gasova automobila na benzinski pogon i vozila koje pokreće gorivna ćelija [22]

Table 2. Quantities and composition of exhaust gases from petrol-driven cars and fuel cell-driven vehicles [22]

Sadržaj izduvnih gasova	Automobil sa benzin. motorom	Automobil pokretan gorivom ćelijom		
	Benzin	Vodonik iz benzina	Vodonik iz metana	Čist vodonik
Vodena para, kg/km	0,11	0,09	0,156	0,07
CO ₂ , kg/km	0,24	0,2	0,043	0

denu paru, što nije slučaj sa ćelijama koje za rad koriste gas bogat vodonikom. Ukoliko se kao gorivo koristi vodonikom obogaćeni gas dobijen iz ugljovodonika, emisija ugljen-dioksida nije nulta, ali je i dalje značajno manja od količine koju emituje benzinski motor. To je jedna od krupnih prednosti gorivne ćelije, bez obzira na gorivo sa kojim radi. Razumljivo je da se kao perspektivnija rešenja tretiraju postupci gde se vodonik dobija procesima koji ne proizvode ugljendioksid, kao sporedni produkt, pa već ima postupaka kod kojih se ugljenik pri reformingu, prevodi u elementarni oblik [23].

Pored niza konvencionalnih postupaka dobijanja vodonika iz vode, koji nisu ekološki održivi (npr. preko vodenog gasa, jer kao nusprodukt ostaje ugljen-dioksid), danas se intenzivno radi na razvoju katalitičkih procesa, gde se voda razlaže direktnom reakcijom na poluprovodničkim fotoelektrodama pomoću sunčeve svetlosti uz nastajanje gasovitog vodonika i kiseonika [24].

Iz vode, vodonik se može jednostavno dobiti i dobro poznatim postupkom elektrolize, međutim, u takav postupak je potrebno uložiti visoko-kvalitetnu električnu energiju, što se čini na mestima gde se raspolaže sa viškom električne energije, npr. sunčevi kolektori; poznate "farme vetra" gde se energija vetra putem turbina specifične konstrukcije pretvara u električnu energiju, geotermalni energetski izvori itd.).

U značajnoj ekspanziji je još jedan nekonvencionalni način dobijanja vodonika, a zasniva se na procesu katalizovanom enzimima. Poznato je da jednoćelijski organizam *cyanobacteria*, apsorbujući sunčevu svetlost, kao produkt svojih metaboličkih funkcija u vodi, proizvodi vodonik. Na usavršavanju ovog procesa se intenzivno radi sa ciljem da se poveća efikasnost soja enzima, a da se uslovi u kojim je enzim biološki najaktivniji, učine što lakše ostvarljivim [25].

Neke od impresivnih osobina vodonika kao gasa, posebno goriva, istovremeno, predstavljaju i kamen spoticanja u tehnologiji gorivnih ćelija. Naime, veoma mala gustina vodonika, predstavlja ozbiljan problem u rešavanju skladištenja vodonika potrebnog za rad ćelije. Za potrebe mobilnih sistema koje energetski obezbeđuje gorivna ćelija, postavlja se pitanje kako skladištiti vo-

donik koji daje potrebnu autonomiju rada. Na primer, kod automobila koji pokreće gorivna ćelija, vodonik se može čuvati u rezervoaru pod pritiskom, ili u obliku jedinjenja iz kojih se lako izdvaja. Da bi se automobilu omogućilo da pređe 500 km sa jednim rezervoarom goriva (vodonika), potrebno je oko 5 kg ovog gasa, a da bi se ova količina gasa smestila u rezervoar veličine današnjeg rezervoara za benzin, potreban je pritisak od oko 1.000 MPa, što je ozbiljan tehnički problem. Maksimalno što se tehnologijom sabijanja vodonika može danas očekivati je oko 300 km autonomije vozila, uz značajno veći rezervoar od prihvatljivog. Ovakva autonomija se smatra nedovoljnim, pa se razvoj usmerava u hidride lakih metala (NaAlH_4 , NaBH_4 , itd.), odnosno prema malim kompaktnim reformerima nove generacije [3].

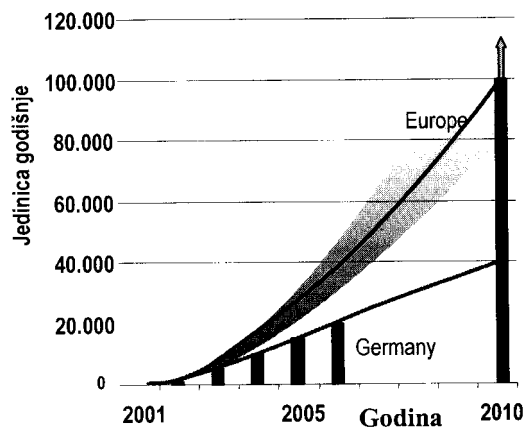
Velika difuzivnost vodonika, koja drastično smanjuje rizik od eksplozije na mestu gde vodonik nekontrolisano ističe iz rezervoara, jer zbog brzine difuzije vodonik teško dostiže oblast eksplozivnih koncentracija, u tehnici zaptivanja cevovoda, rezervoara, ventila itd. predstavlja problem koji ne podrazumeva jeftina rešenja. To je drugi značajan razlog zbog kojeg se na sadašnjem tehničkom nivou, skladištenje vodonika izbegava a teži, ili proizvodnji vodonika "in situ" putem reforminga nekog pogodnog goriva, ili deponovanju vodonika u hidridima [3].

POLITIKA RAZVOJA GORIVNE ČELIJE

Konačni dogovor USA i Evropske Unije o partnerstvu u oblasti razvoja vodonične ekonomije nije slučajno došao tek početkom 21. veka, iako se, kako je naglašeno, o projektu vodonične ekonomije razmišljalo već sedamdesetih godina dvadesetog veka. Naime, prognoze globalnog zagađenja, sa jedne, i procenjena proizvodnja nafte, kao danas još uvek dominantnog energenta, sa druge strane, pokazale su da bi se projektom vodonične ekonomije, oba ova problema lakše savladala. Istovremeno, energetika Evrope i USA, sve više zavisi od prirodnog gasa, što umanjuje, ali ostavlja nerešen problem zagađenja vazduha.

Prognoze pokazuju da se u narednim godinama u Evropskoj Uniji i USA, očekuje smanjivanje proizvodnje sirove nafte, a sličan trend se, sa izvesnim zakašnjenjem, očekuje i na svetskom nivou i rezultiraće kontinuiranim smanjenjem proizvodnje nafte posle 2010. godine [26]. U takvom svetlu, prirodni gas, uz intenzivan razvoj oblasti vodonične ekonomije, koja ide na ruku ekspanziji gorivnih ćelija, predstavlja izlaz, tim pre što istovremeno donosi veoma veliko ekološko rasterećenje planete.

Na ozbiljnost sa kojom velike industrijski razvijene zemlje ulaze u oblast vodonične ekonomije preko gorivne ćelije ukazuje izjava predsednika USA u januaru 2003. godine, u okviru redovnog "Izvestaja o stanju nacije", u kome saopštava "Da je naložio da država u razvoj vodonikom pokretanog automobila uloži 1,2 milijarde dolara". Ovoj sumi, koju država ulaže, treba dodati i veoma značajna sredstva koja ulažu velike samostalne kompanije koje su snažno prisutne na tržištu gorivnih



Slika 9. Prognoza godišnje prodaje gorivnih ćelija u Evropi i Nemačkoj u prvoj dekadi 21. veka

Figure 9. Forecast of annual fuel cell sales in Europe and Germany for the first decade of the 21st century

ćelija (Ballard, Avista Labs, Siemens-Westinghouse, UTC Fuel Cells, Fuel Cell Energy, De Nora, Plug Power, i td., a isto tako i najveći proizvođači automobila) [27].

U Evropskim okvirima Nemačka prednjači u uvođenju gorivnih ćelija u komercijalnu upotrebu. Očekivanja na tržištu gorivnih ćelija u Evropi, i Nemačkoj u prvoj dekadi 21. veka, prikazana su na slici 9 [26].

Sa slike 9 zapaža se očekivanje da se tržište gorivnih ćelija eksplozivno širi, da bi se 2010. godine prodavalo oko 100.000 jedinica gorivnih ćelija, svih tipova i veličina u Evropi.

Evropska Unija ima velike ambicije u pogledu korišćenja obnovljivih izvora energije. Uz korišćenje postojećih tehnologija EU očekuje (izjava predsedavajućeg EU Romana Prodiya iz juna 2003. godine) "da 2010. godine EU proizvodi 22% električne energije iz obnovljivih izvora, a da se istovremeno u nove tehnologije bazirane na vodoničnoj ekonomiji uloži 2,1 milijarda evra". Od toga, u razvoj gorivnih ćelija biće uloženo 250 do 300 miliona evra, ne računajući privatni sektor, koji će takođe uložiti svoja sredstva [21].

Zanimljivo je reagovanje najrazvijenijih država USA na mogućnost efikasnijeg smanjenja zagađenja, posebno preko saobraćaja, korišćenjem gorivnih ćelija. Dobar primer je Kalifornija, koja pored ekonomske razvijenosti u USA, prednjači i u oštrim ekološkim normama u svim oblastima. Naime, važeći zakon ove države propisuje da počev od 2003, 10% od modela koje svaki proizvođač vozila ponudi na tržištu Kalifornije, moraju biti vozila nulte emisije, odnosno, ne smeju emitovati nikakve polutante u eksploataciji. Idući u susret problemu velikog zagađenja vazduha izazvanog saobraćajem, još 1999. godine, preko svojih agencija, država Kalifornija je uspostavila vrstu sporazuma "Partnerstvo za gorivnu ćeliju" (The California Fuel Cell Partnership) sa proizvođačima automobila, kompanijama koje proizvode energiju i proizvođačima gorivnih ćelija. Oblast delovanja ovog jedinstvenog partnerstva je primena i unapređenje rešenja u automobilskoj industriji koja su

zasnovana na gorivnoj ćeliji kao izvoru energije. U tom smislu, država i partneri – proizvođači gorivnih ćelija i automobila zajednički rade na razvoju i terenskom ispitivanju automobila na pogon gorivnom ćelijom, ispituju različita goriva za gorivne ćelije, rade na razvoju infrastrukture za javnu distribuciju goriva, preko medija edukuju građane i tako pripremaju tržište za komercijalni nastup ovakvih vozila. Do sada su, prema analizama svih partnera u sporazumu postignuti odlični rezultati, i u ovoj državi danas u javnom saobraćaju postoji veliki broj vozila "nulte emisije", koja rade na pogon gorivnim ćelijama, kao i javne stanice u kojim se snabdevaju gorivom (vodonik i metanol) [28].

Upoređivanjem efikasnosti automobila na pogon klasičnim gorivom, i pogon gorivnom ćelijom, lako se zaključuje da klasičan automobil, pored zagađenja okoline, troši i više energije od električnog automobila. Naime, poznato je da se iskorišćenje (toplotne energije) goriva za pokretanje automobila, kod danas najsavremenijih motora sa unutrašnjim sagorevanjem kreće između 15% i 20%. Istovremeno, ako bi automobil pokretala najsavremenija gorivna ćelija na čist vodonik, iskorišćenje goriva bi bilo gotovo 80%. Kako je tehnologija čuvanja vodonika u rezervoaru automobila za sada složena, uz korišćenje reformera i metanola kao sirovog goriva, dakle, primenom jeftinog rešenja, postiže se efikasnost iskorišćenja goriva od 24 do 32%. Kao pandan automobilu sa gorivnom ćelijom, električni automobil pokretan energijom iz akumulatora, u ukupnom ciklusu proizvodnje energije, preko skladištenja u akumulatoru pa do pokretanja automobila, dostiže iskorišćenje goriva oko 26% (ako je električna energija proizvedena u termoelektrani na prirodni gas), odnosno 65%, ako je električna energija za punjenje akumulatora proizvedena u hidroelektrani [29].

Kao jedna od najznačajnijih smetnji bržem prodoru gorivnih ćelija na tržište automobila, u ovom momentu ostaje cena, i to u domenu investicije za nabavku, dok je eksploataciona cena već konkurentna konvencionalnim energetskim izvorima. Na primer, putnički automobil Honda FCX, koji se 2003. godine pojavio u prodaji i koji je od Američke državne agencije za ekologiju (EPA) jedini dobio maksimalnu ocenu, (motor jednosmerne struje snage 60kW pogonjen baterijom polimer-elektrolitnih proton izmenljivih ćelija, kao gorivo koristi čist vodonik, raspolaže autonomijom od 270 km po punjenju razera, a na testu od 24.000 km trošio je oko 1,25 kg vodnika na 100 km pređenog puta, od čega 55% u gradu i 45% na autoputu. Na ovom testu, automobil je, uz cenu od 5,05 \$/kg vodonika, ostvario godišnji utrošak od 1.515 \$ za gorivo, što se, uz pogodnosti koje nudi automobil sa nultom emisijom zagađivača, smatra prihvatljivim eksploatacionim troškovima [3].

Nova pogodnost koju gorivna ćelija, kao izvor energije u vozilima nudi je najsavremeniji pristup upravljanju vozilima, kakvi se primenjuju u avionima ("Drive by wire"), odnosno, upravljanje svim sistemima (volan, toč-

kovi, kočnice, prozori,...) elektromotornim pogonom, što će kako se očekuje, podići bezbednost u saobraćaju na viši nivo. Imajući u vidu da se i na klasičnim automobilima, uz značajne prepravke na mnogim sistemima, već dugo eksperimentiše sa automatskim upravljanjem na za to osposobljenim putevima preko GPS sistema globalnog pozicioniranja, automobili generacije "drive by wire", su sasvim prilagođeni, jer se automatizacija upravljanja može bez smetnji ostvariti [3].

Još jedna značajna oblast primene gorivnih ćelija je vezana za primenu gorivne ćelije u automobilima. Naime, postoje računice američkih energetičara da bi gorivne ćelije u automobilima, dok su parkirani u garažama svojih vlasnika, mogle da proizvode struju za javnu potrošnju. Računice pokazuju da, ako bi svi automobili u USA bili opremljeni gorivnim ćelijama, i na takav način proizvodili struju, instalisani kapacitet za proizvodnju struje u USA bi se upetostručio! Razume se, da bi ovakvu orijentaciju svojih građana svaka država rado stimulisala poreskim i drugim beneficijama, jer isključuje potrebu za izgradnjom novih velikih i skupih energetskih kapaciteta, kao i prenosne mreže većeg kapaciteta [26].

Pošto je za dalji razvoj i primenu gorivne ćelije, jedan od važnih ograničavajućih faktora – cena, dobro je sagledati kakva je trenutna situacija, i kakva su predviđanja u pogledu kretanja cena gorivnih ćelija u narednim godinama. Kao primer, može se posmatrati jedan od danas najperspektivnijih tipova gorivne ćelije, a to je gorivna ćelija sa proton-izmenljivom membranom koja radi na reformisan prirodni gas ili propan-butan, sa sadržajem sumpora do 6 ppm. U tabeli 3 prikazan je uporedni pregled karakteristika gorivnih ćelija ovog tipa, za male i velike kapacitete [30].

Analizom podataka iz tabele 3 zapaža se da se očekuje značajno unapređenje svih posmatranih karakteristika gorivne ćelije u obe grupe kapaciteta, uz istovremeno trostruko sniženje cene po jedinici snage, što garantuje snažan razvoj ovog tipa ćelija. Imajući u vidu da je oblast gorivnih ćelija veoma dinamična, što poka-

Tabela 3. Karakteristike gorivne ćelije sa proton izmenljivom membranom sa prognozom do 2010. godine

Table 3. Characteristics of fuel cells with a proton exchange membrane with a forecast up to 2010

Karakteristike	Jedinice	Godine		
		2003.	2005.	2010.
Mali sistemi (od 3 do 25 kW)				
Električna efikasnost	%	30	32	35
Cena	\$/kW	3.000	1.500	1.000
Vek trajanja	časova	>6.000	30.000	40.000
Veliki sistemi (od 50 do 250 kW)				
Električna efikasnost	%	30	32	40
Cena	\$/kW	2.500	1.250	750
Vek trajanja	časova	15.000	30.000	40.000

zuzu planirana ulaganja u razvoj, može se očekivati slična tendencija i kod drugih perspektivnih tipova gorivnih ćelija.

ZAKLJUČCI

- Gorivne ćelije predstavljaju danas najefikasniji sistem za pretvaranje energije goriva u električnu energiju.

- Savremene visoko–temperaturne gorivne ćelije u radu proizvode visoko–temperaturnu otpadnu toplotu koja se može korisno upotrebiti (reforming, zagrevanje,...). Ukoliko se takva toplota koristi za pokretanje mikro–turbine za proizvodnju električne energije (hibridni sistem), ukupno iskorišćenje goriva u gorivnoj ćeliji se približava vrednosti od 80%, što je gotovo duplo više od najefikasnijeg sistema za proizvodnju električne energije na bazi sagorevanja fosilnih goriva (termoelektrane).

- Savremene gorivne ćelije koje kao gorivo koriste čist vodonik dobijen iz obnovljivog izvora, pri radu, kao proizvod, pored električne energije i toplote, daju čistu vodu. Na taj način, gorivne ćelije predstavljaju perspektivan i u potpunosti ekološki održiv izvor energije.

- Gorivne ćelije, koje za svoj rad koriste gas bogat vodonikom dobijen reformingom ugljovodonika ili drugih organskih supstanci, kao proizvod, pored električne energije, toplote i vode, emituju i ugljen–dioksid. Količina ugljen–dioksida koja nastaje na takav način manja je nego kod svih drugih sistema koji energiju goriva pretvaraju u električnu energiju, po jedinici proizvedene energije, pošto je iskorišćenje goriva u gorivnim ćelijama veće.

- Budućnost u proizvodnji vodonika čine procesi dobijanja vodonika iz vode različitim tehnološkim i biotehničkim postupcima, uz uslov da se ugljen–dioksid ne stvara, ili minimalno stvara, kao sporedni produkt.

- Razvoj procesa reforminga organika kreće se ka eliminisanju ugljen–dioksida i drugih gasova koji izazivaju "Efekat staklene bašte", kao nus–produkta.

- Gorivne ćelije imaju već danas široku primenu kao izvor energije u stacionarnim uslovima za snabdevanje električnom energijom nedostupnih objekata (meteorološke stanice, kosmički program,...), za postizanje energetske autonomnosti malih potrošača (kamere, mobilni telefoni, lap–top računari,...) i objekata u urbanim sredinama (bolnice, pošte, privatni posedi) itd.

- Globalne procene ukazuju da je u narednim decenijama, korišćenje gorivne ćelije kao energetskeg izvora za pogon različitih transportnih sredstava (automobili, autobusi, kamioni, brodovi, avioni itd.), verovatno, najperspektivnija oblast primene gorivne ćelije.

- Danas najznačajniji ekološki problemi na planeti (globalno zagrevanje, oštećenje ozonskog omotača, zagađenje vazduha, itd.) mogu biti ublaženi, a u narednom vremenu i u potpunosti stavljeni pod kontrolu, primenom gorivne ćelije kao energetskeg izvora, što korespondira uvođenju i širenju vodonične ekonomije, kao energetskeg sistema budućnosti.

LITERATURA

- [1] Fuel Cell, Fifth edition, Module 4, EG&G Sevcics, Parsons Inc. Sience Application International Corporation, US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, Margontown, 2001.
- [2] Reed Global Advisors, LLC, www.reedglobaladvisors.com
- [3] http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_challenges.shtml
- [4] World Fuel Cell Council, Will Fuel Cell power our Future, EQUIPAUTO 9915 October 1999
- [5] S. Gleston, Udžbenik Fizičke Hemije, Naučna knjiga, Beograd, 1967.
- [6] "Fuel Cell Handbook," J. Appleby and F. Foulkes, Texas A&M University, Van Nostrand Reinhold, New York (out of print), republished by Krieger Publishing Co., Melbourne, FL, 1989.
- [7] N. Lidorenko, G. Mucnik: "Fuel Cell Power Plant Engineering", Mir Publisher, Moskva 1988
- [8] A. Despić, D. Dražić, O. Tatić–Janjić, Osnovi elektrohemije, Naučna knjiga, Beograd, 1970.
- [9] Fuel Cell, Fifth edition, Module 2, EG&G Sevcics, Parsons Inc. Sience Application International Corporation, US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, Margontown, 2001.
- [10] <http://fee.mit.edu/features/hydrogen>
- [11] U. Eberl, "Fuel Cells and Gas Turbines: A Marriage of Efficiency", Research and Innovation, January 2000.
- [12] "Fuel Cells – Opening New Frontiers in Power Generation", U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Center, November 1999.
- [13] http://www.solsticecrest.org/hydrogen/hydrogen_fuelcell_types
- [14] United Technologies Company, <http://www.utcfuelcells.com>
- [15] Jerald A. Cole, California Hydrogen Business Council, "Comet 2002", University of Southern California, Los Angeles, 28.6.2002
- [16] <http://www.llnl.gov/str/Mitlit.html>
- [17] US Department of Energy, April 2000. "Department of Energy Announces World's First "Hybrid" Fuel Cell Turbine", DOE Fossil EnergyTechline, april 2000.
- [18] <http://hfcletter.com/letter/Oktober03/features.html>
- [19] <http://www.airproducts.com/Products/>
- [20] Caring for Climate, A Guide to The Climate Convention and A Kyoto Protocol, (<http://www.unfccc.int>)
- [21] <http://www.hfcletter.com/letter/July03/features.html>
- [22] Smith SD, Jordan DN, Hamerlynck EP (1999) Effects of elevated CO₂ and temperature stress on ecosystem processes. Pages 107–137 in Luo Y, Mooney HA (eds) Carbon Dioxide and Environmental Stress. Academic Press, San Diego
- [23] S. Ahmed, R. Kumar and M. Krumpelt: "Fuel Processing for Fuel Cell Power Systems", Fuel Cells Bulletin Elsevier Scientific Ltd. No 12, September 1999.
- [24] Jerald A. Cole, California Hydrogen Business Council, "Comet 2002", University of Southern California, Los Angeles, 28.6.2002
- [25] <http://wwwnrbp.org/pdfs/pub31.pdf>
- [26] dmg POWER CONFERENCE 9 & 10 November 1999, Hamburg Fuel Cell Vehicles: An Opportunity or Threat to the Power Supply Industry?

[27] <http://www.hfcletter.com/letter/February03/features.html>

[28] <http://www.caftp.org/aboutus.html>

[29] <http://auto.howstuffworks.com/fuel-cell4.html>

[30] Kathy Epping: "Energy Efficiency and Renewable Energy", US Department of Energy, DOE Hydrogen and Fuel Cell Coordination Meeting, 2–3.6.2003.

SUMMARY

THE FUEL CELL YESTERDAY, TODAY AND TOMORROW

(Professional paper)

Dušan D. Stanojević¹, Milorad Tomić²

¹"Zorka" – Research Centre, Šabac, SCG

²Faculty of Technology, Zvornik, Republika Srpska, BIH

The fuel cell has some characteristics of a battery carrying out direct chemical conversion into electric energy. In relation to classical systems used for chemical energy conversion into electric power, through heat energy and mechanical operation, the fuel cell has considerably higher efficiency. The thermo-mechanical conversion of chemical into electric energy, in thermal power plants is carried out with 30% efficiency, while the efficiency of chemical conversion into electric energy, using a fuel cell, is up to 60%.

With the exception of the space programme, the commercial usage of the fuel cell did not exist up to 1990, when the most developed countries started extensive financial support of this source of energy. By 1995, more than a hundred fuel cells were installed in the process of electricity generation in Europe, USA and Japan, while nowadays there are thousands of installations, of efficient energetic capacity.

Because of its superior characteristics, the fuel cell compared to other commercial electric energy producers, fulfills the most important condition – it does not pollute or if it does, the level is minimal. With such characteristics, the fuel cell can help solve the growing conflict between the further economic development of mankind and the preservation of a clean and healthy natural environment.

Ključne reči: Gorivna ćelija • Tipovi
• Goriva • Primena •

Key words: Fuel cell • Types •
Fuels • Application •