

Profesor dr Jovan Todorović,
dipl. inž.
Mašinski fakultet,
Beograd

VODONIK – ENERGENI BUDUĆNOSTI

UDC: 546.11 : 620.92

Rezime:

Potrebe za energijom su sve veće, a tradicionalni izvori, pre svega fosilna goriva, sve siromašniji. Otuda je neophodno da se i sektor energije radikalno izmeni. Potrebni su novi izvori energije i novi energenti. Rešenje ovih ozbiljnih problema je u vodoniku, kao najboljem i praktično neiscrpnom izvoru energije. Sasvim je izvesno da je vodonik osnova nove „energetske ere“, tzv. „ere vodonika“. Da bi se to ostvarilo nužno je da se reše sistemi proizvodnje, distribucije i snabdevanja vodonikom, odnosno nova infrastruktura, koja će po svim svojstvima biti konkurentna današnjim sistemima.

Ključne reči: nova energetska era, vodonik, proizvodnja, distribucija i snabdevanje, infrastruktura.

HYDROGEN – AN ENERGY SOURCE FOR THE FUTURE

Summary:

The energy sector has to be changed radically. New energy sources and new fuels are necessary. The solution of these serious problems is found in hydrogen, which is the best and widely available fuel. Undoubtedly hydrogen is a basis for a new „energy age“, so-called „hydrogen age“. To achieve that, it is necessary to develop systems for hydrogen production, distribution and supply, i.e. a new infrastructure competitive with the existing one, has to be build.

Key words: new energy age, hydrogen, production, distribution and supply, infrastructure.

Uvod

Tehnološki i ukupni razvoj društva nerazdvojno je povezan sa dva važna procesa: promenama u komunikacijama i mobilnosti i promenama u izvorima energije. Ova dva procesa se ne moraju odigravati istovremeno, ali jedan uslovljava, odnosno omogućava drugi [1].

Razvoj komunikacija i mobilnosti izvanredno je napredovao, tako da se današnji nivo čak ni grubo ne može porediti sa onim od pre samo desetak godina. Međutim, u procesima promene energije, situacija je sasvim drugačija. Izvori ener-

gije danas su skoro isti kao i pre mnogo godina (ne računajući, još uvek veoma spornu, nuklearnu energiju). Naime, energija se i danas pretežno dobija iz fosilnih goriva i znatno manje iz hidroelektrana i drugih obnovljivih izvora. Uprkos tome, potrošnja energije stalno se povećava. Objektivne prognoze pokazuju da će se u narednim godinama, uporedo sa daljim razvojem tehnologija i ukupnih potreba društva, nastaviti stalni porast transporta roba i ljudi i odvijanja drugih aktivnosti [2]. To će zahtevati i sve više energije, odnosno sve veću potrošnju energenata. Iako se predviđa da će u na-

rednim godinama, i pored sve većeg obima proizvodnje potrošnja energije u proizvodnim sistemima uglavnom stagnirati, zbog sve većih zahteva široke potrošnje i posebno zbog sve većih zahteva za prevozom roba i ljudi, tražnja za energijom će se prvih godina ovog veka stalno povećavati za oko 1,5 do 2% godišnje. To znači da će se do 2050. godine potrebe za energijom više nego udvostručiti. Od toga će se na transport trošiti oko 50% ukupne energije, odnosno osetno više nego u ukupnom sektoru industrije (ostatak u sektoru domaćinstva). To se i danas već približno dostiglo u nekim zemljama (Danska, Grčka, SAD, Španija). Veoma je važno da se ima u vidu da se energenti u sektoru transporta skoro u potpunosti dobijaju iz nafte [3, 4, 5, 6].

Sve veća potrošnja čini da su raspoložive rezerve fosilnih goriva, a posebno nafte kao osnovnog izvora energije za sektor transporta, sve manje. Prognoze o tome koliko će one još potrajati veoma se razlikuju. Neke govore da će nafte biti još najmanje 100, a gasa 200 godina, ali se i tvrdi da će nafte biti samo za 30 do 40, a prirodnog gasa za 15 do 60 godina. Neke prognoze govore da će već pre 2040. godine biti iskorišćeno pola svet-skih rezervi nafte, a neke da će to biti već 2010. godine. Procenjuje se da će se kritična tačka dostići onda kada se od svakih pet barela proizvedene nafte dnevno bude trošilo tri [1]. Dakle, do polovine ovog veka ukupne potrebe za energijom sa današnjim energetske izvorima uglavnom bi bile zadovoljene, ali svakako ne i posle 2050. godine, kada bi samo sa današnjim gorivima nastupila ozbiljna energetska kriza.

Druga veoma važna karakteristika današnje energetske situacije, odnosno proizvodnje i korišćenja energije iz fosilnih goriva, vezana je za ekološke probleme, odnosno zagađenje okoline koje izaziva sagorevanje fosilnih goriva. Kada je reč o saobraćaju i transportu, odnosno svim vrstama vozila sa motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, može da se tvrdi da su velika tehnološka unapređenja, a pre svega znatno bolji sistemi sagorevanja, skoro rešila problem emitovanja najvećeg broja zagađivača (ugljovodonika, teških metala i dr.). Međutim, ostao je problem emitovanja ugljendioksida koji znatno doprinosi stvaranju efekata „staklene bašte“, odnosno smanjivanju ozonskog sloja, što je danas jedna od snažnih preokupacija celokupne društvene zajednice. Emitovanje CO₂ neizbežan je pratilac svih procesa sagorevanja fosilnih goriva, čija toplotna moć i potiče od sagorevanja ugljenika, pa ovaj problem uopšte ne može da se reši energentima na bazi fosilnih goriva.

Za razliku od takvog stanja na području energije razvoj u sektoru komunikacija i mobilnosti je intenzivan i sveobuhvatan. Nove digitalne i web komunikacije opslužuju sve sektore privrede i života ljudi, omogućavaju nove prodore u svim oblastima i nov kvalitet života. Ako je tačna hipoteza da postoji međupovezanost procesa komunikacije i energije, logično je da ovi visoki dometi u razvoju komunikacija i mobilnosti moraju da se odraze i na sektor energije. Ima puno osnova da se tvrdi da će ostvarena „era komunikacija“ omogućiti i novu „energetsku eru“. Potreba za tim je više nego očigledna.

Nova energetska era

Nova „energetska era“ treba, pre svega, da obezbedi nove, svima dostupne izvore energije, a s tim u vezi i nove sisteme distribucije i korišćenja novih energetske oblika. Intenzivno se traga za novim obnovljivim izvorima primarne energije i alternativnim gorivima, koja bi se umesto nafte i njenih derivata koristila, pre svega, u motornim vozilima. U opticaju su svi potencijalno mogući oblici primarne energije. Radi se na iskorišćenju energije Sunca (solarne energije), vetra, plime i oseke, kao i termalnih voda. Kada je reč o alternativnim gorivima, istraživanja su usmerena na prirodni gas, bio-mase i sagorevanje otpadnih materija. Sa stanovišta ekologije, većina ovih alternativnih goriva ne rešava problem smanjivanja ozonskog sloja, mada su, po pravilu, ekološki povoljnija od benzina i dizel goriva [7, 14, 15, 16, 17, 18].

U ovim istraživanjima posebna pažnja poklanja se vodoniku. Realna je procena da će u budućnosti energetska osnova biti vodonik. Kada će vodonik postati osnovni energent zavisi od toga koliko je društvo u stanju da se brzo i energično odrekne nafte i drugih fosilnih goriva, odnosno koliko je sposobno da prihvati vodonik kao osnovni energent i osnovni izvor energije. Ukoliko se to odlaže, čovečanstvo će biti potpuno nepripremljeno da blagovremeno izvrši tranzicije u energetici onda kada odnos proizvodnje i potrošnje nafte dostigne svoje kritične granice.

Zato je, u okviru Ekonomske komisije OUN za Evropu (ECE), nedavno usvojen dokument „Integralni evropski projekat vodonika“ (poznat kao EIHP), koji treba, pored ostalog, da bude i osnova za

razvoj odgovarajućih standarda, odnosno međunarodnih direktiva. Uporedo, u Nemačkoj je instituisan „Konzorcijum za strateško rešavanje svih pitanja energetike i alternativnih goriva za sektor transporta“, u koji su, pored države, uključene i sve velike kompanije iz područja industrije vozila, energetike i naftne industrije (na primer, BMW, Dajmler Krajzler, VW, Opel i MAN, a zatim Aral, Shell, BP, RWE i drugi). Uz veliku podršku vlade Nemačke ovaj konzorcijum je izradio „Energetsku strategiju za sektor transporta“, kojom se utvrđuje politika i sistem razvoja nacionalne energetike na bazi novih izvora i oblika energije. U ovom dokumentu deciderano se govori da je vodonik osnovno gorivo za budući „održivi“ razvoj čovečanstva, ne samo za motorna vozila i sektor transporta, već i za druge potrošače. Otuda protagonisti vodonika govore da se tako obezbeđuje „energija za sve“ i „energija za uvek“ [1].

Slične programske inicijative zapažene su i u SAD i Japanu, na nivou vlada i velikih kompanija. Ostvarena je i saradnja Evropske unije i SAD radi razvoja standarda za gorivne ćelije i „ekonomiju vodonika“ i od toga se mnogo očekuje. General Motors, jedan od najvećih i ekonomski najjačih proizvođača vozila, ocenjuje da će u budućnosti ukupna svetska ekonomija biti zasnovana na vodoniku [13, 19]. BMW procenjuje da se sa vodonikom teorijski mogu zadovoljiti sve potrebe saobraćaja u Evropi, nasuprot biogorivima i sintetičkim gorivima koja zajedno mogu da pokriju manje od polovine potreba [14]. Radi toga su ove dve firme pokrenule zajednički razvoj uređaja i sistema za snabdevanje vozila tečnim vodonikom.

Gorivne ćelije

Vodonik kao energent može da se koristi na više načina. S obzirom na visoku toplotnu moć on može direktno da sagoreva u ložištima, pa i u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, slično kao i druga gasovita goriva fosilnog ili drugog porekla. Takva ispitivanja sprovode se i u nekim velikim automobilskim kompanijama (BMW, Ford). Međutim, najveće šanse za primenu vodonika, a to znači za novu energetsku eru ili „eru vodonika“, daju se gorivnim ćelijama koje kao gorivo koriste vodonik, a ispituju se u skoro svim velikim kompanijama, posebno u Japanu (Honda, Toyota). Karakteristično je da se u ove veoma ozbiljne i skupe razvojne projekte, pored automobilske industrije, sve više uključuju i vodeće kompanije iz oblasti energetike, naftne i procesne industrije [1, 12, 18].

Gorivne ćelije veoma su jednostavni uređaji, slični akumulatorima [11, 16], koje proizvode električnu energiju sve dok se snabdevaju gorivom. Sastoje se od dva „sendviča“ elektroda oko kojih je elektrolit (fosforna kiselina, tvrdi oksidi, istopljeni karbonati, i dr.). Na anodu se dovodi vodonik, a na katodu kiseonik, odnosno vazduh. Vodonik koji ulazi u ćeliju prolazi kroz membranu i tada se od svakog njegovog atoma izvlači elektron, čime se stvara električna struja, a oslobađa vodena para i toplota. Ove membrane, koje čine srž gorivne ćelije, najčešće su tzv. PEM membrane (Proton Exchange Membrane). Vodonik može direktno da se dovodi na anodu ćelije iz odgovarajućih rezervoara, u tečnom ili gasovitom stanju, ili iz reformera u kojima se vodo-

nik izdvaja iz metanola, prirodnog gasa, etanola, pa čak i benzina.

Ovako proizvedena električna energija može da se koristi za razne namene. Američki koncern General Motors nedavno je objavio da, prema njihovim istraživanjima, postoji veliki interes za gradnju stacionarnih „energana“ sa gorivnim ćelijama, koje treba da služe kao rezerva („back-up“) za napajanje releja za mobilnu telefoniju, centrala kompjuterskih mreža i sličnih sistema, posebno onih koji imaju problema sa napajanjem iz električne mreže, zbog udaljenosti, nepouzdanosti isporuka ili drugih razloga. Ova firma tvrdi da je u stanju da veoma brzo razvije ovakve „električne centrale“ sa gorivnim ćelijama [8]. Slično tome, i General Electric, veliki multinacionalni koncern u području energetike, radi na razvoju stacionarnih izvora električne energije sa gorivnim ćelijama, za opremanje poslovnih i stambenih zgrada, odnosno za osvetljenje, grejanje i napajanje drugih potrošača u domaćinstvu.

Međutim, najveći interes za gorivnim ćelijama, i ovako proizvedenom električnom energijom, ima automobilska industrija. Pored energetskih na to veoma utiču i ekološki razlozi. Naime, sa ekološkog stanovišta vodonik je nesporno najbolje gorivo za motorna vozila. Vozila sa elektropogonom i gorivnim ćelijama na vodonik emituju u okolinu samo vodenu paru, bez ikakvih štetnih sastojaka. To su „vozila sa nultom emisijom“ („zero emission vehicles“). Ako gorivne ćelije rade na prirodni gas, metanol ili etanol, situacija je nešto lošija, ali, ipak, znatno povoljnija nego pri radu čak i najboljih motora sa unutrašnjim sagorevanjem. U ovom slučaju u atmosferu se

emituje ugljen-dioksid, a u tragovima i ugljovodonici, ugljenmonoksid i oksidi azota, ali u količinama koje su 1000 puta manje nego pri sagorevanju dizel goriva. Rezultati merenja pokazuju da se generisanjem 1 MW električne energije iz gorivnih ćelija na fosilna goriva u atmosferu emituje 45 t sumpordioksida i oko 19 t oksida azota manje nego pri sagorevanju naftnih derivata. To dokazuje da je pogon vozila gorivnim ćelijama, a posebno ćelijama koje rade na vodonik, veoma perspektivno rešenje.

Vozila sa gorivnim ćelijama na vodonik

Primena vodonika za sada najviše dolazi do izražaja u motornim vozilima. Postoje podaci da se u svetu preko 400 kompanija bavi razvojem vozila sa gorivnim ćelijama na vodonik. Najviše ih je u SAD, Kanadi, Japanu, Nemačkoj, Francuskoj, Italiji, ali i u Rusiji, Koreji, Danskoj, Holandiji, Španiji, pa čak i u Indiji i Saudijskoj Arabiji. Najveće domete u ovom području ostvarila je kompanija Ballard Power Systems, koja je sa Daimler Krajslerom i Fordom formirala zajedničku firmu za proizvodnju gorivnih ćelija za vozila.

Snabdevanje gorivnih ćelija vodonikom na vozilu može da se reši na nekoliko načina. Najjednostavnije je da se na vozilo ugrade rezervoari vodonika u tečnom ili komprimovanom stanju, slično kao što se to radi u vozilima koja koriste prirodni gas ili druga gasovita goriva. Problem je što tečni vodonik treba da bude rashlađen na veoma niske temperature, ispod -250°C , a ukoliko je u gasovitom stanju treba da bude sabi-

jen na vrlo visoke pritiske (najmanje 250 bara). Porastom pritiska sabijanja povećava se masa rezervoara, što dovodi do smanjenja radijusa kretanja vozila sa jednim punjenjem rezervoara. U obe varijante podrazumeva se da se vodonik proizvodi u stacionarnim postrojenjima i da se posebnim sistemima razvodi, odnosno transportuje do mesta na kojima vozila treba da se popunjavaju.

Istražuju se i drugi sistemi napajanja vozila vodonikom. Jedan od njih je skladištenje vodonika u rezervoaru u čvrstom stanju, pomoću tzv. hidrida, odnosno intermetalnog jedinjenja nikla, hroma i vanadijuma koje poput „magneta“ vezuje vodonik. Zagrevanjem hidrida oslobađa se vodonik u gasovitom stanju i dovodi do gorivnih ćelija. Smatra se da će baš ovo rešenje omogućiti da gorivne ćelije budu realnost pre kraja ove dekade. Još više se radi na razvoju reformera, odnosno uređaja u kojima se vodonik oslobađa konverzijom nekog ugljovodoničnog goriva. „Proizvodnja“ vodonika na samom vozilu pomoću reformera je bolje sa stanovišta distribucije i snabdevanja vozila vodonikom, ali je tehnološki složeno i ekološki lošije rešenje.

Nekoliko primera će dobro ilustrirati ove načelne ocene. Radi se o hibridnim vozilima velikih svetskih proizvođača, kod kojih je paralelno moguć pogon klasičnim motorom sa unutrašnjim sagorevanjem (načelno za kretanje po otvorenim putevima) i elektromotorom (za kretanje u užim gradskim jezgrima), koji se napajaju električnom energijom iz gorivnih ćelija koje rade na vodonik.

General Motors radi na ovom programu već više od decenije [13]. Procenjuje se da je to vrlo perspektivan pro-

gram, pa se u ove projekte, na kojima je angažovano preko 500 inženjera, investira svake godine više stotina miliona dolara. Cilj je da se do 2010. godine dostigne proizvodnja automobila na gorivne ćelije i vodonik, a koja će biti profitabilna, i da nešto pre 2020. godine ova firma u svetu bude prva koja će na tržište plasirati milion ovakvih vozila.

Posle više eksperimentalnih vozila, među kojima su zapaženi modeli HydroGen1 i HydroGen2, General Motors je nedavno na bazi platforme poznatog modela Zafira, lansirao vozilo HydroGen3. Ovaj model će svakako ostati zabeležen u istoriji kao prvo vozilo na vodonik za koje je nedavno u Japanu dobijeno zvanično odobrenje za korišćenje u saobraćaju. Odobrenje je izdalo japansko Ministarstvo za zemljište, infrastrukturu i transport, a posebnom odlukom odobreno je i korišćenje, odnosno ugradnja u ovaj automobil rezervoara za tečni vodonik (od nadležnog organa za sudove pod pritiskom).

General Motors u ovom razvoju usmerava pažnju ne samo na razvoj vozila već i na usavršavanje pojedinih podsistema i elemenata, posebno na razvoj samih gorivnih ćelija. Tako je u HydroGen3 ugrađen blok od 200 ćelija nove generacije, koje generišu 94 kW i pogone elektromotor od 60 kW. Pogon je na prednje točkove, a najveća brzina iznosi 160 km/h. Vozilo može da se pokrene za samo 30 sekundi i to i pri spoljnjim temperaturama do -20°C . Ovaj blok još uvek ima relativno veliku masu, ali se očekuju znato lakše konstrukcije.

Velika pažnja poklanja se i razvoju boljih rezervoara za vodonik. Gene-

ral Motors istražuje obe mogućnosti – korišćenje vodonika u gasnom stanju, sabijenog na 700 bara, i korišćenje vodonika u tečnom stanju, koji treba da se rashlađuje na -253°C . Sa rezervoarima vodonika pod pritiskom, kakvi su ugrađeni u automobil HydroGen3, akcioni radijus vozila je 400 km, a sa rezervoarima tečnog vodonika znatno manje – oko 270 km (sa jednim punjenjem rezervoara). U prvom slučaju duže stajanje, odnosno nekorišćenje automobila, izaziva blago isticanje vodonika, pa i pad pritiska u rezervoaru, dok se u drugom slučaju tečni vodonik i posle dužeg stajanja praktično ne gubi. Problem je što su još uvek i jedni i drugi rezervoari prilično skupi, čak i pri proizvodnji od 100.000 jedinica godišnje. Radi toga se istražuju mogućnosti smanjenja troškova proizvodnje ugljenih vlakana i kompozitnih materijala, koji čine osnovu za izradu ovih rezervoara.

Honda je još pre tri godine plasirala na tržište SAD desetak hiljada hibridnih vozila Insight, u kojima se gorivne ćelije napajaju benzinom [9, 10]. Tvrdi se da je ovo vozilo, prvo komercijalno raspoloživo elektrovozilo sa gorivim ćelijama. Posle toga, u saradnji sa proizvođačem ćelija firmom Ballard, Honda je razvila više zapaženih modela. Počelo se 1999. godine sa modelom FCX-V2, nazvanog Gen-1, čiji se blok gorivnih ćelija napaja vodonikom iz ugrađenog (on-board) reformera, koji radi na metanol. Ovaj blok imao je zapreminu 67 litara, masu 101 kg, i snagu 30 kW. Već druga generacija, odnosno Gen-2 ili FCX-V3 iz 2001. godine, ima znatno bolje gorivne ćelije: zapremina bloka je 48 litara, masa 73 kg i snaga 35 kW. Sada je na redu treća gene-

racija, nazvana Next-Gen, kod koje blok ćelija ima zapreminu 35 litara, masu 48 kg i snagu 50 kW. Ovo vozilo, koje ima prednji pogon sa poprečno postavljenim motorom nad prednjim mostom, prikazano je javnosti ove godine. Za razliku od prethodnika, vodonik se u ovom vozilu ne dobija iz reformera, već iz rezervoara zapremine 156 litara u kojima se vodonik nalazi sabijen pod pritiskom od 700 bara. Pored toga, u sistem za gorivo ugrađeni su i novi, za ovo vozilo specijalno razvijeni „ultracapacitatori“, koji zamenjuju paket ćelija sa metalnim hidridima, koji su se do sada koristili, što povećava stepen korisnosti u procesu transformacije energije. To daje mogućnost da akcioni radijus vozila iznosi oko 275 km.

Pored znatno veće specifične snage (po jedinici zapremine i mase), nove gorivne ćelije mogu da rade u velikom dijapazonu temperature, od + 95 do - 20°C. Za polovinu je smanjen i broj delova celog bloka (u odnosu na Gen-2), što je ostvareno mnogim poboljšanjima: presovana metalna bi-polarna/separator konstrukcija i aromatske elektrolitske membrane, koje su prvi put primenjene. Separator je od običnog nerđajućeg čelika, a ne od specijalnog grafita najveće čistoće, kao u većini PEM gorivnim ćelijama, koji se teško obrađuje i zahteva vrlo precizne mašine. Za nove metalne separatore mogu da se koriste obične mašine, a mogu i da se recikliraju. Ugrađene su i nove aromatske elektrolitske membrane (umesto onih na bazi fluora, koje se najčešće koriste). Nove membrane izrađuju se od plastičnih materijala, koji se, takođe, znatno lakše obrađuju.

Tojota, drugi veliki japanski proizvođač automobila, radi na ovom programu

već niz godina. Na tržištu se već nalazi model Prius, za koji je planirana prodaja od preko 35.000 primeraka u naredne dve godine. Međutim, sada su aktuelni noviji modeli pod oznakom FCHV. To su, takođe, vozila sa prednjim pogonom, sa sinhronim elektromotorom snage 80 kW i maksimalnim obrtnim momentom 260 Nm. Blok sa 400 gorivnih ćelija, svaka sa naponom od 0,6 do 0,7 V, daje snagu od 90 kW. Upravljačka jedinica, blok gorivnih ćelija i elektromotor imaju masu od oko 300 kg, a postavljeni su ispod prednje haube, na posebnoj šasiji. Tu je smešten i veliki hladnjak, koji se koristi za hlađenje gorivnih ćelija i elektromotora tečnim fluidom. U pogledu rezervoara vodonika Tojota je tokom mnogo godina isprobavala različita rešenja. U model FCHV ugrađena su četiri rezervoara vodonika u gasovitom stanju, pod pritiskom od 500 bara, ispred i iza zadnje osovine. Zapremina rezervoara obezbeđuje akcioni radijus od 300 km za „japanski ciklus gradske vožnje“, odnosno oko 290 km za „kombinovani gradski-medugradski ciklus saobraćaja“ prema normama u SAD. Međutim, Tojota još uvek nije rešila problem startovanja vozila sa vodonikom na temperaturama ispod 0°C. Interval temperatura u kojem se ova vozila mogu startovati je od 0 do 40°C, što je veliko ograničenje za mnoge korisnike (HydroGen3 može da startuje i pri - 20°C).

BMW ima, takođe, zapažene programe razvoja vozila na vodonik, u čemu prednjači među evropskim proizvođačima automobila [14]. Ovaj razvoj ima više faza. U prvoj fazi išlo se na „dvo-gorivna“ vozila, u koja se ugrađuju klasični motori sa unutrašnjim sagorevanjem, ali podešeni tako da mogu da rade ili na

benzin ili na vodonik. Nedavno je završena prva probna serija od 15 ovakvih „dvogorivnih“ vozila na bazi modela 750, koja su označena kao BMW 750 hL. To znači da postoje dva posebna sistema za gorivo, sa dva posebna rezervoara. Sa jednim rezervoarom benzina vozilo može da pređe oko 650 km, a sa jednim rezervoarom vodonika zapremine 140 litara oko 300 km. Vodonik je u rezervoaru u tečnom stanju, odnosno radi se o tzv. „krio-rezervoaru“, u kojem se tečni vodonik nalazi na temperaturi od -253°C .

U automobil BMW 750 hL ugrađen je i mali blok gorivnih ćelija koji sa vodonikom kao gorivom daje snagu od 5 kW pri naponu od 42 V. Gorivne ćelije ovde se ne koriste za pogon vozila, već zamenjuju akumulator, tj. služe za napajanje svih potrošača, počev od startera do svetlosnih i signalnih uređaja. Time se rešava jedan od krupnih problema savremenih vozila – zadovoljenje sve većih potreba za napajanje brojnih uređaja, što sve teže može da se rešava povećanjem napona i kapaciteta akumulatora.

Ford ne zaostaje mnogo i planira da model Focus FCV, sa vodonikom u gasovitom stanju sabijenim na oko 250 bara, pusti u prodaju 2004. godine. Na razvoju ovih vozila rade i Volkswagen, Hyundai, Mazda, Nissan, Mitsubishi, a zatim i Peugeot, Renault, Volvo, Mercedes i drugi [11, 17]. Pored putničkih vozila u središtu interesa su i autobusi, posebno za gradski saobraćaj. Na primer, na ulicama Londona već je u saobraćaju nekoliko autobusa Mercedes-Benz Citaro sa gorivnim ćelijama koje daju snagu od 250 kW. Interesantno je da se radi i na razvoju vojnih vozila sa hibridnim pogonom,

mada za sada samo sa elektropogonom koji se napaja iz akumulatora [19].

Ograničenja u primeni vodonika

Za dalju primenu vodonika danas postoje dva velika ograničenja koja moraju da se reše. Prvo se odnosi na infrastrukturu, odnosno na sistem proizvodnje i distribucije vodonika, a drugi na cenu i troškove. Treba da se reše i određeni konstrukcijski i bezbednosni problemi, ali izgleda da ova ograničenja ne stvaraju veće teškoće. Kada se radi o korišćenju vodonika za pogon motornih vozila najveći problem je obezbeđenje potrebnih performansi, koje mogu da se porede sa današnjim vozilima. To se posebno odnosi na autonomnost kretanja sa jednim punjenjem rezervoara.

Proizvodnja i distribucija

Vodonik može da se proizvodi na različite načine – elektrolizom, gasifikacijom i izdvajanjem (pomoću reformera) iz fosilnih goriva. Sa energetske stanovišta napajanje proizvodnih postrojenja može da bude iz električne mreže ili iz posebnih generatora električne energije, vezanih za sistem u kojem se vodonik proizvodi. Izvori električne energije mogu biti toplotne, hidro ili nuklearne elektrane, kao i svi obnovljivi izvori energije, kao što su energija Sunca, vetra, geotermalnih voda, plime i oseke [12, 14].

Sa ekološkog stanovišta najbolji su procesi dobijanja vodonika elektrolizom, uz pomoć električne energije dobijene iz obnovljivih izvora. Pošto su ovi oblici primarne energije još uvek nedovoljno

raspoloživi, vodonik se danas dobija uglavnom iz prirodnog gasa, metanola i drugih fosilnih goriva (oko 99%). Od svih tih mogućnosti ekološki je najpovoljnije dobijanje vodonika iz prirodnog gasa, pošto tada gorivne ćelije emituju mnogo manje štetnih gasova, posebno gasova „staklene bašte“, od svih drugih goriva [7]. Međutim, na ovaj način ne rešava se problem emitovanja ugljendioksida u atmosferu.

Današnja proizvodnja vodonika procenjuje se na oko 500 milijardi kubnih metara godišnje, i to pretežno za hemijsku i procesnu industriju, pri čemu se samo jedna trećina sagoreva, odnosno koristi za generisanje toplote. Proizvedeni vodonik dovodi se do korisnika uobičajenim transportnim sredstvima – cisternama, a jedan deo cevovodima. Po celom svetu već je počela da se gradi mreža cevovoda koja povezuje proizvođače i korisnike, posebno u industrijskim zonama. Procenjuje se da ova mreža već danas ima više hiljada kilometara [14].

Ima i više primera eksperimentalnih pogona za proizvodnju vodonika i generisanje električne energije u izdvojenim jedinicama, namenjenim određenim potrošačima. Honda je, na primer, razvila eksperimentalnu kućnu energetska stanicu na vodonik, tzv. HES (Home Energy Station), koja je namenjena snabdevanju domaćinstva električnom energijom i toplom vodom. Ova stanica izgrađena je 2003. godine u Istraživačkom centru ove firme u Torensu u Kaliforniji, a ćelije rade na prirodni gas. Iako je ovo već druga stanica ove vrste, usavršena u odnosu na prethodnu koja je izgrađena na istoj lokaciji 2002. godine (bolja čak tri puta!), ona se još tretira kao eksperimentalna [9, 10].

Na istoj lokaciji, u Kaliforniji u kojoj ima puno sunčanih dana, Honda je izgradila jedno tehnološki i ekološki još bolje eksperimentalno HES postrojenje, u kojem se vodonik dobija uz pomoć solarne energije. Interesantno je da je ova stanica arhitektonski dizajnirana u obliku broda i predstavlja simbol čiste energije. Ovo postrojenje ima u svom sastavu fotovoltski modul za generisanje električne energije, jedinicu za elektrolizu u kojoj se oslobađa vodonik i rezervoare za vodonik pod pritiskom. Ugrađen je i dispencer, odnosno pumpa za napajanje vozila [10].

Ugrađeni fotovoltski moduli rezultat su posebnih istraživanja i predstavljaju značajno tehnološko unapređenje. U modul su ugrađene fine prevlake od jedinjenja bakar-indium-galijum-selen (CIGS). Jedinica za elektrolizu i generisanje vodonika sastoji se od prečistača vode (obične, iz „česme“), elektrolizera, separatora koji razdvaja gasoviti vodonik i vodu i prečistača koji iz vodonika izdvaja preostalu paru i male količine kiseonika. Elektrolizer je sličan gorivnim ćelijama sa PEM membranama, ali sa obrnutim procesom. Na anodu se dovodi čista voda i električni napon, vodonik prolazi kroz PEM membranu, pa se gasoviti vodonik oslobađa na katodi. Elektrolizer i dispencer su dimenzija $600 \times 600 \times 1000$ mm, zapremina rezervoara je 110 m^3 , a čistoća vodonika 99,999% (bez vode). Ova prva HES stanica na solarnu energiju ima kapacitet 2 m^3 vodonika na sat, odnosno maksimalno 2000 m^3 godišnje.

Slično stacionarno postrojenje, ali znatno većih kapaciteta, razvila je i firma General Motors. Njihova stacionarna elektrana, koja je izgrađena pored Hjustona u Teksasu, snabdeva električnom

energijom procesna postrojenja koncerna Dow Chemical (u kome je vodonik nus-prodakt u nekim procesima). Ovo pilot postrojenje ima blok gorivnih ćelija sa PEM membranama, istim kao i u vozili-ma HydroGen, a instalacija je smeštena u jednu prikolicu, koja je opremljena svim potrebnim kontrolnim i zaštitnim uređajima. Snaga bloka gorivnih ćelija je 75 kW, što je inače dovoljno za snabdevanje desetak prosečnih porodičnih kuća. Planovi su, da se ovaj sistem ubrzano širi, tako da se do 2006. godine izgradi 400 ovakvih stacionarnih generatora, svaki sa 12 ili više blokova gorivnih ćelija, tako da se obezbedi snaga od oko 35 MW, što je dovoljno za jedan mali grad. Ovaj ceo sistem je svojevrsna „laboratorija za učenje“, koja treba da pruži potrebna znanja o održavanju i pouzdanosti sistema i pojedinih komponenata, a i o troškovima izgradnje i funkcionisanja ovakvih energana. Smatra se da je to važan korak ka „eri vodonika“ [8].

Postojeći kapaciteti, odnosno proizvodnja i infrastruktura, nisu dovoljni za široko korišćenje ovog energenta u svim sektorima života, a posebno u saobraćaju. Potrebno je da se izgradi široka mreža proizvodnih jedinica – „energana“, široka mreža cevovoda i drugih oblika transporta i odgovarajuća mreža za distribuciju, odnosno mreža „pumpnih stanica“ za snabdevanje krajnjih potrošača. Ovim sistemima treba da se zadovolje sve potrebe vozila i vozača, analogno rešenjima koja postoje za snabdevanje naftom i naftnim derivatima. Zato se u ovaj razvoj veoma mnogo ulaže. Trenutno su u SAD i Evropskoj zajednici na snazi razvojni programi od oko 3,7 milijardi dolara [18]. Ukupne potrebne investicije su, me-

đutim, daleko veće. U General Motorsu, na primer, smatraju da je potrebno da se u SAD u narednim godinama izgradi 11.700 novih stanica za vodonik za popunu vozila. Cilj je da vozač u urbanim zonama ima na raspolaganju pumpne stanice na rastojanjima najviše do 2 milje, odnosno oko 1600 metara, a na auto-putevima do 25 milja, odnosno na oko 40 kilometara, što znači da će biti potrebno oko 10–15 milijardi dolara [12]. Ova firma je već sa naftnim koncernom Shell izgradila jednu takvu eksperimentalnu pumpnu stanicu u Vašingtonu, u koju se vodonik dovozi kamionima – cisternama. Eksperiment je pokazao da su troškovi gradnje i rada stanice daleko veći od predviđenih, posebno zbog velikih troškova sistema bezbednosti i zaštite. Sličnu takvu stanicu izgradio je nedavno na aerodromu u Minhenu i BMW, i to za napajanje vodonikom vozila aerodromske službe – autobusa vodonikom pod pritiskom, a putničkih vozila tečnim vodonikom [14].

Cena i troškovi

Pored proizvodnje i distribucije, i cena vodonika koju treba da plati krajnji korisnik predstavlja veliko ograničenje za korišćenje ovog energenta. Iako se pominju različite cene, smatra se da je cena ovog energenta zasada veoma visoka, bar 10 puta viša nego što bi tržište moglo da prihvati [10, 18]. Cena vodonika zavisi od korišćene primarne energije, ali i od stepena razvijenosti infrastrukture, naročito u vezi sa sigurnosno-bezbednosnim merama. Dok je cena energije koja se dobija iz vodonika koji se proizvodi u Severnoj Africi pomoću solarne energije oko 0,25

aura po kWh (zajedno sa infrastrukturom i distribucijom), vodonik koji se dobija iz prirodnog gasa je mnogo jeftiniji. Ali, na duže staze, zbog ekoloških razloga i očekivanog smanjenja rezervi fosilnih goriva, osnovni interes je da se vodonik proizvodi energijom iz obnovljivih izvora [14]. Istraživanja su usmerena ka tome da proizvodnja vodonika pomoću obnovljivih izvora energije bude što jeftinija.

Na cenu električne energije dobijene iz gorivnih ćelija na vodonik, znatno utiče i visoka cena samih ćelija. Na primer, navodi se da je generisanje 1 kW snage pomoću gorivnih ćelija koštalo krajem 2000. godine oko 1.000 USD, dok se ista snaga u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem generiše za samo oko 50 do 60 USD. Izvesno je, da cene gorivnih ćelija iz dana u dan opadaju. Zbog toga su logične ocene da će u bliskoj budućnosti nove tehnologije i veće proizvodne serije omogućiti znatno jeftinije gorivne ćelije, jeftiniji vodonik, pa i znatno nižu cenu ovako proizvedene električne energije. Prognoze su da će cena 1 kW ovako dobijene energije već 2005. godine biti oko 200 USD, a 2007. samo 100 USD. Pošto vodonik ima veoma dobre ekološke osobine, logično je da će se njegovo korišćenje podsticati i od države i organa lokalne uprave. Ovakvi podsticajni sistemi u vidu smanjenja poreza, popusta i drugih beneficija već postoje u nekim zemljama (SAD, Švedska, Nemačka). Uz dalje osmišljene podsticaje treba da se očekuje da će cena vodonika uskoro biti sasvim prihvatljiva i konkurentna ceni današnjih goriva.

I pored toga što je u proteklih desetak godina već zabeleženo osetno smanjenje cena i gorivnih ćelija i vodonika,

cena vozila projektovanih za ovu vrstu pogona još uvek je veoma visoka. Na primer, japanske firme Toyota i Honda nude prodaju na lizing svojih modela FCHV, odnosno FCX, zasada samo na japanskom tržištu. Za model FCHV cena lizinga, koja obuhvata kompletno održavanje, servise i druge troškove logistike, iznosi za jedan mesec oko 10.000 USD, za period od 30 meseci, a za model FCX osetno manje, oko 6700 USD. Ako se to preračuna znači da kupac posle 30 meseci dobija vozilo FCHV za 300.000 USD, a vozilo FCX za oko 200.000 USD. Firma Yamaha nudi svoj skuter sa gorivnim ćelijama na vodonik po ceni od 87.000 USD. To su ogromne sume, bez obzira na to što uključuju i troškove korišćenja, mada mnogo niže nego pre samo nekoliko godina, kada se procenjivalo da ova kva vozila koštaju oko milion dolara.

Bezbednost i konstrukcija

Kada se radi o korišćenju vodonika kao energenta bitno je da se ima u vidu da je to izvanredno zapaljivo i opasno gorivo. Čak i u malim koncentracijama može lako da se zapali i da izazove vrlo opasne požare. Zbog toga je nužno da se u svim fazama procesa, počev od proizvodnje, preko distribucije, sve do krajnjih korisnika, obezbede posebno promišljene i efikasne mere zaštite, znatno sofisticiranije nego pri radu sa drugim gorivima. To, naravno, dalje povećava cenu i troškove.

Ako se radi o pogonu motornih vozila na vodonik, postoje i određena konstrukcijska ograničenja. Sama konstrukcijska ugradnja gorivnih ćelija i odgova-

rajuće opreme, posebno rezervoara vodonika, elektromotora i opreme, ne stvara praktično nikakve probleme. I performanse koje vozilo ostvaruje sa ovim gorivom su sasvim zadovoljavajuće. To je kod mnogih vozila već uspešno rešeno i dokazano. Jedini ozbiljniji problem postoji u vezi sa obezbeđenjem potrebne autonomnosti kretanja vozila, odnosno u vezi sa akcionim radijusom koji vozilo sa gorivnim ćelijama može da pređe sa jednim punjenjem rezervoara vodonika. Ovaj problem potiče od činjenica da vodonik ima znatno manji sadržaj energije u jedinici zapremine rezervoara. U poređenju sa benzinom, isti rezervoar napunjen tečnim vodonikom (rashlađenim na -250°C) ima samo 20% energije, a sa vodonikom u sabijenom stanju samo 16, odnosno 7% (za pritiske od 700 i 200 bara, respektivno) [14]. Zato su akcioni radijusi vozila sa gorivnim ćelijama, u principu, znatno manji nego sa motorima sa unutrašnjim sagorevanjem koji rade na druga goriva. Ugradnja velikih rezervoara sa pritiscima sabijanja vodonika od 700 bara i više, kako to rade General Motors i Honda, umanjuje ovaj problem, ali ga i ne rešava potpuno.

Zaključna razmatranja

Vodonik je očigledno izvanredno kvalitetan energent, koji može trajno da reši probleme energetike čovečanstva. Zato se u celom svetu u ovom pravcu ulažu ogromni razvojno-istraživački naponi i investiraju velika sredstva. Dosad ostvareni rezultati govore da je „era vodonika“ vrlo realna i da je već na pomolu.

Da bi vodonik postao prihvatljiv energent nužno je da se obezbede

osnovni logistički elementi, a pre svega sistemi proizvodnje, distribucije i snabdevanja. Proizvodnja vodonika na duži rok mora da se zasniva na obnovljivim izvorima energije (sunce, vetar, hidro, itd.), ali u prelaznom periodu će se svakako koristiti i energija dobijena iz fosilnih goriva, naročito prirodnog gasa. U pogledu infrastrukture za distribuciju i snabdevanje krajnjih korisnika trebalo bi koristiti rešenja koja će biti konkurentna postojećim sistemima za naftu, naftne derivate, prirodni gas i druga gasovita goriva. Od osnovne je važnosti da se ostvare efikasne mere zaštite i bezbednosti.

Pored toga, treba da se obezbede i zadovoljavajuće ekonomske performanse, odnosno prihvatljiva cena. Sasvim je izvesno, međutim, da će cena vodonika, gorivnih ćelija, infrastrukture, odnosno tako proizvedene energije, biti sve niža. Tome će doprineti nove tehnologije, ali i zakoni masovne proizvodnje, kako je to bilo sa radio-tranzistorima, računarima i mobilnim telefonima. Zato može da se tvrdi da će vodonik kao energent biti sasvim dostupan i u pogledu cene. Pri tome je suštinski važno da će, zbog svoje izuzetne raspoloživosti i rasprostranjenosti, moći da se proizvodi na svim krajevima sveta, u svim zemljama, i svakom naselju. Isto važi i za proizvodnju električne energije na ovim osnovama.

Doći će vreme kada će milioni krajnjih potrošača povezati svoje gorivne ćelije u lokalne, regionalne i nacionalne energetske mreže, odnosno web sisteme, koristeći iste principe projektovanja i inteligentne tehnologije koje omogućavaju World Wide Web. Električna energija će se razme-

njivati i deliti, od jednog proizvođača do drugog, stvarajući novu formu decentralizovanog upravljanja i korišćenja. Treći svet neće više zavisiti od uvoza nafte i politike globalnih operatera. U takvim uslovima, velike energetske kompanije, proizvođači nafte i električne energije, koje danas „vlada ju svetom“, posebno siromašnim zemljama u razvoju, moći će da se bave samo proizvodnjom i prodajom gorivnih ćelija i infrastrukturne opreme, kao i održavanjem i regulisanjem postojećih i novih razvodnih mreža i energetskih sistema [1].

Literatura:

- [1] Rifkin, J.: Hydrogen Economy, Tarcher Putnam, London, 2003.
- [2] Traffic Growth and Infrastructure Needs in Europe, AIT-FIA Euroconference, Bonn, 1996.
- [3] Evolution of Tourism and the Automobile, Report by the General Secretariat of AIT, Geneva, september 1996.
- [4] Energy Efficiency in Transportation – Alternatives for the Future, United Nations, Dpt. for Dev. Support and Management, Publ. ST/TCD/EB/1, New York, 1993.
- [5] Bertrand, B.: Automobiles, Energy and Environment after 2005, Proc. FISITA Congress/SAE Paper 945111, Beijing, 1994.
- [6] Tichy, von G.: Industrie und Energie, Erdol Erdgas Kohle, No. 12, 1992.
- [7] Patil, P.: Alternative Fuels in Future Vehicles, Automotive Engineering, No. 1. 1996.
- [8] Fuel cells at a standstill, Prof. engineering, London, february 2004.
- [9] Yamaguchi, J.: Honda brings the hydrogen economy closer, Automotive Engineering (SAE), No. 2, 2004.
- [10] Footprints to the future, Automotive Engineer, London, february, 2004.
- [11] Fuel cells test point DC to tomorrow's world, Automotive Engineer, London, december 2003.
- [12] Bridging the technologies, Automotive Engineer, London, december 2003.
- [13] Diem, W.: GM's Hydrogen projects – The future is so promising, AutoTechnology, London, No. 1, 2003.
- [14] Metz, N.; Cozzarini C.: Hydrogen – the BMW strategy on the future fuels, AutoTechnology, London, No. 1, 2003.
- [15] Todorović, J.: Aleternativna goriva – moda ili potreba, Vojnotehnički glasnik, Beograd, br. 3, 1998.
- [16] Clean energy – Alternative power sources, SAE – Automotive Engineering Int., feb. 2000 – DANA Ad. Supp.
- [17] Preparing for the Hydrogen age, SAE – Automotive Engineering Int., oct.. 2003.
- [18] Alternative fuels, AutoTechnology, London, No. 6, 2003.
- [19] Drive for military efficiency, Automotive engineer, London, march 2003.
- [20] En route to the hydrogen economy, Professional Engineering, No. 12, 27 june 2001.