

Tehno-ekonomska analiza proizvodnje vodonika iz biodizela i njegove upotrebe za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama za pogon električnih vozila

Techno-economic Analysis of Hydrogen Production from Biodiesel and Its Use for Electricity Production in Fuel Cells for Electric Vehicles

Iva Batić*, Željko Đurišić*, Miroljub Babić**

* Elektrotehnički fakultet, Univerziteta u Beogradu

** Makpetrol D.O.O. Beograd

Rezime - Jedan od mogućih pravaca dekarbonizacije i elektrifikacije teretnog i putničkog transporta je upotreba gorivnih ćelija sa vodonikom kao pogonskim gorivom. S obzirom da je primena biomase za proizvodnju električne energije u velikoj meri nekonkurentna u odnosu na vetroelektrane i solarne elektrane, njena primena za dobijanje vodonika predstavlja jedan od mogućih pravaca razvoja ovog obnovljivog izvora energije.

U ovom radu su analizirane tehnologije za proizvodnju vodonika iz biodizela. Izvršena je analiza strukture i ukupnih troškova proizvodnje vodonika iz biodizela, kao i energetski bilans ovog procesa. Sagledani su uslovi korišćenja vodonika za pogon gorivnih ćelija u električnim vozilima. Sprovedena je analiza efikasnosti energetskog ciklusa: biodizel – vodonik – električna energija – mehanička energija za pogon električnih vozila. Kao krajnji rezultat izvršena je procena troškova proizvodnje kWh električne energije iz biodizela i uporedna analiza sa vozilom koje je pogonjeno dizel motorom i električnim motorom napajanim iz baterija.

Ključne reči - biodizel, proizvodnja vodonika, gorivne ćelije, električna vozila

Abstract - One of the possible directions of decarbonisation and electrification of freight and passenger transport is the use of fuel cells with hydrogen as a fuel. Considering that the use of biomass for electricity generation is largely uncompetitive compared to wind and solar power plants, its use for hydrogen production is one of the possible directions of development of this renewable energy source.

In this paper, technologies for hydrogen production from biodiesel were analyzed. An analysis of the structure and total costs of hydrogen production from biodiesel was performed, as well as the energy balance of this process. The conditions of using hydrogen to drive fuel cells in electric vehicles were considered. The efficiency of the energy cycle analysis was performed: biodiesel - hydrogen - electricity - mechanical energy to drive electric vehicles. As a final result, an estimation of the

costs of production of kWh of electricity from biodiesel and a comparative analysis with a vehicle powered by a diesel engine and an electric motor powered by batteries was performed.

Index Terms - biodiesel, hydrogen production, fuel cells, electric vehicles

I UVOD

Čovečanstvo je na pragu nove ere koju karakterišu napredne tehnologije i nove vrste goriva. Bićemo svedoci novih i potpuno različitih načina proizvodnje i upotrebe energije. Energiju bi mogli da generišu izvori sa gotovo nultim zagađenjem. Vodonik kao sintetičko gorivo, u budućoj eri, nakon ekonomije fosilnih goriva, može postati glavni energent za mnoge primene u industriji, transportu, kao i u proizvodnji električne energije u distributivnim mrežama.

Danas je vodonik prepoznat kao nezagađujući nosač energije, jer ne doprinosi globalnom zagrevanju ako se proizvodi iz obnovljivih izvora energije. Najznačajnija je činjenica da se vodonik može dobiti iz širokog spektra primarnih izvora energije. Pored toga, vodonik je praktično jedini sekundarni nosač energije koji je pogodan za širok spektar primena na tržištu, od transportnih i prenosnih do stacionarnih upotreba. Vodonik je već deo današnje hemijske industrije, ali kao izvor energije njegovi benefiti se mogu postići tehnologijama kao što su gorivne ćelije, koje obezbeđuju direktnu konverziju hemijske energije vodonika u električnu energiju.

Pošto se vodonik može proizvoditi iz širokog spektra primarnih energija i može se trošiti u većem broju primena, perspektivno je izvesno da će postati jedan od bitnih izvora energije. Prednost vodonika u odnosu na električnu energiju je što se može dugoročno skladištiti u velikim količinama, što je posebno bitno u elektroenergetskim sistemima sa visokim stepenom penetracije intermitentnih obnovljivih izvora energije.

Sve više stručnjaka širom sveta vodonik smatra istinskim gorivom budućnosti. Vodonik se kondenzuje na $-252,77\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Specifična težina tečnog vodonika je 71 g/L, što mu daje najveću gustinu energije po jedinici mase između svih goriva i nosača energije: 1 kg vodonika sadrži energije koliko 2,1 kg prirodnog gasa ili 2,8 kg nafte. Ova karakteristika napravila je od vodonika gorivo koje se koristi u pogonu i za snabdevanje svemirskih brodova energijom. Za razliku od ostalih goriva, poput nafte, prirodnog gasa i uglja, vodonik je obnovljiv i netoksičan kada se koristi u gorivnim ćelijama. Vodonik ima veoma veliki potencijal kao ekološki prihvatljivo gorivo i u smanjenju uvoza energetskih resursa [1].

Budućnost ekonomije zasnovane na vodoniku predstavlja vodonik kao nosač energije u okviru sigurnog i održivog energetskog sistema.

II TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE VODONIKA IZ BIODIZELA POSTUPKOM PARNOG REFORMINGA

Proizvodnja vodonika se uglavnom vrši centralizovano u namenskim pogonima pretežno reforming procesom prirodnog gasa vodenom parom u velikim količinama, centralnim proizvodnim pogonima.

Biodizel, koji je metil estar masne kiseline (FAME), proizveden iz reakcije transesterifikacije biljnog ulja uz pomoć metanola, je potencijalno obećavajuća sirovina za distributivnu proizvodnju vodonika (DHG) uz pomoć postupka parnog reforminga [2]. Biodizel je obnovljivi izvor koji ne zagađuje okolinu, pa je ovako dobijen vodonik praktično obnovljivo gorivo. Osim toga, biodizel karakteriše malo prisustvo sumpora, što ga čini povoljnom sirovinom za primene u katalitičkim procesima, jer je poznato da je sumpor snažan katalizatorski otrov.

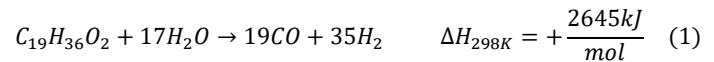
Poslednjih godina izrađeno je nekoliko eksperimentalnih studija koje su razjasnile proces parnog reforminga biodizela. U okviru studije [2] sprovedena su istraživanja čiji je glavni akcent stavljen na pronalaženje odgovarajućih uslova rada za parni reforming biodizela. Stabilan sastav proizvedenog gasa postignut je sa preko 100 sati trajanja procesa upotrebom katalizatora na bazi plemenitih metala, primenom malih masenih protoka i dovoljno visoke ulazne temperature katalizatora veće od 750°C. Prethodna parametarska studija otkrila je štetan uticaj niskih ulaznih temperatura katalizatora zbog efekta koksiranja. Što se tiče minimalno dozvoljenog koeficijenta odnosa količine pare i ugljenika (S/C), pokazuje se da se stabilni radni uslovi sa potpunom konverzijom biodizela mogu postići pri koeficijentima S/C od samo 2 ($S/C=2$).

U okviru istraživanja [2], predložen je novi koncept prerađivača goriva zasnovan na potpuno integrisanom toplotnom sistemu parnog izmenjivanja biodizela. Sistem za proizvodnju vodonika zasnovan na sirovinskom biodizelu analiziran je primenom komercijalnog softvera Aspen Plus.

Metodologija koja je predstavljena u ovom radu je izvod preuzet iz rada [2], u kojem se mogu naći detaljnija objašnjenja. Kao model supstance za biodizel odabran je metil-oleat ($C_{19}H_{36}O_2$). Smatra se da je metil-oleat pogodna referentna supstanca za modeliranje parnog reforminga biodizela, jer je molarni odnos C:H:O veoma sličan biodizelu ($C_{18,3}H_{34,8}O_2$).

Parni reforming metil-oleata može se opisati pomoću tri linearno nezavisne hemijske jednačine, i to reakcija parnog reforming

(SR) jednačina (1), reakcija izmenjivanja voda-gas (WGS) jednačina (2) i reakcija metanacije jednačina (3).

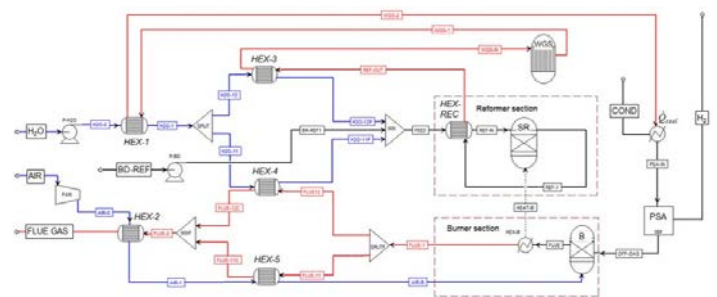


Pored ovih glavnih reakcija, koksovanje katalizatora može se desiti u postojećim realnim uslovima pri niskim temperaturama reforminga, niskim koeficijentima odnosa S/C i visokim ulaznim brzinama masenog protoka. Termodinamički se ne očekuje stvaranje koksa pri koeficijentima S/C većim od 2, čija stvarna vrednost zavisi od uslova rada izmenjivača.

III OPIS SISTEMA DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE VODONIKA IZ BIODIZELA PARNIM REFORMINGOM

U ovom radu je dat prikaz sistema za distribuiranu proizvodnju vodonika od 50 Nm³/h iz biodizela parnim reformingom sa integrisanim sistemom grejanja je predstavljen na slici 1, [2]. Ovakav sistem je pogodan za instalacije na postojećim benzinskim pumpama. Model se sastoji od parnog reformera (SR), reaktora za pomeranje vodenog gasa (WGS reaktor), jedinice za adsorpciju promenljivog pritiska (PSA unit) i gorionika (B).

Cilj je bio da se eliminiše potreba za dvostrukim gorionikom i da se smanji potrošnja biodizela za obezbeđivanje dodatne toplote za parni izmenjivač. Pokazano je da se toplota za parno izmenjivanje može obezbediti isključivo sagorevanjem otpadnih gasova iz jedinice za adsorpciju (PSA).



Slika 1. Toplotno integrisani sistem za proizvodnju vodonika od 50 Nm³/h, zasnovan na parnom reformingu biodizela [2]

Efikasnost toplotnog sistema definisana je na sledeći način:

$$\eta_{Syst} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2}}{\dot{m}_{BD-REF} \cdot LHV_{BD-REF} + \dot{m}_{BD-B} \cdot LHV_{BD-B}} \quad (4)$$

Gde su: LHV - niža toplotna vrednost; $\dot{m}_{H_2} = (dm/dt)_{H_2}$ - maseni protok proizvedenog vodonika; $\dot{m}_{BD-REF} = (dm/dt)_{BD-REF}$ - maseni protok biodizela do reformera; $\dot{m}_{BD-B} = (dm/dt)_{BD-B}$ - maseni protok biodizela do gorionika.

Za dati sistem, brojilac jednačine (4) je konstanta, jer je proizvodnja vodonika fiksirana na 50 Nm³/h. Tako se, efikasnost toplotnog sistema može izračunati na osnovu zahtevanog biodizela za reforming i gorionik. Dodatna potreba za

električnom energijom P_{el} je potrebna za hlađenje izlaznog toka iz WGS reaktora na potrebnu ulaznu temperaturu PSA jedinice, kao i za napajanje pumpi za biodizel i vodu i za ventilator. Gubici toplote i pritiska se mogu zanemariti.

Kao jedan od bitnih parametara za efikasnost rada sistema pokazao se pritisak u sistemu. Izvršena je analiza na $S/C=5$ promenom pritiska sistema od 6 bar do 13 bar. Povećanjem pritiska, efikasnost proizvodnje vodonika, definisana jednačinom (4), se povećava sa 53,9%, koliko se imala na 6 bar, do 62,4% na 13 bar, što se uglavnom pripisuje poboljšanoj PSA-efikasnosti koja rezultira smanjenom količinom biodizela dovedenog u izmenjivač (m_{BD-REF}). Uprkos blagom povećanju potrebnog masenog protoka biodizela do gorionika m_{BD-REF} , ukupna potrošnja goriva smanjena je sa 26,4 kg/h na 22,8 kg/h. Očigledno je primena visokog pritiska korisna za dati sistem generisanja H_2 , uključujući PSA jedinicu.

Dobija se maksimalna teorijska neto efikasnost H_2 od 78,2%. Utroši se 18,79 kg/h biodizela da bi se proizvelo 50 Nm³/h (4,436 kg/h) vodonika. Sistem radi pri koeficijentu S/C od 2,53, čime se eliminiše potreba za dodatnim snabdevanjem gorionika biodizelom. Potražnja za endotermnom toplotom za parni reformer (47,6 kW) se obezbeđuje tako što gorionik koristi PSA otpadni gas. Sistem proizvodi 5,391 l/h vodonika pri pritisku dovoda od 10 bar (što odgovara 50 Nm³/h H_2 pod standardnim uslovima).

Proces parnog reforming procesa proizvodnje vodonika iz biodizela se može opisati sledećom hemijskom jednačinom:



Datuj jednačini odgovara jednačina masenog bilansa:

$$m_{BD} + m_{H_2O} = m_{CO} + m_{H_2} \quad (6)$$

Kao zaključak može da se izvede da se od 100 kg biodizela, postupkom parnog reforming bez gubitaka, dobija približno 24 kg vodonika, uz potrošnju vode od približno 104 kg i dobijenog ugljenmonoksida od približno 180 kg.

IV MODEL ZA EKONOMSKU ANALIZU PROIZVODNJE VODONIKA IZ BIODIZELA PARNIM REFORMINGOM

U prvom koraku izračunata je ukupna kapitalna investicija (TCI), koja je obuhvatila troškove opreme i kapitalne zahteve za ugradnju jedinica, instrumentaciju i kontrolu, sistem cevovoda, električne sisteme i nepredviđene slučajeve. Efekti skaliranja i krive iskustva, inflacija, pritisak i materijalni faktori su uzeti u obzir kao što je prikazano u jednačini (7).

$$EC_n = EC_{ref} \cdot \left(\frac{s}{s_{ref}}\right)^d \cdot \left(\frac{CEPCI_{2014}}{CEPCI_{ref}}\right) \cdot F_{pre} \cdot F_{mat} \cdot (1-L)^{\log_2(n)} \quad (7)$$

$$TCI = \sum_{i=1}^m EC_i \cdot (1 + \sum_{j=1}^5 F_{eco,j}) \quad (8)$$

gde su: EC_n - troškovi opreme za n-tu proizvedenu jedinicu. EC_{ref} i s_{ref} su troškovi opreme i kapacitet referentne komponente, d je faktor skaliranja, $CEPCI$ - indeks troškova korišćenog postrojenja za hemijsko inženjerstvo, F_{pre} i F_{mat} su opcioni pritisak i materijalni faktori. L je iskustvena stopa i n ukupan broj proizvedenih izmenjivačkih jedinica. Za iskorišćenu tehnologiju pretpostavljena je stopa iskustva između 10% i 20%, što znači da se jedinični troškovi proizvodnje smanjuju za 10% do 20%, kada

se ukupan obim proizvedenih jedinica udvostruči. Ukupni kapitalni troškovi izračunati su prema jednačini (8).

Zahtevi za troškove ugradnje opreme, instrumentacije i upravljanja, sistema cevovoda i električnih sistema uzeti su u obzir množenjem troškova kupljene opreme unapred definisanim faktorima odnosa $F_{eco,j}$. Anuitetna metoda amortizacije korišćena je za izračunavanje godišnjih kapitalnih zahteva.

V STRUKTURA TROŠKOVA PROIZVODNJE VODONIKA IZ BIODIZELA

Operativni troškovi sastoje se od troškova za biodizel i komunalne usluge (električna energija, napojna voda). Godišnji troškovi održavanja, osiguranja, poreza i obrtnog kapitala su pretpostavljeni u odnosu na kapitalnu investiciju (TCI): 4,5%, 2% i 10%, respektivno. Troškovi rada procenjeni su pretpostavljajući 300 radnih sati godišnje uz bruto troškove rada od 37,32 €/h. Svi relevantni parametri za tehnološko-ekonomsku procenu dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Relevantni parametri za tehnološko-ekonomsku procenu proizvodnje vodonika iz biodizela [2]

Specifikacije postrojenja i cene komunalnih usluga	Jedinica	Ekonomski faktori		
Životni vek postrojenja: 20	godina	Kamatna stopa:	7	% na TCI
Sati punog opterećenja: 8640	h/godišnje	Faktor instalacije:	25	% EC
		Instrumentacija i kontrola:	22	% EC
Ukupni broj radnih sati godišnje: 300	h/godišnje	Sistem cevi:	5	% EC
Bruto troškovi rada: 37,32	€/h	Električni sistem:	10	% EC
		Nepredviđeni troškovi:	16	% EC
Cena el. energije: 0,139	€/kWh	Održavanje:	4.5	% TCI
Cena vode: 1,71	€/m ³	Osiguranje i porezi:	2	% TCI
Cena biodizela (sa porezima): 1,36	€/l	Obrtni kapital	10	% TCI

Neto troškovi proizvodnje vodonika (NPC) su izračunati na osnovu optimizovanog reformer koncepta prikazanog na slici 1 i ekonomskih faktora i pretpostavki predstavljenih u tabeli 1. Za prvu proizvodnu reforming jedinicu, ukupni troškovi opreme iznose 442 031 €. Najskuplja oprema je reformer biodizela zajedno sa instaliranim gorionikom i PSA jedinicom, što otprilike respektivno iznosi 45,8% , 18,7% i 18,0%, od ukupnih troškova opreme.

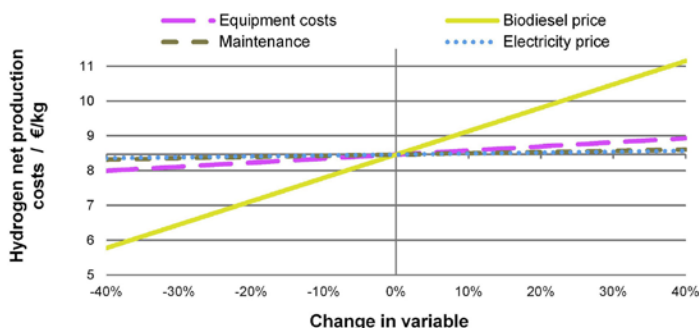
Na osnovu godišnjih zahteva za kapitalnim troškovima i tržišnih cena sirovina, komunalnih usluga i troškova rada u Nemačkoj u 2014. godini, procenjeni su ukupni troškovi proizvodnje vodonika od 10,58 €/kg H_2 , od toga, troškovi biodizela čine više od 63% NPC-a. Godišnji kapitalni troškovi su druga najveća stavka troškova, s tim što udeo od 17,83% kapitalnih troškova nema bitan uticaj na NPC u poređenju sa cenom biodizela. Troškovi rada, poreza i osiguranja imaju mali efekat na troškove proizvodnje vodonika. Relativno visoka tržišna cena biodizela je rezultat uzimanja u obzir poreza (akciza). U nekim evropskim zemljama vodonik i sirovine koje se koriste u njegovom

proizvodnom procesu su neoporezivi, pa posledica toga, značajno su niži troškovi proizvodnje vodonika.

VI ANALIZA OSETLJIVOSTI

Uticaj tri najvažnije stavke troškova na NPC (cena biodizela, godišnji kapitalni troškovi i troškovi održavanja), kao i cena električne energije, razmatraju se u analizi osetljivosti. Naročito se cene biodizela mogu vremenom značajno razlikovati usled globalnih promena cena nafte ili zakonskih i fiskalnih okvirnih uslova. Urađena je analiza osetljivosti za 25-tu proizvedenu izmenjivačku jedinicu pretpostavljajući stopu iskustva od 20%. Počevši od početnog NPC-a od 8,46 €/kg, troškovi i cene su varirani u rasponu od +/- 40%. Rezultati su predstavljeni na slici 2.

Variranje cene biodizela znatno utiče na troškove proizvodnje vodonika i iznosi 5,77 €/kg za 40% nižu cenu od bazne, odnosno 11,15 €/kg za 40% višu tržišnu cenu, respektivno. Variranje troškova opreme ima značajno niži uticaj sa NPC-om u rasponu od 8 do 8,93 €/kg. S obzirom da je tačnost procene troškova opreme unutar ±30%, analiza NPC ukazuje da bi za ove granične vrednosti troškovi proizvodnje vodonika bili u rasponu između 8,1 i 8,81 €/kg. Troškovi održavanja i električne energije zanemarljivo utiču na troškove proizvodnje vodonika.



Slika 2. Rezultati analize osetljivosti 25-te jedinice [2]

Kao zaključak može se reći da je cena biodizela dominantna u proceni troškova proizvodnje vodonika. Na osnovu slike 2. može se zaključiti da cena vodonika dobijenog iz biodizela praktično linearno zavisi od cene sirovine, odnosno biodizela. Ta zavisnost se može iskazati sledećom relacijom:

$$C_{H_2} \left(\frac{EURO}{l} \right) \approx 5 * C_{BD} \left(\frac{EURO}{l} \right) + 1,7 \quad (9)$$

Gde je C_{H_2} specifična cena vodonika, a C_{BD} je specifična cena biodizela sa uključenim porezima. Relacija (9) je izvedena pod pretpostavkom kapitalnih troškova koji odgovaraju 25. instaliranoj jedinici.

VII PERSPEKTIVE I USLOVI KONKURENTNOSTI VOZILA SA VODONIČNIM GORIVNIM ČELIJAMA

Razvoj automobilske industrije i generalno transporta ljudi i roba je okrenut ka elektrifikaciji i dekarbonizaciji zbog problema zagađivanja životne sredine i iscrpljenosti fosilnih goriva. Međutim, u tehnološkom pogledu postoji nekoliko međusobno konkurentnih smernica daljeg razvoja. U studiji [3] izvršena je tehnno-ekonomska analiza pet tehnologija vozila i to:

- Vozila sa unutrašnjim sagorevanjem (eng. *Internal combustion engine vehicle* – ICEV)
- Hibridna električna vozila (eng. *Hybrid electric vehicles* - HEV),
- Hibridna električna vozila sa punjenjem (eng. *Plug-in hybrid electric vehicles* - PHEV),
- Električna vozila sa baterijama (eng. *Battery electric vehicles* - BEV).
- Električna vozila sa gorivnim ćelijama (eng. *Fuel cell electric vehicle*- FCEV).

U tabeli 2. prikazani su ključne karakteristike za analizirane tipove vozila prema podacima iz 2017. godine. Oznake u tabeli imaju sledeće značenje: MSRP (*manufacturer's suggested retail price*) - preporučena proizvođačka cena električnog vozila u maloprodaji.

Kao što se može videti iz tabele 2, u svetu je još uvek dominantna prodaja vozila sa unutrašnjim sagorevanjem. Za analiziranu kategoriju modela tipa *Sedan* srednje veličine, u 2017. godini je prodato oko 17 miliona vozila ICEV, oko 100000 BEV i isto toliko PHEV, oko 400000 HEV, dok je prodaja vozila sa gorivnim ćelijama (FCEV) bila svega 2300. Ipak, očekuje se da će razvoj tehnologije gorivnih ćelija za vozila i pad cene vodonika u budućnosti ovu kategoriju vozila učiniti vrlo konkurentnom električnim vozilima sa baterijama.

Tabela 2. Poređenje vozila sa različitim tehnologijama pogona, zasnovano na limuzini srednje veličine (poreski kredit nije uračunat) [3]

	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
Ekonomija goriva (km/litri)	10,63-14,88	17,01-21,26	46,77-55,27 (Elek.)	46,77-55,27 (Elek.)	27,63-31,89
Domet (km)	~804,67	~804,67	~804,67	193,12-402,34	~563,27
MSRP (\$)	20-30k	25-35k	30-40k	30-50k	55-60k
Ukupna godišnja prodaja ¹	~17 miliona	~400.000	~100.000	~100.000	~2.300

¹(zasnovano na podacima o prodaji vozila iz 2017-te godine <https://afdc.energy.gov/data/>)

U tabeli 3. prikazane su očekivane karakteristike i specifične cene ključnih komponenta u vozilima sa različitim tehnologijama za 2035.

Kao glavni ekonomski pokazatelj za procenu konkurentnosti vozila uzet je parametar svedenih troškova vlasnika vozila (*CVO* - *cost of vehicle ownership*), koji su računati prema sledećem modelu:

$$CVO = \frac{VPP + F - R}{S} \quad (10)$$

gde su: VPP maloprodajna cena vozila u 2018. (*vehicle purchase price in 2018*) izražena USD, S - je ukupni put koji je prešlo vozilo u toku životnog veka izražen u kilometrima.

Tabela 3. Prognozirane karakteristike vozilima sa različitim tehnologijama za 2035. godinu [3]

Tehnologija	Jedinice	Scenario 2035.		
		Usporeni	Bazni	Ubrzani
Kretanje troškova pre marže na malo				
Sistemske troškovi gorivnih ćelija	\$/kW-net	40,3	33,9	30,3
Troškovi rezervoara vodonika	\$/kWh	11,7	9,5	8,2
Troškovi baterija	\$/kW	28,0	25,0	20,0
Cena motora	\$/kW	8	7	6
Specifična snaga				
Specifična snaga gorivnih ćelija	W/kg	659	680	740
Gustina energije baterije	kWh/kg	0,15	0,16	0,20
Specifična snaga motora	W/kg	1700	1750 ⁵	1800
Drugi trendovi				
Gustina energije rezervoara vodonika	kWh/kg	1,6	1,8	2,3
Pik efikasnosti gorivne ćelije	%	60	62	65
Atkisonova pik efikasnost	%	41	45	47
Gliderevo smanjenje mase	%	15,1	29,8	38,3

Na osnovu podataka iz *The Transportation Energy Data Book*, u studiji je uzeto da je $S=113.858$ km za eksploatacioni period od 5 godina, odnosno $S=347.660$ km, za eksploatacioni period od 15 godina. Pretpostavljeno je da vozila svih analiziranih tipova pogona prelaze isti put u projektovanom eksploatacionom veku. R - je ostatna vrednost vozila nakon završetka eksploatacionog veka. Pretpostavljeno je da ostatna vrednost pada na $R=0$ nakon 15 godina eksploatacije, odnosno da iznosi 38,2% od VPP nakon 5 godina eksploatacije.

F - su ukupni troškovi za gorivo za period eksploatacije od $n=5$ ili 15 godina, koji su diskontovani sa stopom od 7%. Ovi troškovi su računati prema jednačini (11):

$$F = \sum_{n=1}^{n=5(15)} \frac{P_e^n * S_n}{FE * (1+0,07)^{n-1}} \quad (11)$$

gde je P_e^n specifična cena energije u n -toj godine izražena USD/jedinici energije, na primer za električno vozilo to je USD/kWh, USD/litra za vozila na benzin, odnosno USD/kg za vozila na vodonik. Specifični troškovi su procenjeni na osnovu efikasnosti konverzije pojedinih energenata. S_n put koji je prešlo vozilo u n -toj godini eksploatacije. Svi proračuni su bazirani na

modelu *Toyota Camry*, kao popularnog automobila srednje klase i veličine, uz pretpostavku da je realizovan sa različitim pogonom. Pri čemu je pretpostavljeno da vozilo za sve analizirane pogone zadržava slične performanse (ubrzanje do 96,56 km/h, autonomiju i slično) kod svih pet analiziranih pogona.

U tabeli 4. prikazani su rezultati sprovedenih analiza u kojima su komparativno prikazani podaci o performansama i ekonomskim pokazateljima za test vozilo pogonjeno različitim tehnologijama. Estimacije su urađene za 2035. godinu.

Na osnovu tri analizirana scenarija: bazni, usporeni i ubrzani, procenjene su tehničke performanse i ekonomski parametri za pet tehnologija vozila u budućnosti. Prema sprovedenim analizama, FCEV mogu potencijalno biti konkurentni po pitanju troškova i imati uporedive performanse čak i sa vozilima sa motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (ICEV).

U scenarijima do 2035. godine, petogodišnji troškovi vlasništva nad FCEV-om su oko 36% veći od troškova za ICEV, (22% veći za 15-godišnji period vlasništva vozila). S obzirom da vozila sa unutrašnjim sagorevanjem nisu perspektivna zbog ekologije i vrlo je izvesno da će njihova upotreba u budućnosti biti opterećena visokim ekološkim taksama ili će biti potpuno zabranjena, bitnije je poređenje FCEV i njima konkurentnih BEV. Sprovedene analize pokazuju da će već 2035. godine troškovi vlasništva FCEV biti oko 15% niži od BEV-a (12% niži za eksploatacioni vek od 15 godina). Pokazuje se da je cena vodonika presudna za određivanje konkurentnosti troškova FCEV-a. Projekcije cene vodonika na stanicama su oko 6 USD po kg u 2035. godini.

Tabela 4. Uporedna analiza performansi i ekonomskih pokazatelja za vozila različitih tehnologija u 2035. godini [3]

Tehnološki rezultati scenarija 2035					
	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
2035 Usporeni scenario					
Ekonomija goriva (km/litru)	12,33	19,56	37,84	28,91	35,29
0-60 mph / vreme (s)	8,3	8,3	8,3	8,1	8,3
Snaga motora/gorivne ćelije (kW)	131	104	55	-	117
Snaga motora (kW)	-	30	107	200	167
Domet (km)	482,80	489,24	1161,95	321,87	452,23
Masa (kg)	1649	1801	2088	2598	2181
Kapacitet baterije (kWh)	-	1,3	23	86	22
2035 Bazni scenario					
Ekonomija goriva (km/litru)	13,6 ¹	20,41	48,89	34,44	37,84
0-60 mph / vreme (s)	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Snaga motora/gorivne ćelije (kW)	116	92	44	-	95

Snaga motora (kW)	-	30	100	148	145
Domet (km)	482,80	492,46	1298,74	321,87	455,44
Masa (kg)	1439	1590	1860	2197	1872
Kapacitet baterije (kWh)	-	1,3	22	77	22
2035 Ubrzani scenario					
Ekonomija goriva (km/litri)	14,03	21,26	52,72	35,71	40,39
Ubrzanje 0-60 mph/s	8,3	8,3	8,3	8,2	8,3
Snaga motora/gorivne ćelije (kW)	108	83	39	-	84
Snaga motora (kW)	-	30	94	142	130
Domet (km)	482,80	474,76	1512,78	323,48	450,62
Masa (kg)	1318	1466	1712	1931	1666
Kapacitet baterije (kWh)	-	1,3	21	73	22

VIII TEHNOLOGIJE VODONIČNIH GORIVNIH ĆELIJA ZA POGON ELEKTRIČNIH VOZILA

Tehnologije gorivnih ćelija za primenu u električnim vozilima se intenzivno razvijaju. Kao perspektivna tehnologija za ovu primenu najbolje se pokazala gorivna ćelija sa propusnom membranom za protone (PEMFC). One rade na niskim temperaturama od oko 100 °C, ali takođe i na temperaturama od 150-200°C. Ove gorivne ćelije koriste elektrolit od polimera koji ima ulogu propusne membrane za protone, dok se zbog relativno niske temperature koristi platina kao katalizator. Koliko je intenzivan razvoj gorivnih ćelija u automobilske industriji pokazuje podatak koji je izneo Daimler. Od 2010. do 2017. godine, dakle za samo 7 godina razvoja, postignuta je manja masa gorivne ćelije za 30%, upotreba platine je smanjena čak 90%, a da su pritom postignute značajno bolje karakteristike u pogledu radnih performansi gorivnih ćelija.

Analizirajući energetske efikasnost celokupnog procesa konverzije biodizela u vodonik i vodonika u električnu i mehaničku energiju za pogon vozila, može se zaključiti da je ovaj proces efikasniji od tradicionalnih motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Efikasnost reforming procesa proizvodnje vodonika iz biodizela je, pri optimalnim uslovima, oko 78%, efikasnost savremenih tehnologija gorivnih ćelija ide do 60%, dok je efikasnost elektromehaničke konverzije u električnim motorima sa pretvaračima oko 90%.

IX ZAKLJUČAK

U naučnim krugovima postoje intenzivne aktivnosti za promovisanje vodonika kao goriva budućnosti. Jedna od perspektivnih primena vodonika jeste u automobilske industriji. Cena vodonika je presudni faktor da bi troškovi vlasništva FCEV postali konkurentni nad ostalim tehnologijama pogona vozila sa sličnim tehničkim performansama. U ovom radu dat je pregled

tehnologije proizvodnje vodonika parnim reforming postupkom. Pokazano je da tehnologija proizvodnje vodonika iz biodizela, na postojećem nivou može obezbediti troškove od 7 – 9 €/kg. Usporedna ekonomska analiza vozila različitih kategorija, koja je sprovedena u studiji [3], pokazuje da će već 2035. godine troškovi vlasništva vozila sa gorivnim ćelijama biti oko 15% niži od troškova vozila sa baterijama, dok će u 2050. ova razlika biti još veća, kao rezultat jačeg napretka u proizvodnji i isporuci gorivnih ćelija i vodonika. Pokazuje se da je cena vodonika presudna za određivanje konkurentnosti troškova vozila sa gorivnim ćelijama. Projekcije cene vodonika na stanicama su oko 6 USD/kg u 2035. godini i 2,5 USD/kg u 2050. godini. Ovi ciljevi cena vodonika su presudni da bi se troškovi vlasništva vozila sa gorivnim ćelijama postali konkurentni nad ostalim tehnologijama pogona vozila sa sličnim tehničkim performansama.

Kao generalni zaključak vezan za tehnološke i političke perspektive električnih vozila, nameće se utisak da je interes automobilske industrije i globalne energetske politike da se razvijaju paralelno tehnologije vozila sa baterijama i vodoničnim gorivnim ćelijama, kako bi se stvorila zdrava tehnološka konkurencija, koja bi permanentno doprinosila razvoju oba koncepta i boljoj geopolitičkoj stabilnosti u pogledu sirovinskih baza potrebnih za razvoj automobilske industrije u budućnosti.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao u toku izrade elaborata *Tehno-ekonomska analiza proizvodnje vodonika iz biodizela i njegove upotrebe za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama za pogon električnih vozila* koji je rađen za potrebe firme Makpetrol d.o.o. Beograd kojoj dugujemo posebnu zahvalnost.

LITERATURA

- [1] Felseghi, R.A., Carcadea, E., Raboaca, M.S., Trufin, C.N., Filote, C. Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications, *Energies*, Vol 12, Issue 23, pp. 4593, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12234593>
- [2] Martin, S., Albrecht, F.G., van der Veer, P., Lieftink, D., Dietrich, R.U. Evaluation of on-site Hydrogen generation via steam reforming of biodiesel: Process optimization and heat integration, *International journal of hydrogen energy* Vol. 41, No. 16, pp. 6640-6652, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.138>
- [3] Yuche, C., Marc, M. Model-based techno-economic evaluation of fuel cell vehicles considering technology uncertainties, *Transportation Research Part D 74: Transport and Environment*, Vol. 74, pp. 234–244, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.002>
- [4] Tehno-ekonomska analiza proizvodnje vodonika iz biodizela i njegove upotrebe za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama za pogon električnih vozila, elaborat, Makpetrol d.o.o. Beograd 2021.

AUTORI

dr Iva Batić - naučni saradnik, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, iva@etf.rs

dr Željko Đurišić - vanredni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, djurisic@etf.rs

mr Miroljub Babić - direktor, Makpetrol D.O.O. Beograd, miroljub.babic@makpetrol.rs