POTENCIJAL ZA PROIZVODNJU VODONIKA POSTUPKOM GASIFIKACIJE *MISCANTHUS × GIGANTEUS GREEF ET DEU* PROIZVEDENOM NA NEKORIŠĆENOM POLJOPRIVREDNOM ZEMLJIŠTU U REPUBLICI SRBIJI

POTENTIAL FOR HYDROGEN PRODUCTION BY THE GASIFICATION PROCESS OF *MISCANTHUS × GIGANTEUS GREEF ET DEU* PRODUCED ON UNUSED AGRICULTURAL LAND IN THE REPUBLIC OF SERBIA

Slobodan CVETKOVIĆ[1*], Radmila PIVIĆ[2], Aleksandra STANOJKOVIĆ-SEBIĆ[2], Jelena MAKSIMOVIĆ[2], Željko DŽELETOVIĆ[3], Zoran DINIĆ[2]

[1]Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju,
Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju

[2]Institut za zemljište, Beograd

[3]Univerzitet u Beogradu, Institut za primenu nuklearne energije,Beograd

Energetska tranzicija predstavlja veliki izazov za savremeno društvo.Vodonik kao čist energent može igrati jednu od ključnih uloga u ovoj tranziciji zahvaljujući svojoj dostupnosti i emisiji u životnu sredinu bez gasova sa efektom staklene bašte. U Republici Srbiji se ne koristi preko 400,000 hektara poljoprivrednog zemljišta, koje se može iskoristiti za proizvodnju vodonika iz biomase. U ovom radu analiziran je potencijal za proizvodnju vodonika postupkom gasifikacije Miscanthus × giganteus Greef et Deu proizvedenom na nekorišćenom poljoprivrednom zemljištu u Republici Srbiji. Dobijeni rezultati ukazuju na značajan potencijal proizvodnje vodonika postupkom gasifikacije Miscanthus × GiganteusGreef et Deu, koji se dalje može koristiti kao energetski izvor.

Ključne reči: *Miscanthus × giganteus Greef et Deu; vodonik; poljoprivredno zemljište; energija*

The energy transition is a great challenge for modern society. Hydrogen as a clean energy source can play one of the key roles in this transition due to its availability and emissions into the environment without GHG gases.

The Republic of Serbia does not use over 400,000 hectares of agricultural land that can be used for the production of hydrogen from biomass. In this paper, the potential for hydrogen production by the gasification process of Miscanthus × Giganteus Greef et Deu which was produced on unused agricultural land in the Republic of Serbia is analyzed. The obtained results indicate a significant potential for hydrogen production by the gasification process of Miscanthus × Giganteus Greef et Deu, which can be further used as an energy source.

Key words: *Miscanthus × giganteus Greef et Deu; hydrogen; agricultural land; energy*

1 UVOD

Energija je pokretačka snaga u tehnološkom i ekonomskom smislu za razvoj društava u celini. Današnje snabdevanje energijom ima značajan uticaj na životnu sredinu, budući da se energija uglavnom dobija iz fosilnih goriva. Rezerve fosilnih goriva se smanjuju dok potražnja za energijom brzo raste [1].Klimatske promene, iscrpljivanje i geografska fragmetacija fosilnih goriva, problemi sa ljudskim zdravljem, kao i sve izraženije energetsko siromaštvo, predstavljaju osnov okretanju ka alternativnim izvorima energije. Države koje nemaju pristup naftnim rezervama zavise od snabdevanja energijom od drugih zemalja, što se manifestuje snažanim uticajem na politiku energetske bezbednosti.

Poslednjih godina u toku je istraživanje o alternativnim gorivima u cilju prevazilaženja zavisnost od fosilne energije u cilju da se obezbedi održiv rast ekonomija i društva. Krajem 2019.

* Corresponding author's email: ing.slobodancvetkovic@yahoo.com

godine Evropska komisija (EK) predstavila je evropsku Zeleni dogovor [2], u kojem se navode smernice za postizanje neto emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG gasovi) do 2050. godine. Zeleni dogovor identifikuje čisti vodonik kao prioritetno područje za postizanje neutralnosti ugljenika do 2050. Vodonik se smatra jednim od ključnih resursa za buduće energetske sisteme kao fleksibilan izvor energije za industriju i transport, a koji pri tome doprinosi smanjenju emisije GHG gasova i emisije čestica. Godišnje se globalno proizvede oko 120 Mt vodonika (kao čist vodonik ili u miksu sa drugim gasovima)[3]. Dominatno se vodonik dobija iz fosilnih goriva (98%), dok se samo 2% (elektroliza) proizvodi iz obnovljivih resursa [4]. Međunarodna Agencija za energiju (IEA) [5] navodi da globalni ekonomski potencijal vodonika iznosi 19 EJ (135 Mt) iz obnovljive električne energije.

Biomasa predstavlja obnovljiv izvor energije iz koga se može generisati vodonik. Proizvodnja obnovljivog vodonika postupkom gasifikacije biomase predstavlja područje koje zaokuplja pažnju istraživača poslednjih godina [1]. Gasifikacija biomase je termohemijska konverzija biomase u gasovito gorivo (sintetički gas-singas) u medijumu za gasifikaciju, kao što su vazduh, kiseonik i/ili para. Odvija se na temperaturama između 500 i 1400 °C, a radni pritisci variraju od atmosferskog do 33 bara u zavisnosti od tipa biomase i tipa reaktora [6].Singas je gasna smeša čiji sastav zavisi od operativnih uslova rada postrojenja i primarno sadrži vodonik, metan, ugljen monoksid, azot i ugljen dioksid. *Miscanthus × giganteus Greef et Deu* (Miskantus) je dugovečna trava i predstavlja značajan izvor biomase čijom se gasikacijim može proizvoditi vodonik. Ovaj tip biomase se ne proizvodi komercijalno u Republic Srbiji, ali naučni instituti imaju svoje plantaže na kojima istražuju moguću konverziju ovog resursa u energente ili korisne hemikalije. Na Slici 1. prikazane su plantaže *Miscanthus × giganteus Greef et Deu* u Republici Srbiji koje su podigle istraživačke organizacije. Prinos Miskantusa u Republic Srbiji u zavisnosti od agrotehničkih uslova iznosi od 15.2-20.8 t SM/ha [7].

Republika Srbija ima 3,861,477 ha poljoprivrednog zemljišta, od kojeg se 424,054 ha ne koristi za poljoprivrednu proizvodnju (Tabela 1). Ovo zemljište može poslužiti za prozvodnju *Miscanthus × giganteus Greef et Deu* iz koga bi se daljom gasifikacijom mogao proizvoditi obnovljivi vodonik.Cilj ovog rada je da proceni potencijal vodonika koji bi se prozvodio postupkom gasifikacije *Miscanthus × giganteus Greef et Deu* na nekorišćenom poljoprivrednom zemljištu u Republici Srbiji, kao i da sagleda mogućnosti za njegovu primenu:

- u prozvodnji električne energije iz nastalog vodonika
- u supstituciji prirodnog gasa u gasnoj mreži

Rezultati ovog istraživanja mogu poslužiti donosiocima odluka da razmotre primenu ovako proizvedenog vodonika u budućoj dekarbonizaciji srpskog energetskog sistema, kao i da ovaj koncept koriste u cilju povećanog korišćenja poljoprivrednog zemljišta koje se danas ne koristi.

Tabela 1. Korišćenje poljoprivrednog zemljišta u Srbiji [8]

	Ukupno	Korišćeno poljoprivredno zemljište	Nekorišćeno poljoprivredno zemljište
Površina poljoprivrednog zemljišta u (ha)	3,861,477	3,437,423	424,054

2 METODOLOGIJA

2.1 Proračun potencijala za proizvodnju vodonika postupkom gasifikacije Miscanthus × giganteus Greef et Deu proizvedenom na nekorišćenom poljoprivrednom zemljištu

Osnov za proračun u ovom istraživanju bila su dosadašnja istrživanja korišćenja Miskantusa za proizvodnju energije u Republici Srbiji, kao i pretpostavka da se 5% nekorišćenog poljoprivrednog zemljišta upotrebi za prozvodnju *Miscanthus × giganteus Greef et Deu*, koji bi se dalje koristio za

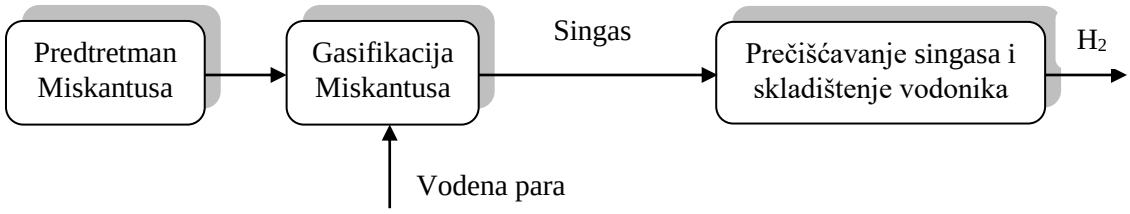
generisanje vodonika postupkom gasifikacije. Nekorišćeno poljoprivredno zemljište po statističkim regionima u Republici Srbiji prikazano je u Tabeli 2.

Slika 1. Plantaže Miscanthus × giganteus Greef et Deu koje su podigle istraživačke organizacije u Republici Srbiji

Tabela 2.Nekorišćeno poljoprivredeno zemljište po statističkim regionima u Srbiji [8]

Region	**Nekorišćeno poljoprivredno zemljište(ha)**
Beograd	12,076
Vojvodina	72,313
Šumadija i Zapadna Srbija	141,220
Južna i Istočna Srbija	198,445

U ovom radu razmatran je postupak gasifikacije Miskantusa vodenom parom čija je blok šema prikazana na Slici 2. Pretpostavljeno je da se ovaj proces odvija na tempearaturi od 815-880 °C uz prinos singasa od (1.1 m^3/kg suve materije Miskantusa) i sadržajem vodonika od 40% [9].



Slika 2. Blok šema gasifikacije Miskantusa vodenom parom

Količina suve meterije u proizvedenom Miskantusu računata je iz jednačine (1).

$$M_{MXG}=S\cdot f\cdot P \quad (1)$$

gde je: M_{MXG} proizvedena suva materija Miskantusa(kg); S je površina poljoprivrednog zemljišta koja se ne koristi za biljnu proizvodnju u Srbiji; f je procenat neobrađenog poljoprivrednog zemljišta koje se koristi za proizvodnju Miskantusa (5%); P je prinos suve materije Miskantusa po hektaru (18 t SM/ha) [7].

Zapremina vodonika u dobijenom singasu računata je kao:

$$V_{H2}=0.4\cdot M_{MXG}\cdot Y \quad (2)$$

gde je: V_{H2} zapremina vodonika u dobijenom singasu (m^3); Y prinos singasa po kg SM Miskantusa (1.1 m^3/kg SM) [9].

Pretpostavljeno je da se 10% količine vodonika izgubi tokom prečišćavanja singasa i skladištenja vodonika [10], pa je ukupna masa proizvedenog vodonika gasifikacijom Miskantusa računata iz formule (3).

$$M_{H2}=0.9\cdot\varrho\cdot V_{H2} \quad (3)$$

gde je: M_{H2} masa dobijenog vodonika (kg); ϱ gustina vodonika (0.0889kg/m_N^3).

2.1.1 Proračun proizvodnje električne energije iz dobijenog vodonika gasifikacijom Miskantusa

U cilju determinisanja moguće proizvodnje električne energije iz vodonika nastalog gasifikacijim Miskantusa pretpostavljeno je korišćenje vodonika u gorivnim ćelijama. Proizvodnja električne energije iz vodonika nastalog gasifikacijim Miskantusa računata je iz jednačine (4).

$$Ee= M_{H2}\cdot LHV_{H2}\cdot\mu e \quad (4)$$

gde je: E_e godišnja proizvodnja električne energije u kWh; LHV_{H2} donja toplotna moć vodonika (33.3 kWh/kg) [11]; stepen energetske efikasnosti gorivne ćelije (0.6) [12,13]

2.1.2 2.1.2 Proračun supstitucije prirodnog gasa vodonikom dobijenim gasifikacijom Miskantusa

Iskustvo pokazuje da se do 10% prirodnog gasa može supstitusati vodonikom u gasnoj mreži bez većeg uticaja na koroziju opreme i sigurnosne zahteve mreže[14].Količina prirodnog gasa koja se može supstituisati vodonikom računata je kao:

$$V_{NG}= M_{H2}\cdot LHV_{H2}/LHV_{NG} \quad (5)$$

gde je: V_{NG} zapremina prirodnog gasa koja se može supstituisati vodonikom (m^3); LHV_{NG} je donja toplotna moć prirodnog gasa (39.2 MJ/m^3) [15].

3 REZULTATI I DISKUSIJA

Korišćenjem jednačina (1-3) izračunata je količina vodonika koja se može dobiti gasifikacijom Miskantusa proizvedenom na 21,202.7 ha nekorišćenog poljoprivrednog zemljištu i koja je iznosila 13.43 kt. Proizvodnja vodonika gasifikacijom Miskantusa sa nekorišćenog poljoprivrednog zemljišta po statističkim regionima Srbije prikazana je u Tabeli 3.

Specifičan prinos vodonika po hektaru kultivisanog Miskantusa iznosi 0.6 t/ha Miskantusa. Imajući u vidu da donja toplotna moć vodonika iznosi 120 MJ/kg [11], može se zaključiti da ova izračunata količina vodonika može supstituisati 38,492 tona ekvivalenata nafte primarne energije (1 ten = 41868 MJ).

Tabela 3. Proizvodnja vodonika gasifikacijom Miskantusa sa nekorišćenog poljoprivrednog zemljišta po statističkim regionima Srbije

Region	Prinos vodonika (kt)
Beograd	0.38
Vojvodina	2.29
Šumadija i Zapadna Srbija	4.47
Južna i Istočna Srbija	6.29

Korišćenjem jednačine (4) izračunata je električne energije koja bi se mogla proizvesti iz izračunate količine vodonika u iznosu od 268,331,400 kWh. Ako je poznata činjenica da godišnja potrošnja električne energije u Srbiji iznosi oko 4000 kWh/domaćinstvu [16], proračunata količina električne energije bila bi dovoljna za snabdevanje 67,083 domaćinstava godišnje. Proizvodnja električne energije na ovaj način bila bi predvidiva i bez uticaja na stabilnost elektro-energetskog sistema Republike Srbije.

Količina prirodnog gasa koja se može supstituisati u gasnoj mreži računata je iz jednačine (5) i iznosila je 41,112,244.9 m_N^3.Imajući na umu Republika Srbija godišnje troši 2.5 milijardi m_N^3 prirodnog gasa [17], moglo bi se supstituisati 1.6% prirodnog gasa vodonikom. Kako supstitucija do 10% prirodnog gasa vodonikom ne predstavlja problem u funkcionisanju mreže, može se izvesti zaključak da be se kompletno proračunata količina vodonika mogla upumpavati u mrežu prirodnog gasa bez remećenja njenog rada.

U ovom istraživanju korišćene su različite aproksimacije, što uvodi određene stepene nesigurnosti u sprovedenom proračunu.Ovi stepeni nesigurnosti odnose se procenu prinosa Miskantusa sa poljoprivrednog zemljišta, prinos singasa, procenu toplotne moći vodonika i stepena energetske efikasnosti gorivih ćelija. Iz tog razloga vrednosti procenjenih parametara korišćenih u ovom radu uvek su bile restriktivne.

4 ZAKLJUČAK

U ovom radu istraživana je mogućnost proizvodnje vodonika gasifikacijom *Miscanthus × giganteus Greef et Deu* proizvedenom na nekorišćenom poljoprivrednom zemljištu Republike Srbije i njegovo dalje koriščenje za proizvodnju energije. Dobijeni rezultati pokazuju da se sa 5% nekorišćenog poljoprivrednog zemljišta gasifikacijom Miskantusa može proizvesti 13.43 kt vodonika, generisati 268,331,400 kWh električne energije i supstituisati 41,112,244.9 m_N^3 prirodnog gasa. Ove analize mogu poslužiti kreatorima energetske i poljoprivredne politike da razmotre primenu proizvedenog vodonika na ovaj način u budućoj dekarbonizaciji proizvodnje energije u Republici Srbije, kao i da ovaj koncept koriste u cilju povećanog korišćenja poljoprivrednog zemljišta koje se danas ne koristi.

5 LITERATURA

[1] Cao, L., Yu, I.K.M., Xiong, X., Tsang, D.C.W., Zhang, S., Clark, J.H., Hu, C., Ng, Y.H., Shang, J., Ok, Y.S., Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects, Environ Res. 2020,186,109547.

[2] *** European Commission. The European Green Deal. vol. Brussels, Belgium: Communicat; 2019.

*** IRENA (2019), Hydrogen: A renewable energy perspective, International Renewable Energy Agency,Abu Dhabi.

[4] Suleman, F., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options, Int. J. Hydrogen Energy ,2015, 40, 6976–6987.
[5] *** IEA International Energy Agency. World Energy Outlook 2019. Paris: OECD/IEA; 2019.
[6] Iribarren, D., Susmozas, A., Petrakopoulou, F., Dufour, J., Environmental and exergetic evaluation of hydrogen production via lignocellulosic biomass gasification. J. Clean Prod., 2014, 69, 165–75.
[7] Dzeletović, Ž., Maksimović, J., Živanović, I.,Yield of *Miscanthus* × *giganteus* during crop establishment at two locations in Serbia, Journal on Processing and Energy in Agriculture, 2014, 18 (2), 62-64
[8] Radojević, U., Ninković, M., Milovanović, J. Identification Of Marginal Land Suitable For Biofuel Production In Serbia. *Acta regionalia et environmentalica*,2015, *12*, 51-55. doi: 10.1515/aree-2015-0011
[9] Michel, R. Rapagna ,S., Burg, P., Mazziotti di Celso, G., Courson, C., Zimny,T., Gruber, R., Steam gasification of Miscanthus X Giganteus with olivine as catalyst production of syngas and analysis of tars (IR, NMR and GC/MS), Biomass Bioenergy, 2011,35, I 7,2650-2658. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.054.
[10] Ayodele, T.R., Alao, M.A., Ogunjuyigbe, A.S.O., Munda, J. L., Electricity generation prospective of hydrogen derived from biogas using food waste in south-western Nigeria. Biomass Bioenergy, 2019,127, 105291.
[11] Salvi, B.L., Subramanian, K.A., Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system, Renew. Sustain. Energy Rev., 2015, 51(C), 1132-1155.
[12] Nguyen, H.Q., Shabani, B. Proton exchange membrane fuel cells heat recovery opportunities for combined heating/cooling and power applications. Energy Convers. Manag. 2020, 204, 112328.
[13] Trendewicz, A., Braun, R.J., 2013. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell based combined heat and power systems for biogas utilization at waste water treatment facilities. J. Power Sources 233, 380-393.
[14] Timmerberg, S., Kaltschmitt, M., 2019. Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines – Potentials and costs. Appl. Energy 237, 795–809.
[15] Vasić, V.; Zupančić, G. D., Kokalj, F.,Biogas as Promising Alternative in Natural Gas Distribution Systems.KGH –Heating, Ventilation and Air-Conditioning, 41(2012), 75-80.
[16] *** https://www.rts.rs/page/stories/sr/story/13/ekonomija/2472891/prosecni-racun-za-struju-od-2500-do-3500-dinara.html
[17] *** Izveštaj o radu Agencije za energetiku za 2020. godinu.