

DOI: [10.46793/CIGRE37.C3.01](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C3.01)**C3.01****IDEJNO REŠENJE DEKARBONIZACIJE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U
TE NIKOLA TESLA PRIMENOM VODONIČNIH TEHNOLOGIJA SA OBNOVLJIM
IZVORIMA ENERGIJE****CONCEPTUAL SOLUTION FOR THE DECARBONIZATION OF ELECTRICITY
PRODUCTION AT TPP NIKOLA TESLA BY APPLYING HYDROGEN TECHNOLOGIES
WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES****Jelica Janićijević, Danilo Vlahović, Александар Латиновић, Željko Đurišić***

Kratak sadržaj: Osnovni problem integracije obnovljivih izvora energije (OIE) u elektroenergetskim sistemima (EES) predstavlja problem bilansiranja, odnosno usklađivanje dijagrama proizvodnje iz OIE i zahteva potrošnje. Zbog intermitentnosti i neupravljivosti proizvodnje iz OIE, za stabilan rad sistema i pouzdano snabdevanje električnom energijom neophodno je obezbediti izvore upravljive proizvodnje. Sa druge strane, potiskivanje i gašenje termoelektrana u procesu dekarbonizacije, koje je predviđeno integrisanim nacionalnim i klimatskim planom, smanjuje raspoloživu upravljivu energiju što ugrožava uslove bilansiranja i energetske nezavisnosti EES-a. Jedan od načina prevazilaženja problema integracije OIE u EES je korišćenje OIE za proizvodnju vodonika i njegovih derivata koji se mogu skladištiti i sagorevati u gasnim elektranama. U ovom radu analizirani su uslovi izgradnje energetskog kompleksa za proizvodnju, skladištenje i upotrebu vodonika na lokaciji postojeće TE Nikola Tesla A. Osnovna ideja je da se u ovoj elektrani u perspektivi izvrši prelazak na obnovljivo gorivo, odnosno da se suštinski elektrana ne gasi, već da se izvrši supstitucija primarnog goriva, tako da ova termoelektrana pređe sa lignita i konvencionalnih kotlovskih sistema na vodonično gorivo sa gasnoturbinskim postrojenjima. Na ovaj način bi se značajan deo postojeće infrastrukture termoelektrane zadržao, a pre svega priključno postrojenje i infrastruktura prenosne mreže, koja je decenijama razvijana i optimizovala sa postojanjem jakog generatorskog čvorišta na mestu postojeće TE Nikola Tesla. U ovom radu biće sagledan potencijal za proizvodnju vodonika iz fotonaponskih panela koji bi bili izgrađeni na mestu postojećih Kolubarskih kopova. Biće prikazano idejno rešenje tehnološke šeme procesa proizvodnje, skladištenja i upotrebe vodonika i proračunata energetska efikasnost ovakvog procesa. Na osnovu dostupnih informacija o cenama opreme i održavanja, biće procenjeni troškovi proizvodnje električne energije koji se mogu očekivati u ovakvom postrojenju.

* Jelica Janićijević, student, jelicajanicijevic616@gmail.com

Danilo Vlahović, Student, dvlahovic003@gmail.com

Aleksandar Latinović, ЈП Електропривреда Србије, aleksandar.latinovic@eps.rs

Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, djurisic@etf.rs

Osnovna ideja je da se u periodima niske cene električne energije na tržištu, proizvodnja iz fotonaponske elektrane usmerava na proizvodnju vodonika, koji će biti skladišten i korišćen u periodima kada je cena električne energije visoka i kada postoje nedostaci električne energije u sistemu. Pored proizvodnje iz fotonaponske elektrane, proizvodnja vodonika može biti obezbeđivana i iz prenosne mreže u uslovima niskih cena električne energije. Dobijena toplotna energije u procesu proizvodnje i sagorevanja vodonika može biti delom iskorišćena za napajanje toplotnog konzuma.

Ključne reči: *Vodonik, Obnovljivi izvori energije (OIE), Dekarbonizacija, Te Nikola Tesla*

Abstract: The primary challenge of integrating renewable energy sources (RES) into power systems (PS) is the issue of balancing, aligning the production profile from RES with consumption demands. Due to the intermittent and uncontrollable nature of RES generation, ensuring stable system operation and a reliable electricity supply requires controllable generation sources. On the other hand, the phasing out and shutdown of thermal power plants in the decarbonization process, as outlined in integrated national and climate plans, reduce the available controllable energy, threatening both system balancing and the energy independence of the power system. One possible solution to overcoming the challenges of RES in PS is to use RES for hydrogen production and its derivatives, which can be stored and burned in gas-fired power plants. This study analyzes the conditions for constructing an energy complex for hydrogen production, storage, and utilization at the site of the existing TPP Nikola Tesla A. The fundamental idea is to transition this power plant to renewable fuel in the future, meaning that the plant would not be shut down but rather undergo a substitution of its primary fuel. This would involve shifting from lignite and conventional boiler systems to hydrogen fuel with gas turbine systems. In this way, a significant portion of the existing infrastructure of the thermal power plant would be retained, particularly the connection facilities and the transmission network infrastructure, which have been developed and optimized over decades around the presence of a strong generation hub at the site of the existing TPP Nikola Tesla. This study will explore the potential for hydrogen production from photovoltaic panels that would be installed on the site of the existing Kolubara mines. A conceptual solution for the technological scheme of the hydrogen production, storage, and utilization process will be presented, along with an energy efficiency assessment of this process. Based on available information on equipment and maintenance costs, the expected costs of electricity production in such a facility will be estimated. The core idea is that during periods of low electricity prices on the market, production from the photovoltaic power plant would be directed toward hydrogen production, which would be stored and used during periods of high electricity prices and system shortages. In addition to production from the photovoltaic power plant, hydrogen production could also be supplied from the transmission grid during periods of low electricity prices. The thermal energy generated in the process of hydrogen production and combustion processes could be partially utilized for thermal supply needs.

Key words: *Hydrogen, Renewable Energy Sources (RES), Decarbonization, TPP Nikola Tesla*

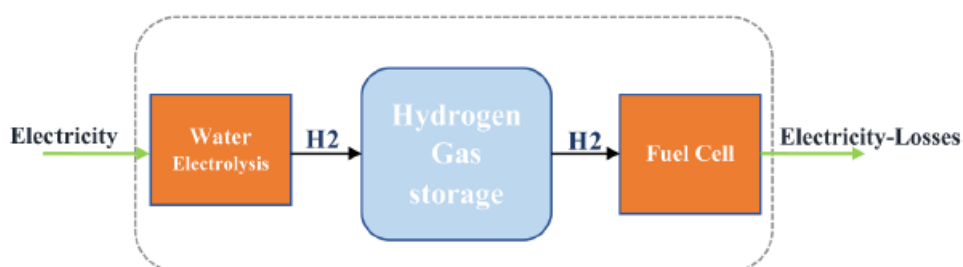
1 UVOD

Na konferenciji o klimatskim promenama u Katovicama 2018. godine potvrđeno je da emisije gasova sa efektom staklene bašte direktno utiču na globalno zagrevanje. Najveći izvor ovih emisija je sagorevanje fosilnih goriva. Koncentracija ugljen-dioksida (CO₂) u atmosferi povećala se za više od 40% u poređenju sa predindustrijskim dobom, dok su emisije metana i azotnog oksida takođe značajno porasle.

Danas se širom sveta implementira veliki broj obnovljivih izvora energije (OIE) kako bi se smanjila emisija gasova staklene bašte. Na primer, Evropska unija je uspostavila plan za smanjenje emisije gasova staklene bašte za 80% do 2050. godine i podstiče upotrebu OIE.

Globalni energetska sektor suočava se sa izazovima dekarbonizacije i prelaska na obnovljive izvore energije, pri čemu vodonik i njegovi derivati postaju ključni elementi u procesu tranzicije. Osnovni problem integracije obnovljivih izvora energije (OIE) u elektroenergetskim sistemima (EES) predstavlja problem bilansiranja, odnosno usklađivanje dijagrama proizvodnje iz OIE i zahteva potrošnje. Zbog intermitentnosti i neupravljivosti proizvodnje iz OIE, za stabilan rad sistema i pouzdano snabdevanje električnom energijom neophodno je obezbediti izvore upravljive proizvodnje. Sa druge strane, potiskivanje i gašenje termoelektrana u procesu dekarbonizacije, koje je predviđeno integrisanim nacionalnim i klimatskim planom, smanjuje raspoloživu upravljivu energiju što ugrožava uslove bilansiranja i energetske nezavisnosti EES-a.

Vodonik ima ključnu ulogu za skladištenje energije proizvedene iz OIE putem elektrolize vode, čime se omogućava kasnija konverzija u električnu energiju sagorevanjem u gasnim turbinama ili gorivnim ćelijama, Slika 1, Jedini nusprodukt sagorevanja biće voda, što dovodi do toga da imamo totalnu zelenu energiju, zbog toga se često taj vodonik naziva zelenim vodonikom.



Slika 1: Šema sistema za proizvodnju i skladištenje vodonika i sagorevanja u gorivnim ćelijama [11]

Vodonik se već koristi u različitim sektorima širom sveta kao sredstvo za dekarbonizaciju i skladištenje energije. U energetici, Danska koristi energiju vetra za proizvodnju zelenog vodonika u okviru H2RES projekta. Beč testira upotrebu vodonika u termoelektrani-toplani Donaustadt kako bi smanjio emisije CO₂. U transportu, Nemačka i Japan razvili su vodonične vozove (Alstom Coradia iLint i Hydrogen Hybrid Train), dok Južna Koreja koristi vodonične autobuse u urbanom prevozu. Industrijski sektor takođe primenjuje vodonik – Shell gradi najveću fabriku zelenog vodonika u Evropi, dok norveška kompanija Yara koristi vodonik za proizvodnju amonijaka umesto prirodnog gasa. Dubai je razvio postrojenje za proizvodnju vodonika korišćenjem solarne energije, omogućavajući skladištenje viška energije za kasniju upotrebu.

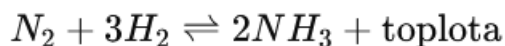
2 TEHNOLOŠKI TRENDOWI U PROIZVODNJI I SKLADIŠTENJU ZELENOG VODONIKA

Razvoj tehnologija proizvodnje i skladištenja vodonika usmeren je na povećanje efikasnosti i smanjenje troškova procesa, čime se omogućava šira primena vodonika kao energetska održivog rešenja. Trenutno se u proizvodnji vodonika primenjuju različite metode, među kojima je elektroliza vode najperspektivnija kada se koristi električna energija iz obnovljivih izvora.

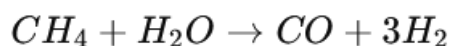
Postoje različite specifične tehnologije elektrolize koje se koriste, od kojih su najčešće alkalna elektroliza (AEL), elektroliza pomoću protonske izmjenjivačke membrane (PEMEL-Proton exchange membrane electrolysis) i elektroliza pomoću ćelija sa čvrstim oksidom (SOEC-Solid Oxide Electrolyzer Cell). Svaki naveden način proizvodnje vodonika ima svoje prednosti i mane, međutim PEM elektroliza se pokazala kao trenutno najefikasnija. Najveća mana ove tehnologije je visoka investiciona ulaganja, ali su predviđanja EU optimistična po tom pitanju jer će daljim tehnološkim razvitkom PEM elektroliza postajati sve pristupačnija. Agencija IRENA predviđa smanjenje cene PEM elektrolizera od 4 do 7 puta [12]. Pored elektrolize, razvijaju se i termičke i biološke metode proizvodnje vodonika, koje uključuju reforming biogasa, pirolizu i fotobiološke procese.

Skladištenje vodonika predstavlja prepreku njegovoj integraciji u globalnu ekonomiju. Neophodni su kapaciteti za velike količine vodonika kako bi se skladištila energija u razmerama GWh i TWh. Geološke formacije kao što su rudnici soli i iscrpljene naftna i gasna ležišta nude ogroman potencijal skladištenja kako zbog svojih kapaciteta i sigurnosti tako i zbog ekonomskih i tehničkih faktora.

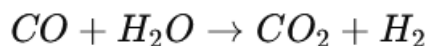
Amonijak, sa 18% vodonika po masi, ima oko 50% veću gustinu vodonika u poređenju sa komprimovanim ili tečnim vodonikom. Dok mu je gustinu energije skoro tri puta veću. Jedna od ključnih prednosti je postojanje razvijene infrastrukture za proizvodnju, dugoročno skladištenje, transport i distribuciju amonijaka širom sveta. Glavne mane su što je toksičan, može biti opasan pri curenju, i što postrojenje za proizvodnju amonijaka dodatno povećava investicione troškove. Njegova proizvodnja se uglavnom do sad odvijala putem Haber-Bošovog procesa, gde se azot i vodonik kombinuju pri visokim temperaturama i pritiscima uz katalizatore:



Haber-Bošov proces se oslanja na parno reformisanje metana (SMR - Steam Methane Reforming) za dobijanje vodonika:



Nakon toga, ugljen-monoksid se konvertuje u ugljen-dioksid kroz *water-gas shift* reakciju:



Glavni problem klasičnog Haber-Bošovog procesa je visoka emisija ugljen-dioksida, jer je većina amonijaka proizvedena iz prirodnog gasa. Alternativna metode za smanjenje emisija uključuje korišćenje ugljenično neutralnog vodonika dobijenog elektrolizom vode korišćenjem OIE, takozvani zeleni amonijak, što će se i koristiti u ovom idejnom rešenju. Takođe moguća je direktna elektrohemijaska sinteza amonijaka, korišćenjem električne energije za kombinovanje azota i vodonika u amonijak, čime će se smanjiti potreba za visokim pritiskom i temperaturama. Elektrohemijaska sinteza amonijaka je još u ranoj fazi istraživanja i razvoja i još uvek nije dostigla tehnološku zrelost, ona bi potencijalno mogla imati nižu potrošnju energije u poređenju sa konvencionalnim Haber-Bošovim procesom. Predviđa se da će zeleni amonijak do 2035. godine biti ekonomski isplativiji u odnosu na fosilne gorive. Trenutna energetska efikasnost ciklusa pri korišćenju amonijaka iznosi od 30-48%.

Termoelektrane na ugalj obično imaju efikasnost od oko 35-45%, dok kombinovane elektrane na prirodni gas postižu efikasnost više od 50%. Sagorevanje amonijaka u elektranama može dostići slične efikasnosti, što ukazuje na njegov potencijal kao goriva bez ugljenika.

Energetsku efikasnost vodonika dobijamo tako što znamo da elektroliza ima prosečnu efikasnost od 60% do 80%, dok se konverzija vodonika nazad u električnu energiju putem sagorevanja u gasnim turbinama odvija sa efikasnošću 40-60%, odatle sledi da je ona oko 25-48%. To znači da se od 1 MWh električne energije utrošene za proizvodnju vodonika može dobiti približno 0,25-0,48 MWh električne energije pri njegovom sagorevanju u gasnoj elektrani sa kombinovanim ciklusom. Preostala neiskorišćena energija celokupnog procesa predstavlja toplotnu energiju. Deo oslobođene toplotne energije može se koristiti za dalju upotrebu u industriji i sistemima daljinskog grejanja, čime se povećava ukupna iskoristivost sistema.

Gasno-turbinske tehnologije prilagođene sagorevanju vodonika sve više dobijaju na značaju. Moderne gasne turbine, kao što su one koje razvijaju Siemens Energy i General Electric, već sada mogu koristiti mešavine vodonika i prirodnog gasa, dok su u razvoju i potpuno vodonične turbine. Njihova primena u termoelektranama poput TE Nikola Tesla omogućila bi značajno smanjenje emisija CO₂ uz očuvanje postojećih elektroenergetskih kapaciteta i infrastrukture.

Uz sve napretke u tehnologiji, ključni izazovi ostaju smanjenje troškova opreme, povećanje efikasnosti proizvodnje i skladištenja, kao i razvoj infrastrukture za transport i distribuciju vodonika. Dalja istraživanja i pilot-projekti širom sveta doprinose optimizaciji ovih procesa, otvarajući put za širu primenu vodonika u energetici i industriji.

3 IDEJNO REŠENJE ENERGETSKOG KOMPLEKSA ZA SUPSTITUCIJU UGLJA VODONIČNIM GORIVOM U TERMoeLEKTRANI NIKOLA TESLA A

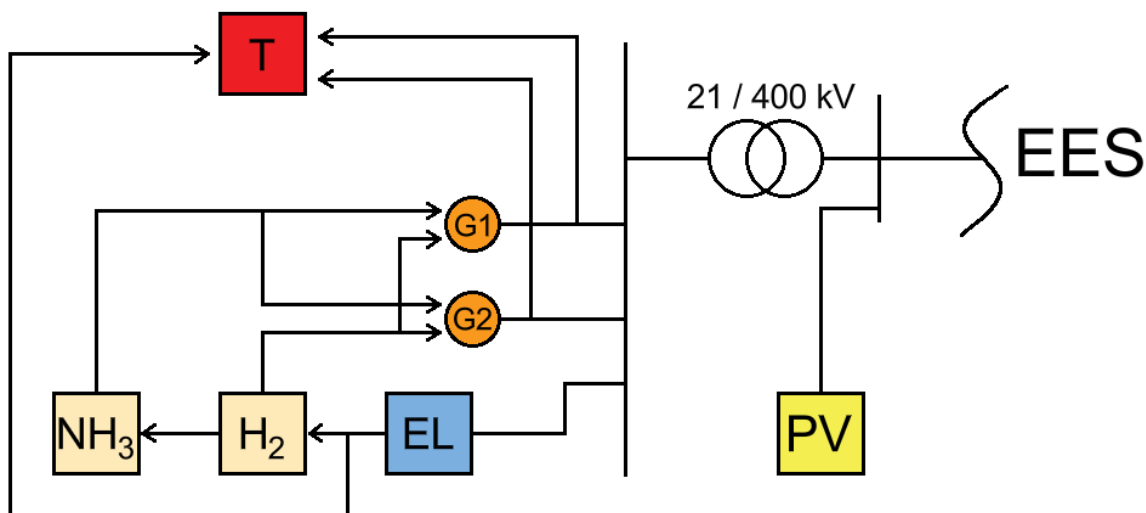
U cilju prelaska na ekološko prihvatljivu proizvodnju energije u procesu dekarbonizacije neophodno je okrenuti se obnovljivim izvorima energije poput solara i vetra. Kako je TENT najvažnije proizvodno čvorište EES-a Srbije, u cilju očuvanja već postojeće centralizovane infrastrukture predloženo je idejno rešenje postavljanja solarne elektrane u neposrednoj blizini TENT-a, koja bi podpomogla supstituciju uglja zelenim vodoničnim gorivom. Početna faza podrazumeva implementaciju ove promene na blokovima A1 i A2, čime se započinje prelaz na ekološki prihvatljivije izvore energije. Osnovna ideja je da se proizvodnja iz ova dva najstarija termoagregata nadomesti iz fotonaponske elektrane i gasno-turbinskog postrojenja na vodonična goriva.

Niska gustina snage solarnog zračenja na površini zemlje zahteva pokrivanje velikih površina solarnim panelima. Kako bi se smanjili negativni uticaji na životnu sredinu, ove elektrane je potrebno graditi na devastiranim zemljištima. U tom kontekstu, termoelektrane, koje su tokom decenija eksploatacije uglja stvorile prostrane neplodne površine usled odlaganja jalovine i pepela, predstavljaju pogodne lokacije za instalaciju solarnih panela.

Planirani koncept predviđa izgradnju fotonaponskih elektrana na ovim degradiranim područjima, na delovima Kolubarskih kopova, dok bi u okviru postojećih termoenergetskih kompleksa bili postavljeni kapaciteti za proizvodnju i skladištenje vodonika i amonijaka. Takođe veoma bitna činjenica i prednost za proizvodnju vodonika je to da imamo već razvijen sistem dopremanja vode iz reke Save, što nam u startu smanjuje troškove i omogućava iskorišćenje postojeće infrastrukture.

Umesto kotlovskih sistema i parnih turbina, nova elektrana bi koristila gasno-turbinske sisteme koji bi sagorevali vodonik i amonijak, čime bi se omogućilo očuvanje postojeće infrastrukture (priključnih i razvodnih postrojenja u termoelektrani), kako bi se zadržali i postojeći energetske tokovi u prenosnoj mreži.

Solarna elektrana bi imala dvostruku funkciju – povezivanje na prenosnu mrežu kroz postojeće čvorište termoelektrane, kao i snabdevanje sistema za proizvodnju vodonika. Kapacitet skladištenja vodonika bio bi dizajniran za balansiranje dnevnih i nedeljnih varijacija u proizvodnji i potrošnji energije. Deo vodonika koristio bi se za sintezu amonijaka, koji bi zbog svojih boljih skladišnih karakteristika predstavljao dugoročno skladište energije.



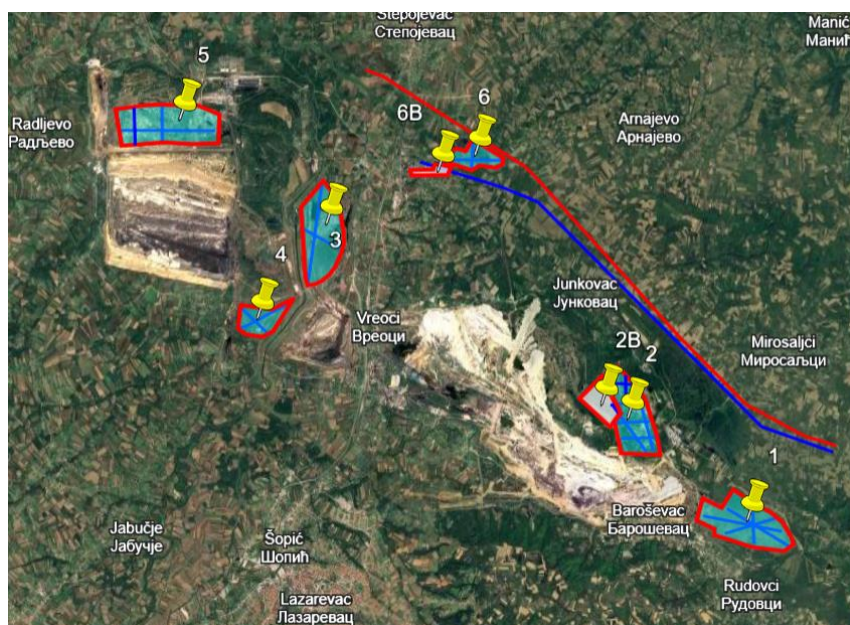
Slika 2: Šematski prikaz infrastrukturnog energetskog proizvodnog kompleksa u TENT-u na bazi fotonaponske elektrane i zelenih vodoničnih goriva

3.1 Predlog izgradnje fotonaponske elektrane na degradiranom zemljištu unutar kompleksa termoelektrane

Radi iskorišćenja devastiranog zemljišta, solarna elektrana bi se gradila u Kolubarskim kopovima. Trenutno raspoloživa površina može se videti na slici, ona iznosi približno 1000 ha, na kojoj je potrebno izvršiti zemljane radove kako bi se površine poravnale i prilagodile instalaciji fotonaponskih panela. Na slici 3 naznačene su raspoložive površine na kojima se može planirati izgradnja fotonaponske elektrane.

Predviđena je izgradnja solarne elektrane ukupne instalisane snage od 500 MWp. Paneli bi bili se postavljani na zemlji, način konstrukcije “šator”, kao krov na dve vode orijentisane istok-zapad, a pravac pružanja panela sever-jug. Nagib panela ka istoku i zapadu bio bi 15 stepeni u odnosu na zemlju. Uz pomoć PVGIS alata izračunavamo, da se na ovom području i ovakvom konstrukcijom, od instalisane snage od 1 MWp dobija prosečno godišnje 1044 MWh. Odatle dolazimo do toga da će ova elektrana dati prosečno godišnje 522 GWh. Ovakva formacija panela predstavlja dobro rešenje jer su paneli sve više ekonomski dostupniji, i nećemo imati problema sa senkom a samim tim imaćemo veću iskorišćenost površine. Za njihovo postavljanje će nam biti više nego dovoljno dostupne površine, što nam omogućava kasnije i dodatno proširenje PV elektrane.

U nekoj budućnosti ceo ugljenokop u Kolubari će biti na raspolaganju kada se sav ugalj eksplatatiše, gde ćemo imati preko 7000 ha oslobođenog jalovog prostora, što je dovoljno za oko 6000 MWp fotonaponskih panela. S obzirom na trend elektrifikacije to će u budućnosti biti veoma značajna investicija.



Slika 3: Raspoložive površine na kojima se može planirati izgradnja fotonaponske elektrane na ugljenokopu Kolubara

3.2 Razvoj sistema za proizvodnju i lokalno skladištenje zelenog vodonika direktno na lokaciji termoelektrane radi kratkoročnog balansiranja EES-a

Tehnologija koja bi omogućila proizvodnju zelenog vodonika, PEM elektrolizom, procenjenom kao najboljim rešenjem, obuhvata različite procese organizovane u jedinstvene sistem, koji bi bili usmereni ka elektrolizeru kao glavnom elementu ovakvog postrojenja. Procese možemo kategorizovati na sledeći način:

- Snabdevanje vodom
- Elektrolizer
- Sistem za skladištenje vodonika

Snabdevanje vodom:

Termoelektrana Nikola Tesla se nalazi kod Obrenovca, na obali reke Save iz koje bi se i vršilo snabdevanje vodom. Neophodne bi bilo dobro dizajnirati i dimenzionisati sistem za upumpavanje vode, kako bi se održao ravnomeran pritisak na ulazu u elektrolizere. PEM elektrolizeri su osetljivi na kvalitet vode. Prisustvo i najmanjih količina metalnih jona, poput gvožđa ili nikla, može „otrovati“ membranu i značajno smanjiti njen radni vek i efikasnost. Zato je bitno da voda bude potpuno čista sa električnom provodnošću manjom od $1\mu\text{S}/\text{cm}$. Da bi se postigao željeni nivo čistoće voda prvo treba proći kroz filtraciju grubih nečistoća, zatim reverznu osmozu (RO). Reverzna osmoza uklanja do 99% rastvorenih soli i drugih nečistoća kroz polupropusnu membranu.

Provodljivost vode nakon RO može biti oko 5–20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ali to i dalje nije dovoljno čisto za PEM elektrolizu, zato je na kraju neophodan proces dejonizacije, kod kojeg voda prolazi kroz kationske i anionske smole, koje uklanjaju preostale jone, uključujući metale poput gvožđa, bakra i nikla.

Izgradnja sistema za elektrolizu u blizini termoelektrane Nikola Tesla donosi značajnu prednost jer omogućava korišćenje postojeće infrastrukture. Konkretno, sistem za filtriranje vode mogao bi se nadograditi na već postojeći, čime bi se optimizovali troškovi i resursi.

Elektrolizer:

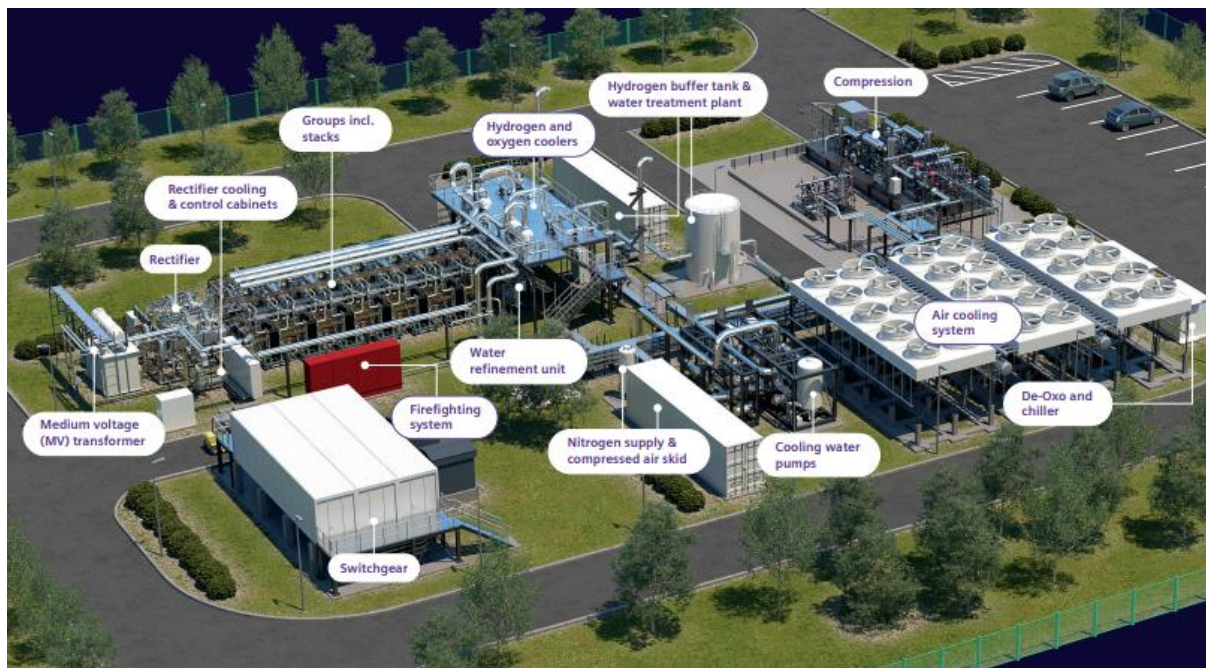
Sam sklop PEM elektrolizera predstavlja srce sistema proizvodnje vodonika i čini oko 45% ukupnih troškova.[7] Osnovne karakteristike ovog tipa elektrolizera su prikazane u Tabeli 1.

Njegova glavna prednost je relativno visoka efikasnost pri visokoj gustini snage, koja trenutno iznosi između 60% i 75%, kao i fleksibilnost pri radu (radni opseg iznosi od 100% do samo 5% svog kapaciteta). Intermitentnost i neupravljivost OIE, iz kojeg bi se elektrolizeri napajali, neće predstavljati problem upravo zbog pomenute fleksibilnosti. Proizvodnja vodonika bi direktno zavisila od cene električne energije na tržištu. Elektrolizeri bi bili podešeni da se uključuju kada cena električne energije na globalnom tržištu bude niska (na primer ispod 25% njene srednje godišnje cene). U tom periodu bi se išlo u proizvodnju sa maksimalnim kapacitetima elektrolizera. U periodima kada se cena kreće između 25% i 150% od srednje godišnje cene električne energije tada bi se puštali elektrolizeri u rad sa smanjenim kapacitetom samo ukoliko bi proizvodnja električne energije iz solara prevazilazila potrebe mreže.

Tabela 1: Osnovne karakteristike PEM elektrolizera [8]

Benefits of PEM Electrolysis • High power density • High dynamic operation range; direct coupling to renewables • High efficiency and low module internal losses • High gas purities • Extreme low standby consumption • Low maintenance needs • Consumes only water and power, no hazardous chemicals	Electrolysis type:	PEM Atmospheric
	Output Pressure (array):	100 mbar
	Plant efficiency:	>75.5%
	Minimum load:	down to 40%
	Demineralized water consumption:	<10 l per kg hydrogen
	Hydrogen quality:	up to 99.999% with de-oxo dryer
	Startup time:	<1 minute
	Dynamics:	up to 10 %

U početnoj fazi predviđena je izgradnja elektrolizera instalisane snage 400MW, koji bi mogao delom da obezbedi potrebnu količinu gasovitog goriva za gasnu elektranu koja će nadomestiti gašenje agregata A1 i A2 u TENT1. Površina koja je potrebna da se obezbedi postavljanje sistema elektrolizera poželjno je da bude uz samu termoelektranu i iznosi oko 8 ha. Pa bi najbolje rešenje predstavljalo upotreba jednog dela pepelišta. Ovakvim postrojenjem bi se moglo dobijati i do oko 8 000 $\text{kg}(\text{H}_2)/\text{h}$. Uz pomenutu infrastrukturu, u budućnosti, ostavlja se mogućnost dograđivanja sistema i za skladištenje kiseonika ukoliko se pojavi potreba za velikim količinama kiseonika na tržištu. Time bi iskorišćenost svih resursa mogla pozitivno da utiče na ekonomsku dobit.



Slika 4: Dispozicija opreme u sistmu za proizvodnju vodonika [8]

Skladištenje:

Skladištenje vodonika predstavlja izazov za sebe. Kako je već rečeno, zbog njegove izuzetno male gustine energije kao i težnje za što je moguće zapreminski manjim skladištima nepohodno je izložiti ga visokom pritisku (i do 800 bara). Vodonik kao najmanji element ima tendenciju da prolazi kroz materijal i čini ga krhkim, te bi takvo curenje vodonika predatavljalo još jedan od problema pri izgradnji skladišta. Međutim prednost ovakvog skladištenja jeste brza i laka upotreba i relativno jednostavna infrastruktura s obzirom da kompresori i rezervoari već postoje za industrijske namene, a problem curenja očekujemo da će se rešiti daljim istraživanjem i brzim napretkom tehnologije.

Na slici 5 prikazan je potencijalni prostor na kojem bi bio izgrađen energetska kompleks za proizvodnju i skladištenje vodonika, kao i infrastruktura jamskog toplotnog skladišta. U pitanju je deo odlagalište pepela. Pre svega za bilo kakvu gradnju na pepelištima neophodno je da se na lokaciji prestane sa odlaganjem pepela, da se odlagalište stabilizuje i da se sačeka sa izgradnjom dok se ne zaustavi intenzivno sleganje tla. Naznačena površina ima 60 ha i dovoljna je za instalaciju svih infrastrukturnih elemenata kompleksa. Ovaj prostor je višestruko pogodan za instalaciju, kako sistema za proizvodnju i skladištenje vodonika, tako i za toplotno skladište. Neke od ključnih prednosti ovog prostora su:

- Lokacija je u neposrednoj blizini termoelektrane Nikola Tesla A, na udaljenosti od svega 700 m, tako da predstavlja deo kompleksa termoelektrane i može se jednostavno dograditi elektroenergetska, termoenergetska i putna infrastruktura za funkcionalnost svih elemenata sistema.
- Lokacija je u neposrednoj blizini reke Save, što omogućava jednostavnu instalaciju sistema toplotnih pumpi za toplotno skladište, kao i sistema za obezbeđivanje vode za proces elektrolize.

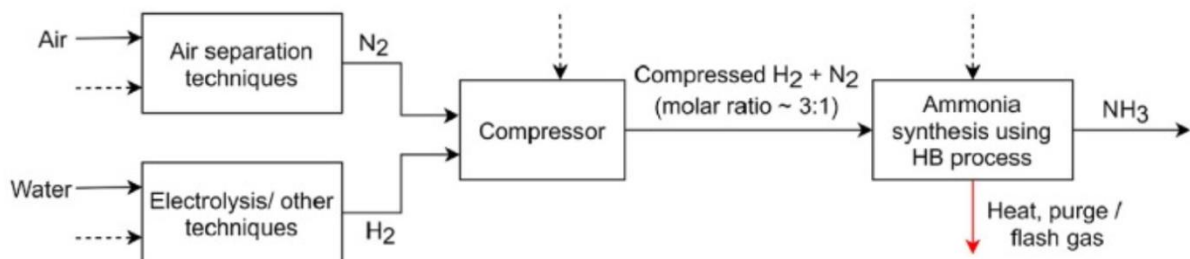
- Ne uzurpira se prostor koji ima poljoprivrednu vrednost i ne očekuju se negativni uticaji na mikrokolinu jer se radi o nepolodnom veštačkom bregu.
- Teren je izdignuti iznad okoline za oko 30 m, tako je zaštićen od poplava, kao i prisustva podzemnih voda koje su vrlo nepovoljne za izgradnju toplotnog skladišta.
- Pepeo je kvalitetan toplotni izolator i može obezbediti dobru efikasnost skladištenja toplote.
- Teren pogoduje za izgradnju podzemnih rezervoara za skladištenje vodonika.
- Elektrolizer i agregati u termoelektrani Nikola Tesla se nalaze na bliskom rastojanju sa toplotnim skladištem, tako da je izgradnja infrastruktura za skladištenje otpadne toplote koja se dobija u ovim procesima jeftina i efikasna.



Slika 5: Predlog prostora za izgradnju energetskog kompleksa za proizvodnju i skladištenje vodonika i jamskog toplotnog skladišta na lokaciji TE Nikola Tesla A

3.3 Razvoj sistema za sintezu amonijaka i lokalno skladištenje radi dugoročnog balansiranja EESa

Ukoliko nakon nedeljne nivelacije portošnje energije ostane neiskorišćenog vodonika u skladištu ili ukoliko je u nekom trenutku skladište puno a imamo mogućnost za proizvodnju još vodonika, taj vodonik će se iskoristiti za proizvodnju amonijaka. Amonijak će se dugoročno skladištiti, i koristiće se u zimskom periodu kada je proizvodnja iz fotonaponskih elektrana snižena i kada je cena električne energije na tržištu visoka.. Proizvodnja amonijaka će se vršiti kombinovanjem vodonika i azota iz vazduha putem Haber-Bošovog procesa, uz temperaturu 400-500°C, pritisak 100-200 bara i katalizatore (Fe), Slika 6.



Slika 6: Principalska šema proizvodnje amonijaka Haber-Bošovim procesom [5]

Infrastruktura za amonijak biće instalirana na lokaciji skladišta vodonika. Pored toga, azot (N_2), drugi sastojak amonijaka, dobija se pomoću odgovarajuće tehnike izdvajanja iz vazduha. Zbog zahteva za velikim količinama azota visoke čistoće u postrojenjima za proizvodnju amonijaka, kriogena jedinica za izdvajanje vazduha (ASU - Air Separation Unit) smatra se najpogodnijom opcijom u ovoj studiji. ASU sistem koristi stabilno napajanje električnom energijom iz mreže (bez varijacija u snabdevanju). ASU jedinica se sastoji od: dva kompresora i njihovih pogona, glavnog izmenjivača toplote, međuhladnjaka (intercoolera) za kompresore i tri destilacione kule. Obe gasne komponente se zatim uvode u petlju sinteze amonijaka (tzv. synloop) – postrojenje čije glavne komponente čine: kompresori, izmenjivači toplote i reaktori za sintezu amonijaka, a koje će kao proizvod dati tečni amonijak (LNH_3). Energetski sadržaj otpadne toplote nastale tokom sinteze amonijaka će se delom koristiti za proces a deo će se skladištiti u toplotnim skladištima.

Zahtevi za skladištenje amonijaka zahtevaju poseban pristup zbog njegove toksičnosti i sposobnosti da izazove naponsku koroziju u ugljeničnim čelicima. Postoje tri glavna metoda skladištenja amonijaka u energetskim postrojenjima:

- * Skladištenje pod pritiskom - skladišti se u čeličnim rezervoarima pod pritiskom (obično između 10 i 15 bara), gde ostaje u tečnom stanju. Ovi rezervoari su izrađeni od specijalnih materijala otpornih na koroziju kako bi se sprečilo curenje i oštećenja.

- * Rashlađeno skladištenje - skladišti se pri atmosferskom pritisku, ali na niskim temperaturama ispod $-33^\circ C$, što omogućava da ostane u tečnom stanju bez potrebe za visokim pritiskom. Ovo zahteva upotrebu dobro izolovanih kriogenih rezervoara, sličnih onima koji se koriste za tečni prirodni gas (LNG).

- * Kombinovani sistem skladištenja (umerena temperatura i pritisak) - ova metoda kombinuje umereno hlađenje i umereni pritisak (npr. $-20^\circ C$ i 4-5 bara) kako bi se optimizovali energetski troškovi skladištenja i održavanja sistema.

Za velike količine amonijaka, rashlađeno skladištenje je najbolja opcija, jer u slučaju oštećenja rezervoara ispuštanje amonijaka traje sporije nego kada je pod pritiskom.

Jedan od izazova sa amonijakom u praksi jeste emisija azotnih oksida (NO_x), naročito pri sagorevanju na visokim temperaturama i pod pritiskom u gasnim turbinama. Jedna od najefikasnijih metoda za smanjenje NO_x emisija je selektivna katalitička redukcija (SCR - Selective Catalytic Reduction). Ovaj proces koristi katalizatore (npr. platina, titanijum-dioksid, vanadijum oksid) i dodatni redukcioni agens (najčešće sam amonijak ili urea) kako bi NO_x pretvorio u bezopasne gasove (azot i vodenu paru). Ova metoda je kompatibilna sa gasnim turbinama i već se koristi u termoelektranama.

3.4 Izgradnja gasno-turbinskih postrojenja na mestu postojećih termoenergetskih blokova

Postojeća termoelektrana ima razvijenu infrastrukturu u vidu energetske priključaka, prenosne mreže i prostora za izgradnju novih postrojenja. Umesto kotlovskih postrojenja i parnih turbina koje koriste ugalj, na istim lokacijama mogu se instalirati gasno-turbinske jedinice koje će u početnim fazama koristiti mešavinu prirodnog gasa i vodonika, a dugoročno preći na potpuno sagorevanje zelenog vodonika i amonijaka, kada ovakva postrojenja budu tehnološki sazrela i ekonomski pristupačna.

Gasna turbina modelovaće se uz pomoću tri različite sekcije: višestepena kompresija sa međuhlađenjem, komora za sagorevanje i ekspanzija za proizvodnju energije. Efikasnost pretvaranja goriva u električnu energiju zavisi od radne temperature turbine. Što su temperature više, veća je efikasnost, što znači ekonomičniji rad. Gas u tipičnoj gasnoj turbini može dostići temperaturu od 1260°C, ali kritični metali u turbini mogu izdržati samo 815–926°C. Zato se koristi vazduh iz kompresora za hlađenje ključnih komponenti turbine, što smanjuje krajnju termičku efikasnost. Zahvaljujući inovativnim tehnologijama hlađenja i naprednim materijalima otpornih na visoke temperature, moderne gasne turbine sada postižu ulazne temperature do 1427°C, što je za 167°C više nego kod prethodnih turbina.

Još jedan način za povećanje efikasnosti je instalacija rekuperatora ili parnog generatora za iskorišćenje otpadne toplote (HRSG - Heat Recovery Steam Generator), koji omogućavaju povrat energije iz izduvnih gasova turbine. Rekuperator sakuplja otpadnu toplotu iz izduvnog sistema turbine i koristi je za predgrevanje vazduha iz kompresora pre nego što uđe u komoru za sagorevanje. Parni generator za iskorišćenje otpadne toplote (HRSG) koristi izduvnu toplotu gasne turbine za generisanje pare. Ovi kotlovi su takođe poznati kao parni generatori za rekuperaciju toplote. Para visokog pritiska iz ovih kotlova može se koristiti za proizvodnju dodatne električne energije pomoću parnih turbina, čime nastaje konfiguracija poznata kao kombinovani ciklus. Jednostavni ciklus gasne turbine može postići stepen konverzije energije u rasponu od 20 do 35%. Očekuje se da će buduće gasne turbine koje koriste vodonik u kombinovanom ciklusu dostići efikasnost od 60% ili više. Ako se otpadna toplota iz ovih sistema iskoristi za grejanje ili industrijske procese, ukupna efikasnost energetskog ciklusa mogla bi da dostigne preko 80%.

U ovom radu, gasovito gorivo se sagoreva u prisustvu vazduha i argona (koji se koristi kao inertni gas) kako bi se smanjila izlazna temperatura. Glavni proizvodi sagorevanja su azot (N_2) i voda (H_2O). S obzirom na to da je nazivna snaga agregata A1 i A2 oko 400 MW, da bi se iskoristila određena infrastruktura i obezbedili isti uslovi plasmana energije u prenosnu mrežu, gasna turbina će takođe biti snage 400 MW.

3.5 Razvoj sistema za skladištenje otpadne toplotne energije u svrhu grejanja

Efikasno iskorišćenje otpadne toplotne energije iz energetske postrojenja predstavlja ključni korak ka povećanju energetske efikasnosti i smanjenju ukupnih gubitaka sistema. Deo otpadne toplote generiše elektrolizer a deo elektrana. Gasno-turbinske elektrane, koje koriste mešavinu prirodnog gasa i vodonika ili čisti vodonik, generišu značajnu količinu otpadne toplote tokom procesa sagorevanja. Ova energija može se usmeriti na sisteme daljinskog grejanja, industrijske procese ili skladištenje u termalnim akumulatorima za kasniju upotrebu.

Tokom rada gasno-turbinskih postrojenja, deo proizvedene energije oslobađa se u vidu toplote u izduvnim gasovima i rashladnim sistemima.

Ova toplota može biti uhvaćena i uskladištena korišćenjem različitih tehnologija, ali mi ćemo u ovom postrojenju koristiti toplotne akumulatore sa vodenim rezervoarima, gde voda kao medijum za skladištenje toplote omogućava lako prebacivanje energije u sisteme daljinskog grejanja.

S obzirom da je naša TE u blizini urbanog područja, gde postoji razvijen sistem daljinskog grejanja, otpadna toplota iz elektrane može se direktno koristiti za zagrevanje vode jamskom skladištu toplote koje bi kasnije bilo korišćeno za zagrevanje vode u toplovodnoj mreži. Na ovaj način smanjuje se potreba za sagorevanjem dodatnih goriva, čime se doprinosi smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte i povećava ukupna energetska efikasnost sistema.

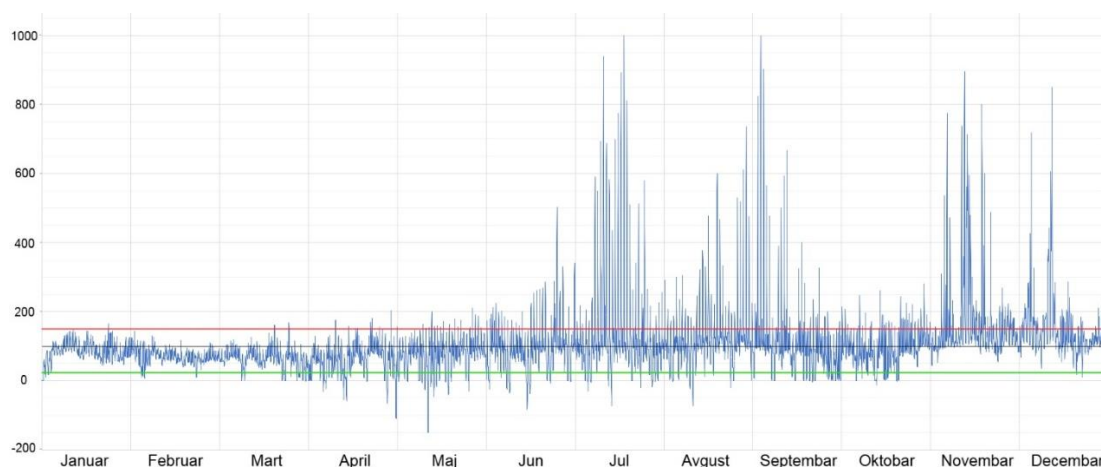
U slučajevima kada neposredno korišćenje toplote nije moguće, skladištenje u akumulacionim sistemima omogućava njenu upotrebu u periodima veće potražnje, poput večernjih sati ili hladnijih dana.

Uvođenjem sistema za korišćenje otpadne toplote, ukupna efikasnost gasno-turbinskih postrojenja može se povećati sa standardnih 55-60% na preko 80%, smanjujući istovremeno troškove grejanja i povećavajući isplativost energetskih objekata. Pored toga, upotreba skladištene toplote u industriji ili daljinskim sistemima grejanja smanjuje potrebu za dodatnim energetskim resursima i doprinosi razvoju održivih rešenja u energetskom sektoru.

4 SIMULACIJA ENERGETSKIH TOKOVA U PREDLOŽENOM KOMPLEKSU

U cilju detaljnije analize energetskih performansi predloženog sistema, sprovedena je simulacija tokova energije kroz njegove glavne komponente. Simulacija omogućava uvid u raspodelu i efikasnost upotrebe energije, identifikaciju potencijalnih gubitaka, kao i ocenu ukupne energetske efikasnosti sistema.

Kao što je već rečeno, elektrolizeri bi radili u periodu niskih cena, odnosno manjih od 25% srednje godišnje cene tj. kada je cena ispod zelene linije na grafiku, dok bi gasne turbine bile pogonjene u periodima kada cena električne energije na referentnoj berzi prelazi 150% srednje godišnje cene tj. kada je cena iznad crvene linije na grafiku (što se može videti na primeru Mađarskog tržišta za godinu 2024. na slici 6). Takvim sistemom rada, a na osnovu satne cene električne energije [eur/MWh] na berzi HUPEX u toku 2024. godine, dobijen je broj radnih sati za oba sistema i granične cene, što se može videti u tabeli 2.



Slika 6: Grafički prikaz cena i granica u odnosu na koje se pogone elektrolizeri i gasne turbine

Tabela 2: Broj radnih sata elektrolizera i gasnih turbina

Srednja godišnja cena električne energije (HUPX-2024) [EUR/MWh]	100,81
Cena do koje idemo sa radom maksimalnim kapacitetima PEMel (proizvodnja vodonika) [EUR/MWh]	25,20
Cena od koje idemo sa radom gasnih turbina (potrošnja vodonika) [EUR/MWh]	151,22
Broj sati kada PEMel radi maksimalnim kapacitetima (cena ispod 25%)	785
Broj sati rada gasnih turbina (cena veća od 150%)	1058

U ovoj analizi pretpostavljeno je da je u energetsom kompleksu u prvoj fazi instaliran elektrolizer snage 400 MW. Proizvedeni vodonik će podmirivati deo potreba za rad gasne turbine, a ostatak će biti prirodni gas. Takvim PEM elektrolizerom i vremenom rada po pomenutom principu, na godišnjem nivou se iskoristi oko 340 GWh električne energije, a količina proizvedenog vodonika iznosi oko 12 700 T, što čini nešto manje od 50% potrebne količine za potpunu supstituciju umešanog goriva čistim vodonikom. Gubici energije su neizbežan negativan faktor, pa tako dolazi i do gubitaka u sistemu pre samog procesa elektrolize od oko 7,6%. Zatim sledi proces PEM elektrolize koji se odvija sa efikašnošću od oko 65%, dok je ostatak otpadna toplota čiji deo energije možemo da iskoristimo. Ovim bi se namirila polovina potrebne energije za rad gasnih turbina, dok bi se ostatak dobijao iz prirodnog gasa. Ako znamo da je energetska vrednost prirodnog gasa (LHV-lower heating value) 13,894 kWh/kg, lako možemo dobiti količinu gasa koja je potrebna za rad gasne turbine (15 718 T). Maseni udeo, umešavanja goriva, vodonika iznosi 28%. Dobijene količine energenata, njihova energetska vrednost kao i udeo umešavanja se nalaze u tabeli br. 3. i 4.

Tabela 3: Potrebna količina energenata i njihova energetska vrednost

Instalisana snaga gasnih turbina [MW]	400,00
Instalisana snaga elektrolizera [MW]	400,00
System Electricity Consumption [kWh/kg-H ₂]	55,30
Stack Electricity Consumption [kWh/kg-H ₂]	51,10
LHV-lower heating value (energetski sadržaj vodonika) [kWh/kg]	33,33
LHV-lower heating value (energetski sadržaj metana) [kWh/kg]	13,89
Efikasnost gasne turbine	60%
Efikasnost elektrolizera	65%
Potrebna količina prirodnog gasa za gasne turbine (100% metan) [T]	30459,19
Potrebna količina vodonika za gasne turbine (100% vodonik) [T]	12697,27
Porizvedena količina vodonika [T]	6144,81
Potrebna količina prirodnog gasa za gasne turbine (mešovito gorivo) [T]	15718,54

Tabela 4: Energetska vrednost energenata

Energija sadržana u ukupno proizvedenom vodoniku [GWh]	204,81
Energija sadržana u prirodnom gasu [GWh]	218,39
Dobijena energija iz gasnih turbina [GWh]	253,92
Energetski procenat vodonika	48%
Energetski procenat gasa	52%
Procenat umešavanja vodonika (maseni)	28%

Efikasnost sistema gasnih turbina koji poseduje i parne turbine je oko 60%, shodno tome dobija se konačna raspoloživa električna energija od oko 254 GWh.

Pri svom ciklusu i gasna turbina i elektrolizer poseduje gubitke u vidu otpadne toplote. Jedan deo toplote može biti uhvaćen i uskladišten u toplotne akumulatore. Količina energije koja se može skladištiti u vidu toplote se može videti u tabeli br. 5.

Tabela 5: Otpadna toplota

Energija koja se može iskoristiti u vidu toplote (sačuvana pri procesu elektrolize) [GWh] / [TJ]	87,92	317
Energija koja se može iskoristiti u vidu toplote (sačuvana pri radu turbine) [GWh] / [TJ]	40,96	147
Ukupna energija koja se može skladištiti u vidu toplote [GWh] / [TJ]	128,88	464

Kada ponovo sumiramo ceo jedan energetska ciklus na godišnjem nivou, počevši od uložene električne energije u proizvodnju vodonika kao energetskog nosioca, pa do ponovno proizvedene električne energije uz pomoć gasnih turbina, možemo dobiti efikasnost takvog procesa. Energetski tok i efikasnost godišnjeg ciklusa su prikazani u tabeli br. 6.

Tabela 6: Efikasnost ciklusa

Energija uložena u PEMel sistem (uračunati su i gubici sistema) [GWh]	339,81
Energija uložena u rad samo elektrtolizera [GWh]	314,00
Energija sadržana u ukupno proizvedenom vodoniku [GWh]	204,81
Energija sadržana u ukupno potrebnom gasu [GWh]	218,39
Dobijena energija iz gasnih turbina [GWh]	253,92
Ukupna energija koja se može skladištiti u vidu toplote [GWh]	128,88
Efikasnost ciklusa bez toplotne energije	45%
Efikasnost ciklusa (sa kratkoročnim čuvanjem toplote)	66%

Uočavamo da je za ovo postrojenje potrebno uložiti oko 1% električne energije od proizvedene godišnje energije na nivou cele Srbije po proseku od 2010 do 2020. U budućnosti očekujemo povećanje kapaciteta proizvodnje električne energije a i razvijanje nekih novih izvora, kao što su OIE, što će znatno doprineti isplativosti i efikasnosti primene ovakvih postrojenja.

Tabela 7: Bruto godišnji prihod

Prosečna cena električne energije (ispod 25% srednje god.) [eur/ MWh]	0,71
Prosečna cena električne energije (iznad 150% srednje god.) [eur/ MWh]	254,62
Prosečna cena gasa [eur/MWh]	45,00
Cena kupljenog gasa [eur]	9.827.700,59
Cena kupljene energije za proizvodnju vodonika [eur]	242.428,27
Cena prodane energije proizvedene iz vodonika [eur]	64.652.690,40
Bruto godišnji prihod [eur]	54.582.561,54

Sa stanovišta ekonomije, ovaj projekat bi trebalo da bude opravdan i isplativ na duge staze, jer je profitabilan (što nam govori i sledeća tabela 7) ali zbog veoma skupe infrastrukture taj profit se tek može osetiti posle dužeg perioda. Moramo napomenuti da prilikom procene bruto godišnjeg prihoda nisu obuhvaćeni godišnji troškovi održavanja, koje je za sada teško proceniti. Zbog veoma skupe infrastrukture isplativost ovakvih projekata se procenjuje za oko 25 godina bez subvencija, ako pričamo o subvencijama koje predviđa EU namenjenim upravo za proizvodnju zelenog vodonika, tada se isplativost procenjuje za oko 15 godina.

5 ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirana je mogućnost prelaska termoelektrana sa fosilnih goriva na gasno-turbinske sisteme sa vodonikom kao primarnim gorivom. Razmatrani su tehnološki trendovi u proizvodnji i skladištenju zelenog vodonika, kao i integracija obnovljivih izvora energije u cilju dekarbonizacije elektroenergetskog sektora.

Jedan od ključnih izazova u ovom procesu jeste efikasnost konverzije električne energije u vodonik putem elektrolize, kao i gubici prilikom sagorevanja u gasnim turbinama. Analizirani su pokazatelji efikasnosti ovih procesa, pri čemu se pokazalo da postoje značajni energetske gubici, ali i da razvoj novih tehnologija može doprineti optimizaciji celokupnog sistema.

Takođe, posebna pažnja posvećena je skladištenju vodonika i njegovih derivata, poput amonijaka, kao potencijalnih rešenja za dugoročno balansiranje energetske mreže. Pored toga, razmatrana je mogućnost korišćenja otpadne toplotne energije za grejanje, čime bi se dodatno poboljšala energetska efikasnost postrojenja.

Na osnovu podataka sa HUPLEX berze izvršen je proračun potencijalne proizvodnje vodonika (sivog vodonika) u odnosu na trenutne tržišne cene električne energije. Dobijeni rezultati pokazali su da je uz postojeće uslove moguće projektovati elektroenergetski sistem sa elektrolizerima optimalne snage, koji bi omogućili stabilnu i održivu proizvodnju vodonika kao goriva za gasne turbine.

Generalno, rezultati rada ukazuju na to da je tranzicija termoelektrana na vodonik tehnički izvodiva, ali trenutno jako skupa i zahteva dalja ulaganja u istraživanje i razvoj, kako bi se povećala efikasnost celokupnog lanca proizvodnje, skladištenja i konverzije energije. U budućnosti, očekuje se dalji razvoj tehnologija i pad cena obnovljive energije, što bi moglo doprineti ekonomskoj isplativosti ovakvih rešenja i što bi nas dovelo do potpuno zelenog vodonika.

Verujemo da predloženo rešenje ima veliku perspektivu u budućnosti i da će biti ekonomski isplativo. Pored toga, omogućilo bi Srbiji da postane energetska nezavisna država, što bi značajno doprinelo njenoj sigurnosti snabdevanja i stabilnosti elektroenergetskog sistema. Takođe, primenom ovakvog sistema značajno bi se doprinelo zaštiti životne sredine kroz smanjenje emisije štetnih gasova i racionalniju upotrebu energetske resursa.

6 LITERATURA

- [1] <https://stateofgreen.com/en/solutions/h2res-green-hydrogen-production/>
- [2] <https://balkangreenenergynews.com/share-of-green-hydrogen-in-vienna-cogeneration-plant-reaches-15/>
- [3] https://hydrogen-central.com/dubais-production-of-green-hydrogen-generates-over-1-gwh-of-energy-and-reduces-about-450-tonnes-of-co2-emissions/?utm_source=chatgpt.com
- [4] Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina

- [5] Potential of green ammonia production in India; Nikhil Dilip Pawar, Heidi Ursula Heinrichs, Christoph Winkler, Philipp-Matthias Heuser, Severin D. Ryberg, Martin Robinius, Detlef Stolten
- [6] Evaluating ammonia as green fuel for power generation: A thermo-chemical perspective; Antonio Sánchez, Elena Castellano, Mariano Martín, Pastora Vega
- [7] Dynamic operation of proton exchange membrane electrolyzers—Critical review H. Sayed-Ahmed, Á.I. Toldy, A. Santasalo-Aarnio
- [8] <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/hydrogen-solutions.html>
- [9] Performance of Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis Systems Configuration, Stack Materials, Turndown and Efficiency - Xiaohua Wang, Andrew G. Star and Rajesh K. Ahluwalia
- [10] Effects of CH₄, H₂ and CO₂ Mixtures on SI Gas Engine - S. Chuayboona, S. Prasertsan, T. Theppaya, K. Maliwan and P. Prasertsan
- [11] Seasonal hydrogen storage for sustainable renewable energy integration in the electricity sector: A case study of Finland - Ahmed M. Elberry, Jagruti Thakur, Jason Veysey
- [12] GREEN HYDROGEN COST REDUCTION, IRENA 2020.