

Uloga vodika u energetskej tranziciji

The role of hydrogen in energy transition

Ankica Kovač

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
Ankica.Kovac@fsb.hr



Ključne riječi: Vodik, Energetska tranzicija, Klimatske promjene

Key words: Hydrogen, Energy Transition, Climate Changes



Sažetak

Do 2050. godine potrebno je osigurati klimatsku neutralnost, što znači da je potrebno potpuno zaustaviti emisije CO₂ i drugih stakleničkih plinova u atmosferu. Međutim, sporazumi su jedno, a realizacija drugo. Bogate i razvijene države lakše će pristupiti eliminaciji fosilnih goriva, koja su glavni uzrok emisija stakleničkih plinova. Siromašne države ne mogu se odreći fosilnih goriva jer još nemaju potrebnu razinu ni životnog standarda ni tehnologije, odnosno novca da kupe ili same stvore te potrebne nove tehnologije. Morat će se sklopiti ugovori prema kojima će bogate države pomagati siromašnima da bi smanjenje emisija profunkcioniralo na globalnoj razini. To je ono što se očekuje od COP26. Ključno je ubrzati energetskej tranziciju na obnovljive izvore energije i obnovljivi vodik te provesti sveobuhvatnu dekarbonizaciju transporta i proizvodnje svih vrsta dobara i time pridonijeti izbjegavanju katastrofičnih scenarija. S tim ciljem, ovaj rad donosi pregled trenutnoga stanja vodikovih tehnologija i moguća rješenja za ubrzanje energetskej tranzicije.



Abstract

Climate neutrality should be ensured by 2050, which means that it is necessary to completely stop the emissions of CO₂ and other GHG into the atmosphere. However, agreements are one thing and realization is another. Rich and developed countries will more easily approach the elimination of fossil fuels, which are the main cause of GHG emissions. Poor countries cannot give up fossil fuels because they do not have the necessary standard of living or technology yet, or the money to buy or create the necessary new technologies themselves. Contracts will have to be made under which rich countries will help the poor to make emissions reductions work globally. This is what is expected from COP26. It is crucial to accelerate the energy transition to renewable energy sources and renewable hydrogen and to carry out comprehensive decarbonization of transport and production of all types of goods and thus contribute to avoiding catastrophic scenarios. With that goal, this work provides an overview of the current state of hydrogen technologies and possible solutions to accelerate the energy transition.

1. Uvod

Premda izgleda nemoguće u narednih dva-tri desetljeća zamijeniti ugljen, naftu i plin s obnovljivim izvorima

energije (OIE), a s ciljem eliminacije emisije stakleničkih plinova, bez promjene današnjeg modela ponašanja do 2100. godine postizemo ne samo riskantne klimatske promjene, nego i koncentraciju ugljikovog dioksida (CO₂) od 900 do 1200 ppm. Mi se naprosto ne možemo tako lako i brzo prilagođavati pa se u bližoj budućnosti može očekivati i povećanje zdravstvenih ugroza. Potrebno je ubrzati zelenu energetska tranziciju budući da vremena za odgađanje nema.

Najveća prepreka bržem i širem usvajanju OIE, odnosno zelenoj energetska tranziciji je prvenstveno njihova promjenljivost (intermitentnost) na dnevnoj i godišnjoj razini. Kada bi se uz sustave koji koriste OIE gradili vodikovi sustavi, mogli bi se viškovi električne energije koji se povremeno javljaju, ili će biti smisleno planirani, pohranjivati za kasniju uporabu kada OIE 'ne radi' ili 'radi' manjkavo. Promjenljivost OIE, kao prepreka njihovom ubrzanom razvoju, tako bi bila kompenzirana bez popratne emisije stakleničkih plinova.

Današnja proizvodnja energije iz OIE dominantno je zasnovana na farmama vjetroturbina i poljima fotonaponskih modula, a da bi se kompenzirala promjenljivost proizvodnje u rezervi moraju biti spremne termoelektrane ili hidroelektrane. Buduća proizvodnja prema sadašnjim projekcijama je i dalje iz sunčeve energije i energije vjetra, ali kompenzacija promjenljivosti ide prema baterijama i vodik, a u najnovije vrijeme izgleda da se vodik probija na prvo mjesto.

1.1. EU strategija za vodik

Srijeda, 8. srpnja 2020. godine povijesni je dan kada je vodik kroz predstavljenu EU strategiju za vodik i službeno proglašen jednom od ključnih poluga za uspješnu energetska tranziciju u EU, a sve s ciljem postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine. U isto vrijeme predstavljena je i Strategija za integraciju energetska sustava. Obje Strategije doprinose postizanju ciljeva održivoga razvoja i ciljeva Pariškoga sporazuma. Pariškim sporazumom postavljen je dugoročni cilj zadržavanja porasta prosječne globalne temperature ispod 2°C u odnosu na predindustrijsko razdoblje te poduzimanje napora za ograničavanje porasta temperature do 1,5°C.

Europa želi postati prvi klimatski neutralan kontinent i na tome se ubrzano radi. EU strategija za vodik predstavlja viziju EU o vodik, kao održivome rješenju za ostvarenje klimatski neutralne Europe dekarbonizacijom sektora, u kratkoročnom (2024. – 2030.) i dugoročnom razdoblju (2031. – 2050.). EU Strategija za vodik odredila je ciljani kapacitet elektrolizatora od 40 GW do 2030. godine uz ulaganja u iznosu do 567

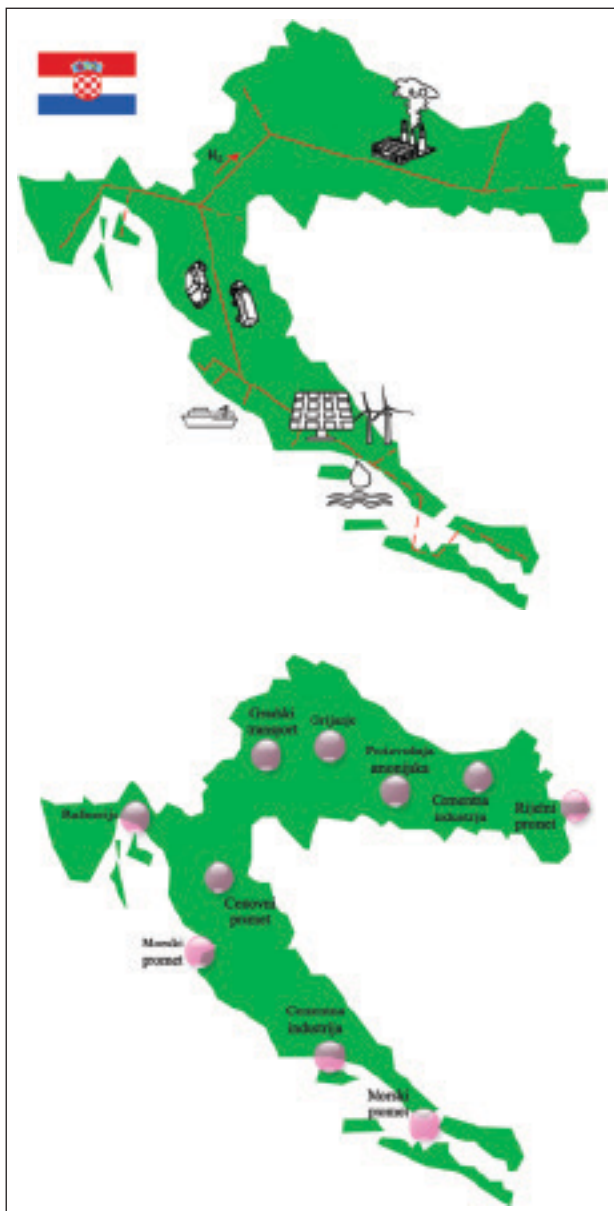
USD milijardi u obnovljivom vodik, do 2050. godine. EU se također obvezala na nastavak financiranja istraživanja i inovacija obnovljivoga vodika kroz okvirni program Horizon Europe (2021. – 2027.). Nekoliko država članica EU ima identificirane namjenske ciljeve za 2030. godinu za instalirane kapacitete elektrolizatora u njihovim Nacionalnim strategijama za vodik, poput Francuske (6,5 GW), Njemačke (5 GW), Italije (5 GW), Španjolske (4 GW), Nizozemske (3 – 4 GW) i Portugala (2 – 2,5 GW).

1.2. Hrvatska strategija za vodik

U Strategiji energetska razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu vodik nije dana uloga sukladna EU strategiji za vodik iz 2020. godine. Međutim, to ne znači da Republika Hrvatska ne računa na vodik te je tako državni tajnik u Ministarstvu gospodarstva i održivoga razvoja (MINGOR), Ivo Milatić još u rujnu 2018. godine u Linzu u Austriji na neformalnom sastanku Vijeća ministara za energetiku potpisao Deklaraciju pod nazivom *Inicijativa za poticanje primjene vodika* kojom se potiče istraživanje i razvoj vodikovih tehnologija s primjenom u transportu, industriji, kućanstvu i općoj energetici.

Veliki dio hrvatskoga gospodarstva iskazuje interes za primjenu vodika u svojim postrojenjima i Republika Hrvatska je više nego ikada spremna na uvođenje vodika u sve sektore. Dokaz da je to zaista tako je taj da je na prijedlog MINGOR-a, odnosno ministra doc. dr. sc. Tomislava Čorića, Vlada Republike Hrvatske na svojoj sjednici održanoj 25. veljače 2021. godine donijela Odluku o pokretanju postupka izrade Hrvatske strategije za vodik od 2021. do 2050. godine. Na temelju ove Odluke Vlade, ministar je donio Odluku o osnivanju stručne radne skupine za izradu prijedloga Hrvatske strategije za vodik. Izrada Hrvatske strategije za vodik trenutno je u tijeku i vrlo skoro se očekuje stavljanje prijedloga na javnu raspravu javnosti.

Hrvatska strategija za vodik poslat će jasnu poruku svima onima koji su zainteresirani za ulaganja u vodikove tehnologije da je država na njihovoj strani. U Republici Hrvatskoj trenutno je na tržištu zastupljen sivi vodik koji se koristi u industriji. Najveća količina vodika koristi se za proizvodnju amonijaka te u rafineriji, a određena količina vodika koristi se i u cementnoj industriji. Dakle, uz uvođenje vodikove tehnologije u prometni sektor, to su glavni korisnici obnovljivoga vodika u prvoj fazi energetska tranzicije. Na slici 1. prikazani su strateški potencijali uvođenja vodika u različite sektore Republike Hrvatske.



Slika 1: Vizija hrvatskog gospodarstva temeljenoga na vodiku
(Izvor: Autorica AK)

U gospodarstvu temeljenome na vodiku (*engl. Hydrogen Economy*) Republika Hrvatska može pronaći svoje mjesto u proizvodnji, pohrani, transportu i korištenju obnovljivoga vodika. Situacija je trenutna takva da hrvatske tvrtke s ulaganjima u bilo koji segment koji uključuje obnovljivi vodik ne mogu pogriješiti. Osnovna poruka Hrvatske strategije za vodik je da će Vlada Republike Hrvatske odlučno podržati razvoj i primjenu vodikovih tehnologija kao jednu od osnovnih poluga u postizanju klimatske neutralnosti Republike Hrvatske.

Republika Hrvatska itekako ima šanse konkurirati u području vodika, itekako ima što za ponuditi. Sada imamo izvanrednu priliku za stvaranjem hrvatskoga vodikovog brenda i jedino što u ovom trenutku mo-

ramo jest biti odvažni, usuditi se zaploviti ovim, za hrvatske tvrtke, pomalo nepoznatim vodama i rezultat neće izostati. Tvrtke i startupi mogli bi integrirati vodik u svoje projekte s proizvodnoga i softverskoga aspekta. Proizvodni podrazumijeva uvođenje pojedinih komponenti vodikovih sustava kao što su elektrolizator (*engl. Electrolyzer*), gorivni članak (*eng. Fuel Cell*), spremnik vodika unutar postojeće proizvodnje ili pokretanjem nove proizvodnje. Softverski aspekt podrazumijeva razvoj i implementaciju softverskih rješenja za regulaciju i praćenje bilo proizvodnoga procesa bilo rada instaliranoga sustava. Naravno, za proizvodnu aktivnost potrebna bi bila stručna analiza kojom bi se utvrdilo omogućava li tvrtki ono što sada proizvodi ulazak u vodikove tehnologije. Primjerice, proizvođač vijaka, budući da vijci imaju važnu primjenu u komponentama vodikove tehnologije, sasvim bi se lako mogao preusmjeriti u zeleno područje, kao i proizvođači četkica za elektromotore koji koriste prešani grafit. Oni bi mogli proizvoditi bipolarne ploče za elektrolizatore ili gorivne članke. Par takvih tvrtki koje sada nemaju nikakve bliske kontakte u smislu proizvodnje mogle bi se nakon analize udružiti i izbaciti na naše pa i međunarodno tržište cjeloviti novi proizvod ili barem neku komponentu. Sve počinje od stručnjaka koji bi takvu analizu i preporuke u dogovoru s menadžmentom tvrtki mogli napraviti. Hrvatska ima čitav niz tvrtki koje bi s tehničkoga gledišta mogle ući u proizvodnju komponenti vodikovih tehnologija, ali to nije dovoljno. Moraju postojati i društveno-politička spremnost kao i spremnost financijskih institucija za takav iskorak.

Također, treba istaknuti i brodogradnju, odnosno pomorski transport s vodikom kao pogonskim gorivom i električnim pogonom (vodikovi gorivni članci plus elektromotori). To je relativno nerazvijeno područje i Republika Hrvatska, u kojoj je brodogradnja tradicionalna grana industrije, tu može puno ponuditi. Na svjetskom tržištu porebe za vodikovim sustavima trenutno su takve da uskoro postojeći proizvodni kapaciteti neće moći zadovoljiti sve te potrebe. Za početak, bit će dovoljno stvoriti proizvodne kapacitete koji će zadovoljiti hrvatske potrebe. Potencijal hrvatske pameti je ogroman i tom potencijalu treba pomoći da se ostvari na opću korist.

2. Osnovne značajke vodika

Vodik je neutrovan plin bez boje, mirisa i okusa, 14 puta lakši od zraka. Pri standardnim uvjetima, vodik je plin, a pri vrlo niskoj temperaturi i/ili visokim tlakovima postaje tekućina ili krutina. Njegova donja,

odnosno gornja granica zapaljivosti je 4,1%, odnosno 74,8%, između kojih je raspon eksplozije. Vodik gori bezbojnim plamenom. Kod miješanja vodika s drugim plinovima ove se značajke mijenjaju prema volumnom postotku, termodinamičkim značajkama i uvjetima okoline. U usporedbi s današnjim konvencionalnim gorivima, vodik daje više energije po jedinici mase (gornja ogrjevna vrijednost vodika je 141,6 MJ/kg, a donja ogrijevna vrijednost vodika je 119,9 MJ/kg).

Što se tiče sigurnosnih aspekata, važne kemijsko-fizikalne značajke pri standardnom tlaku za koje treba poduzeti mjere opreza su temperatura samozapaljenja od 585°C, relativno visoka temperatura plamena od 2045°C i brzina plamena u rasponu od 265 cm s⁻¹ do 325 cm s⁻¹. Nadalje, s tekućim vodikom treba pažljivo postupati zbog mogućih opasnosti uzrokovanih kritično niskim temperaturama (temperatura vrelišta vodika na 1 atm je -253°C). Kao i plinoviti vodik, tekući vodik je bez boje, okusa i mirisa. Glavne značajke tekućega vodika koje ga razlikuju od plinovitoga vodika su njegova vrlo niska temperatura i tekuća faza.

U slučaju opasnosti od plamena, osoblje mora biti odgovarajuće educirano kako bi tu opasnost i prepoznalo. Plamen vodika razlikuje se od plamena ugljikovodičnih goriva, ne samo zbog značajki vodika već i zbog značajki produkata izgaranja. Ugljikovodici poput metana i naftnih derivata sastoje se od atoma vodika i ugljika raspoređenih u molekule. Kada se oni pri izgaranju spoje s kisikom, produkti uključuju CO₂, ugljikov monoksid (CO) i čađu. Vodikov plamen ne proizvodi ništa od toga. U tablici 1. navedene su značajke vodika u usporedbi sa značajkama prirodnog plina i benzina.

Opasnosti povezane s vodikom slične su onima koje se odnose na druga goriva, npr. prirodni plin i benzin, a razlikuju se tamo gdje su fizikalne značajke

različite. Odgovarajući protokoli i propisi za sigurno rukovanje vodikom u većini država već postoje i trebaju se pravilno provoditi. Stoga, vodik nije ništa opasniji od ostalih konvencionalnih goriva i kemikalija ako se s njim postupa na ispravan i siguran način.

3. Proizvodnja vodika

Standardna podjela proizvedenoga vodika prema bojama zapravo podrazumijeva podjelu prema načinu proizvodnje. Obuhvaća sivu, plavu, tirkiznu i zelenu boju vodika (slika 2), ali postoje i slučajevi proizvodnje koji ne prikazuju u potpunosti jednu navedenu boju, zbog čega neka literatura dodaje žutu (vodik proizveden elektrolizom s električnom energijom iz mreže), bijela (vodik proizveden kao nusprodukt industrijskih procesa) i ružičasta/ljubičasta/crvena boja (vodik proizveden elektrolizom korištenjem nuklearne energije).

3.1. Sivi vodik

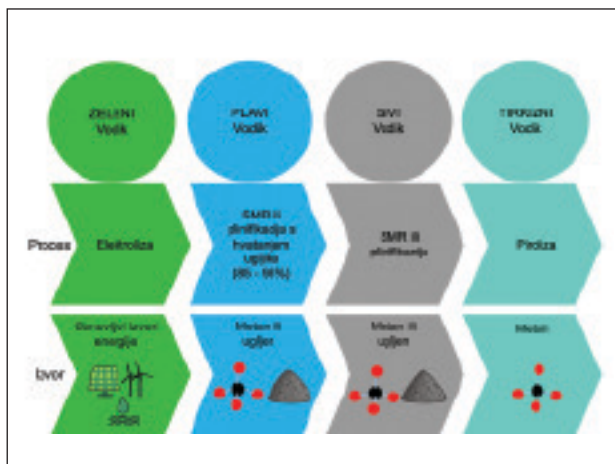
Sivi se vodik proizvodi iz fosilnih goriva metodama koje ovise o vrsti fosilnoga goriva. U tom smislu, neka literatura razlikuje smeđu od crnog vodika opisujući smeđu kao vodik proizveden iz ugljena rasplinjavanjem i crnu kao vodik proizveden iz metana korištenjem SMR-a. Korištenje sivog vodika podrazumijeva značajne emisije CO₂ što ove tehnologije čini neprihvatljivima za postizanje cilja klimatske neutralnosti.

3.2. Plavi vodik

Plavi vodik definiran je kao sivi vodik zbog istog izvora energije (fosilno gorivo), ali s dodatkom CCS-a. Iako je plavi vodik potreban u procesu energetske tranzicije, osobito na početku, treba imati na umu njegova ograničenja kao što su energetska ovisnost o

Tablica 1: Značajke vodika – usporedba sa značajkama prirodnoga plina i benzina (Izvor: IRENA)

	Vodik	Prirodni plin	Benzin
Boja	Ne	Ne	Da
Toksičnost	Ne	Srednje toksičan	Visoko toksičan
Miris	Bez mirisa	Merkaptan	Da
Uzgon (u odnosu na zrak)	14x lakši	2x lakši	3,75x teži
Energija po masi	2,8x > benzin	-1,2x > benzin	43 MJ / kg
Energija po volumenu	4x < benzin	1,5 < benzin	32 MJ / L



Slika 2: Nijanse vodika (Izvor: Autorica AK)

ograničenim fosilnim gorivima i dodatni troškovi za transport i pohranu CO₂ te praćenje CO₂.

Štoviše, emisije CO₂ iz proizvodnje vodika smanjuju se CCS-om, ali se ne eliminiraju, budući da se očekuje da će učinkovitost CCS-a doseći 85 – 95% u najboljem slučaju, što još uvijek prati 5 – 15% emitiranoga CO₂. To su razlozi zašto se plavi vodik smatra samo kratkoročnim rješenjem dok se ne izgrade potrebni kapaciteti za proizvodnju obnovljivog vodika na putu do neto nultih emisija tijekom ranih faza energetske tranzicije.

Sivi vodik proizvodi se iz fosilnih goriva metodom koja ovisi o vrsti fosilnoga goriva. U tom smislu, neka literatura razlikuje smeđu od crnog vodika opisujući smeđu kao vodik proizveden iz ugljena rasplinjavanjem i crnu kao vodik proizveden iz metana korištenjem SMR. Korištenje sivog vodika podrazumijeva značajne emisije CO₂ što ove tehnologije čini neprihvatljivima za postizanje cilja klimatske neutralnosti.

3.3. Tirkizni vodik

Tirkizni vodik koristi prirodni plin kao izvor energije, ali bez sveobuhvatne proizvodnje CO₂, eliminirajući tako potrebu za CCS-om. Proces proizvodnje naziva se piroliza metana, gdje ugljik u metanu postaje čvrsta čađa. Tržište za čađu već postoji (npr. tvrtke za proizvodnju guma) koje osigurava dodatni prihod, ali trenutno tehnologija tirkiznoga vodika nije dovoljno zrela jer je još uvijek u fazi istraživanja.

Proces zahtijeva visoke temperature (600 do 1200 – 1400°C), što se postiže konvencionalnim sredstvima (npr. električnim grijačima) ili pomoću plazme. Njegov nedostatak je što zahtijeva više prirodnog plina nego SMR. Također, ima i problem u vidu deaktivacije

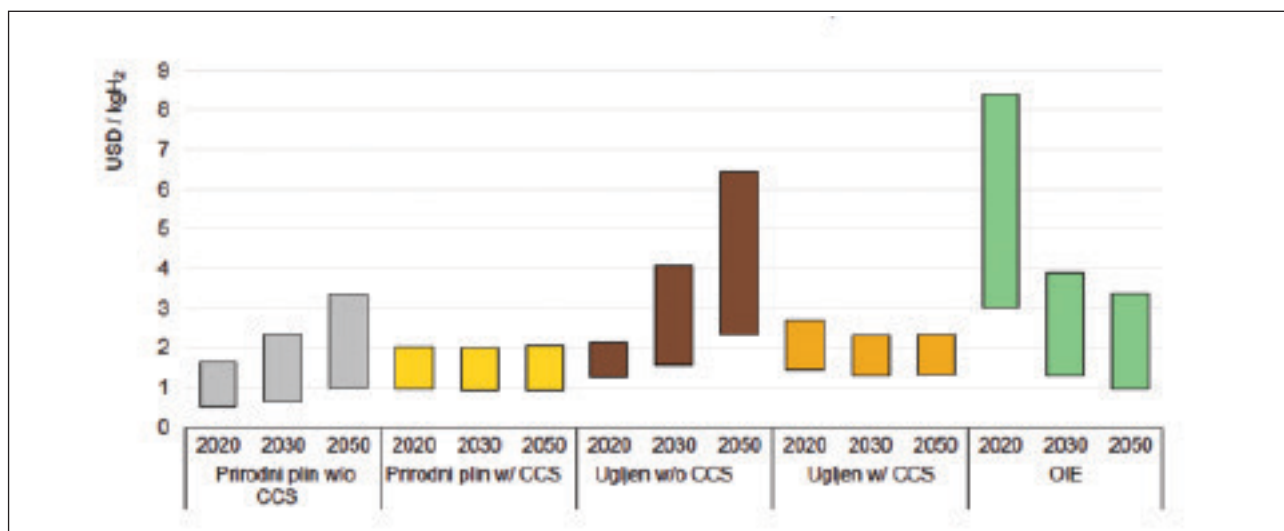
katalizatora koji se ne može riješiti izgaranjem ugljika s površine katalizatora, budući da u tom slučaju emisije CO₂ postaju usporedive s emisijama u SMR-u. Dodatno, ukupna učinkovitost pretvorbe energije metana i električne energije kombiniranih u vodik iznosi 40 – 45%.

3.4. Zeleni (obnovljivi) vodik

Zeleni vodik, također poznat kao čisti ili obnovljivi vodik, među svim ostalim nijansama vodika, smatra se jedinim prihvatljivim za postizanje ciljeva nulte emisije do 2050. godine. To je vodik proizveden elektrolizom vode korištenjem 100% OIE, bez popratnih štetnih emisija. Obnovljivi vodik trenutno čini zanemarivu količinu ukupne proizvodnje vodika, ali se očekuje da će rasti kako cijena energije iz OIE i dalje bude padala. Zbog svih gore navedenih razloga, obnovljivi vodik dobiva sve veći interes. No, najveći razlog zašto se ogromna količina vodika još uvijek proizvodi iz fosilnih goriva je njegova niska cijena.

Trenutno je proizvodnja sivog vodika najjeftinija opcija u većini dijelova svijeta. Ovisno o regionalnim cijenama plina, trošak proizvodnje vodika iz prirodnoga plina kreće se od 0,5 do 1,7 USD po kgH₂. Korištenje CCS tehnologija za smanjenje emisije CO₂ povećava troškove proizvodnje na oko 1 USD do 2 USD po kgH₂, dok korištenje električne energije iz OIE za proizvodnju vodika košta najviše (3 do 8 USD po kgH₂). Međutim, očekuje se da će ova cijena progresivno padati kroz pad cijene električne energije iz OIE, kao i kroz tehnološke inovacije i masovniju primjenu. Taj je potencijal opisan u IEA NZE scenariju do 2050. u kojemu cijena obnovljivoga vodika pada u rasponu od 1,3 do 3,5 USD po kgH₂ do 2030. godine, što je usporedivo s cijenom plavoga vodika. Nadalje, dugoročno gledano, troškovi proizvodnje obnovljivoga vodika mogli bi pasti na 1 do 3 USD / kgH₂, kao što se može vidjeti na slici 3.

Proizvodnja obnovljivoga vodika trenutno je otprilike tri puta skuplja od proizvodnje sivog vodika. No kada bi sivi vodik bio terećen za popratnu emisiju CO₂ odnos cijena zasigurno ne bi tako izgledao. Potrebno je postupno, ali ubrzano gasiti energetske tehnologije koje imaju za cilj proizvodnju i korištenje fosilnih goriva uz popratne emisije CO₂ i novac preusmjeravati u one tehnologije koje takvih emisija nemaju. To se u svijetu već počelo događati. Čak se i NATO počeo baviti posljedicama klimatskih promjena u kojima vidi veliku sigurnosnu prijetnju. Treba razumjeti jednu stvar, a ta je da se električnu energiju direktnom pretvorbom sunčeve energije preko foto-



Slika 3: Projekcije IEA u smanjenju troškova proizvodnje obnovljivog vodika (Izvor: IEA)

naponskih članaka može dobiti s relativno niskom učinkovitošću i relativno niskom cijenom, ali isto tako i s relativno visokom učinkovitošću i relativno visokom cijenom, te treba gledati kolika je cijena proizvedenoga kWh.

3.4.1. Elektroliza vode

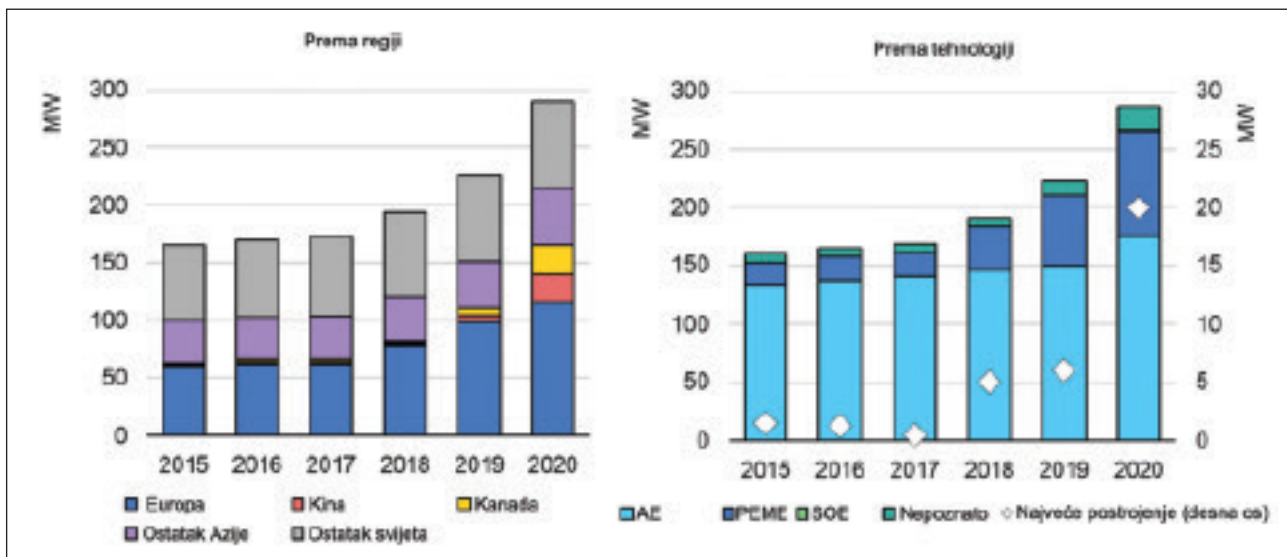
Michael Faraday prvi je formulirao princip elektrolize vode 1820. godine, nakon čega je došlo do više tehnoloških otkrića kako bi se postigla sadašnja učinkovitost. U svom najosnovnijem obliku, elektroliza vode je elektrokemijski proces tijekom kojega se voda razlaže na vodik i kisik primjenom vanjskoga istosmjernoga napona na dvije elektrode (anodu i katodu) koje su u kontaktu s radnim medijem, odnosno elektrolitom.

Da bi se odvijao proces elektrolize vode, istosmjerni napon mora biti jednak ili veći od reverzibilnoga napona koji iznosi 1,23 V i proces elektrolize ne počinje prije tog napona.

Osim energije, proizvodnja vodika zahtijeva i vodu. Elektroliza vode od svih komercijalnih tehnologija ima najmanji vodeni otisak koristeći minimalno 9 kg vode po kgH₂. Elektrolizatori su sustavi u kojima se odvija proces elektrolize vode. Trenutno postoje četiri glavna tipa sustava elektrolizatorskih svežnjeva (*engl. Electrolyzer Stack*) definirani prema tipu elektrolita: alkalni elektrolizator (*engl. Alkaline Electrolyzer – AE*), elektrolizator sa za protone izmjenjivačkom membranom (*engl. Proton Exchange Membrane Electrolyzer – PEME*), elektrolizator s krutim oksidima (*engl. Solid*

Tablica 2: Značajke elektrolizatora prema tipu (Izvor: IRENA)

		AE	PEM	SOE	AEM
Status razvoja		Komercijalni	Komercijalni	Demonstracijski	U razvoju
Radni uvjeti	Temperatura, °C	70 – 90	50 – 80	700 – 850	40 – 60
	Tlak, bar	<30	<70	1	<35
Trošak	CAPEX (sustav), USD / kW	600	1000	>2000	
	Životni vijek, sat	50.000	60.000	20.000	5.000
	Učinkovitost, kWh / kg	50 – 78	50 – 83	40 – 50	40 – 69
Fleksibilnost	Raspon opterećenja	15 – 100%	0 – 160%	30 – 125%	5 – 100%
	Pokretanje	1 – 10 min	1 sek – 5 min		
	Dizanje snage od nule na nominalnu / spuštanje snage od nominalne na nulu	0,2 – 20% po sekundi	100% po sekundi		
	Gašenje	1 – 10 minuta	sekunde		



Slika 4: Instalirani kapaciteti elektrolizatora diljem svijeta (Izvor: IEA)

Oxide Electrolyzer – SOE, te elektrolizator sa za anione izmjenjivačkom membranom (engl. Anion Exchange Membrane Electrolyzer – AEME). U tablici 2 prikazana je usporedba njihovih značajki.

Kao što se može vidjeti na slici 4, globalni kapacitet elektrolizatora udvostručio se tijekom posljednjih pet godina na 300 MW do sredine 2021. godine. Vodeća regija u razvoju kapaciteta elektrolizatora je Europa s 40% globalnog instaliranoga kapaciteta, a slijede Kanada i Kina. Uz brzo nastajanje novih Nacionalnih strategija za vodik u državama članicama, kao i ambiciozne direktive EU, Europa ima jasnu viziju zadržati vodeću poziciju i ostati najveće tržište.

Prema izvješću IRENA-e iz 2020. godine, tržištem su dominirali AE sa 61% instaliranoga kapaciteta i PEME s 31% udjela jer su komercijalno dostupni, dok su SOE i AEME još uvijek u obećavajućoj fazi razvoja, a teže ih je nabaviti. Preostali kapacitet odnosi se na nespacificirane tehnologije i državna poduzeća (instalirani kapacitet od 0,8 MW).

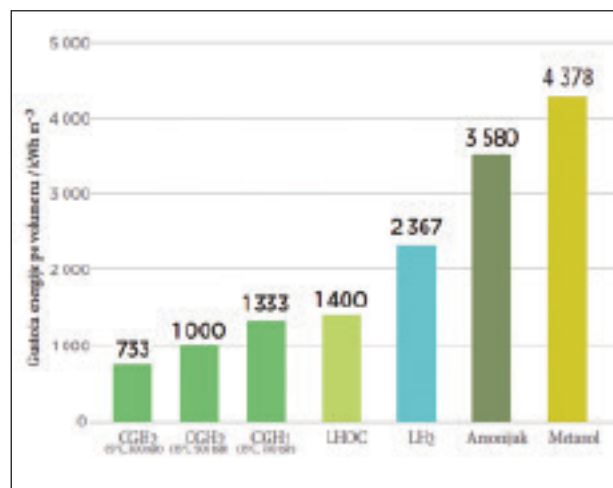
4. Pohrana vodika

Niska gustoća vodika čini ga znatno težim za pohranu od fosilnih goriva. U suštini, za prijenos iste količine energije potrebno je premjestiti veće količine vodika. Zbog toga se vodik tretira kako bi se smanjio njegov volumen prilikom transporta. Trenutno dostupne opcije tretmana su kompresija, ukapljivanje, korištenje tekućeg organskog vodikovog nosača (LOHC) i pretvorba u amonijak, metanol ili sintetička goriva. Svaka od ovih otopina povećava

svoju gustoću energije po volumenu, kao što je prikazano na slici 5.

Idealna pohrana vodika treba omogućiti visoku volumetrijsku i gravimetrijsku gustoću energije, brzo upijanje i otpuštanje goriva, rad na sobnim temperaturama i atmosferskome tlaku, sigurnu uporabu i uravnoteženu isplativost. Kako bismo odgovorili na trenutne i potencijalne buduće zahtjeve tržišta energije vodika, od vitalnog je značaja imati robusnu i pouzdanu pohranu za svaku primjenu. Pohrana vodika može biti stacionarna ili mobilna.

Kada se razmatra mjesto pohranjenoga vodika, postoje dvije glavne mogućnosti njegove pohrane: spremnici i podzemne geološke formacije. Spremnici



Slika 5: Gustoća energije po volumenu kod različitih metoda pohrane vodika; CGH₂ – stlačeni plinoviti vodik; LH₂ – tekući vodik (Izvor: IRENA)

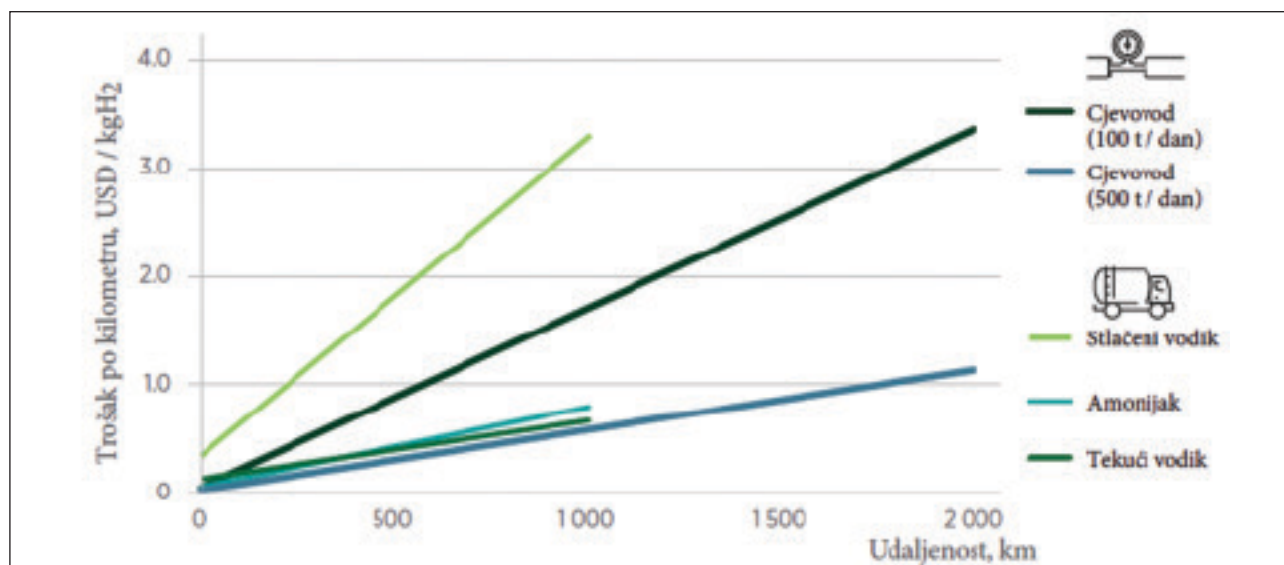
različitih veličina, tlakova i materijala zrela su tehnologija i već se široko koriste u industriji. Prikladni su za male količine (do oko 10.000 m³), čestu uporabu (dnevno) i visoke radne tlakove (oko 1.000 bara). Kako bi se izbjegli veliki spremnici za pohranu zbog niske volumetrijske gustoće energije, za pohranu dovoljne količine vodika potrebna je barem jedna od tri sljedeće značajke: visoki tlak, niska temperatura ili korištenje materijala koji veže veliki broj molekula vodika.

Trenutno su tri primarne metode pohrane: stlačeni plinoviti vodik, tekući vodik i pohrana vodika u metalnim hidridima. Kompresija i ukapljivanje su komercijalizirani, dok je kriokompresija koju je razvila automobilska tvrtka BMW obećavajuća metoda, a metalni hidridi privlače pozornost radom na niskom tlaku. Pohrana vodika u velikim količinama predstavlja jedan od najznačajnijih izazova. Podzemna pohrana vodika moguća je u kamenim kavernama i osiromašenim plinskim poljima, no najizvedivije su do danas slane kaverne (koje petrokemijska industrija koristi od ranih 1970-ih), koje se također koriste za pohranu prirodnoga plina. Za razliku od spremnika, ova vrsta pohrane vodika je prikladnija za velike količine i duge vremenske periode uz niži radni tlak (50 – 250 bara). Slane kaverne rasprostranjene su diljem svijeta, ali s ograničenim kapacitetom. Azijsko-pacifički, Južna Amerika, Južna Europa i zapadna obala Sjeverne Amerike imaju nekoliko takvih slanah kaverni. Trenutno se slane kaverne uglavnom koriste za pohranu vodika u dvije zemlje (SAD i Ujedinjeno Kraljevstvo) s ukupnim kapacitetom od oko 250 GWh u 2019. godini. Prema izvješću Bloomberg NFL-a iz

2020. godine, kako gospodarstvo temeljeno na vodiku brzo raste, bit će potrebno 3 do 4 puta više infrastrukture za pohranu procijenjenoga vodika, troška od oko 637 milijardi USD do 2050. godine kako bi se osigurala ista razina energetske sigurnosti kao s prirodnim plinom.

5. Transport i distribucija vodika

Ovisno o načinu pohrane, postoje tri glavna načina isporuke vodika, a to su isporuka plinovitoga vodika, isporuka tekućeg vodika, te metalni hidridi. Odabir metode isporuke ovisi o specifičnim geografskim i tržišnim značajkama poput ciljne populacije i ponašanja potrošača, gustoće naseljenosti, veličine punionica i tržišnoga prodora električnih vozila na pogon gorivnim člancima (*eng. Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV*) i drugih sustava koji troše vodik. Bloomberg NEF analiza sugerira da je trošak isporuke obnovljivoga vodika od oko 2 USD / kgH₂ do 2030. godine i 1 USD / kgH₂ do 2050. godine u Kini, Indiji i zapadnoj Europi dostižan. Troškovi bi mogli biti 20 – 25% niži u zemljama s najvećim udjelom OIE i resursima za pohranu vodika, kao što su SAD, Brazil, Australija, skandinavske zemlje i Bliski istok. Međutim, cijena bi bila i do 50 – 70% viša na mjestima poput Japana i Koreje koje imaju slabije OIE i nepovoljnu geologiju za pohranu. Stlačeni vodik može se transportirati kamionima ili prikolicama u plinskim bocama s tlakovima između 200 i 700 bara (prikolica s jumbo cijevima može prevoziti do 1.100 kgH₂ stlačenoga na 500 bara). Prijevoz stlačenoga vodika



Slika 6: Trošak transporta vodika ovisno o udaljenosti i prijevoznome sredstvu (Izvor: IRENA)

kamionom izvediv je za kratke udaljenosti (do nekoliko stotina kilometara) i za male količine. Za veće udaljenosti vodik se obično prevozi u tekućem obliku (jedan kamion može prevesti do 3.500 kg tekućega vodika). Kako se volumen i udaljenost povećavaju, kamioni postaju sve manje isplativa opcija, a mogu se zamijeniti cjevovodima stlačenoga vodika, tzv. vodikovodima, koji potencijalno mogu transportirati tisuće tona dnevno. Međutim, trenutno postoji samo oko 5.000 km vodikovoda (u usporedbi s 3 milijuna km fosilnih plinovoda), uglavnom u industrijskim klasterima u Aziji, Europi i Sjevernoj Americi. Vodik se također može transportirati brodom, uglavnom u obliku amonijaka, tekućega vodika, LOHC-a, metanola ili sintetičkih tekućina. Na temelju udaljenosti i tipa prijevoznoga sredstva, procjena troška transporta vodika prikazana je na slici 6.

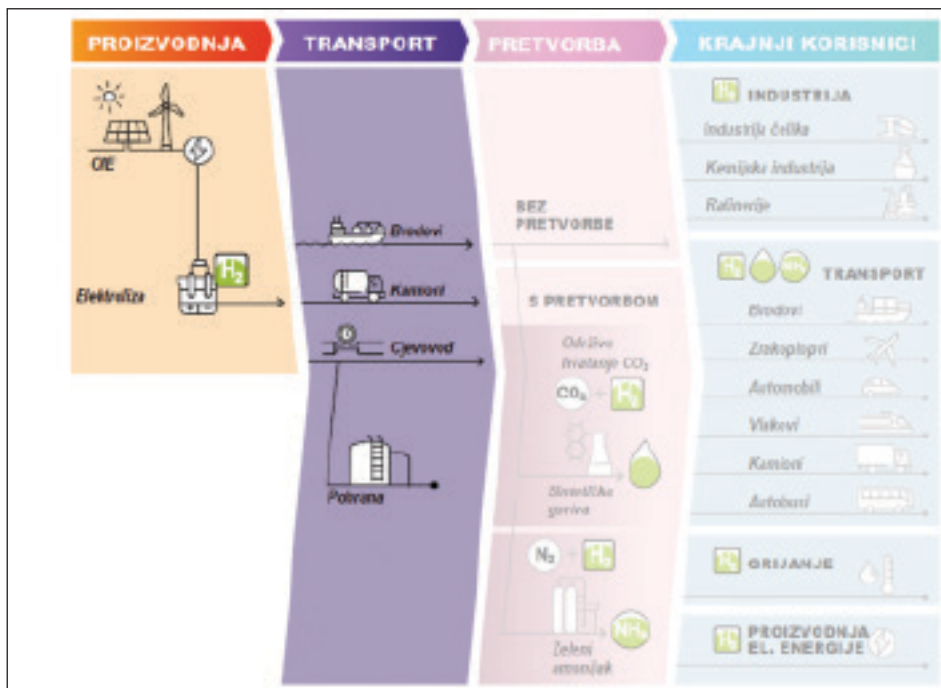
Još jedna važna stvar koju treba uzeti u obzir je činjenica da pretvorba i transport vodika mogu stvoriti dodatne emisije CO₂. Emisije tijekom faze transporta izravno su povezane s energetsom učinkovitošću načina prijevoza i gustoćom energije nositelja. Kratkoročno, kamioni koji prevoze vodik najvjerojatnije će nastaviti koristiti fosilna goriva. Prijevoz kamionima može lako narušiti prednosti smanjenja emisije CO₂. Na primjer, transport stlačenoga vodika na 400 km u kamionu koji koristi dizel ispuštao bi oko 3 kg CO₂ / kgH₂. Tekući vodik smanjuje doprinos CO₂ po kilogramu transportiranoga vodika, s obzirom na njegovu veću gustoću energije. To je potrebno usporediti s dodatnim emisijama tijekom koraka ukapljivanja. Glavni izvor emisija stakleničkih plinova za cjevovode je potrošnja energije za kompresiju, ali dodane emisije su relativno male. Na primjer, cjevovod koji prenosi 40 tona dnevno na 400 km imao bi emisije reda 0,1 kg CO₂ / kgH₂.

Jedna od opcija transporta vodika u tranzicijskom razdoblju je i transport postojećim cjevovodima prirodnoga plina pri čemu je važno istaknuti SUSTAV proizvodnje, pohrane, transporta i korištenja vodika. On treba biti postupno ugrađivan u postojeći sustav magistralnih (visokotlačni) i distribucijskih (niskotlačni) plinovoda. Prirodni plin ima veću ogrjevnu vrijednost po jedinici volumena, a vodik ima veću ogrjevnu vrijednost po jedinici mase, tako da kod umješavanja vodika u prirodni plin, ukoliko se želi očuvati isporučenu energiju kao prije umješavanja vodika, mora se pomiriti s povećanom volumnom isporukom mješavine. Pri tome svima treba biti jasno da prirodni plin nije gorivo nultih emisija. Njegova uloga je isključivo tranzicijska koja će omogućiti postupno

umješavanje vodika. Na početku je udio vodika 10% da bi do 2050. godine postigli udio vodika od 100%. Kada se promatra EU, vidi se da se tu već sada može govoriti o 2 – 6% volumnih udjela vodika, a u Njemačkoj u određenim uvjetima i do 10%. Istovremeno, treba napomenuti da je ranije u EU u uporabi bio tzv. gradski plin koji je bio proizveden plinifikacijom ugljena i koji je sadržavao i više od 50% vodika, ali i otrovni CO. U Zagrebu je, npr. gradski plin postupno zamjenjivan prirodnim plinom od šezdesetih godina prošloga stoljeća, a posljednji potrošači prekopčani su s gradskoga na prirodni plin krajem 1993. godine. Prema tome, principijelnih razloga da se vodik ne bi mogao umješavati u prirodni plin i transportirati cjevovodima nema. Na tom tragu u svijetu su napravljene, a i u tijeku su, opsežne studije o mogućnostima i posljedicama umješavanja vodika u prirodni plin. Ono što je važno za Republiku Hrvatsku je da svi planirani novi cjevovodi moraju prethodno zadovoljiti uvjet o mogućnosti prihvata 100% vodika.

6. Korištenje vodika

Obnovljivi vodik igrat će ključnu ulogu u uravnoteženju elektroenergetskoga sustava temeljenoga na OIE. Vodik se može koristiti u različitim sustavima, ali njegova najatraktivnija primjena je u svežnju gorivnih članaka (*engl. Fuel Cell Stack*). Gorivni članak je elektrokemijski članak u kojemu se odvija elektrokemijsko izgaranje vodika (iz spremnika) i kisika (iz zraka ili iz spremnika) pri čemu je glavni produkt električna energija, a jedini nusprodukti su toplina i voda. U 2020. godini globalna potražnja za vodikom bila je oko 90 Mt, što znači da je porasla za 50% u zadnjih 20ak godina, pri čemu je gotovo sva potražnja dolazila iz rafiniranja i industrijske uporabe. Vodik može omogućiti prelazak s fosilnih goriva u mnogim primjenama po iznenađujuće niskim cijenama CO₂. Na primjer, pri 1 USD / kgH₂, cijena CO₂ od 50 USD / tCO₂ bi bila dovoljna za prelazak na obnovljivi vodik u proizvodnji čelika; 60 USD / tCO₂ za korištenje obnovljivoga vodika za toplinu u proizvodnji cementa; 78 USD / tCO₂ za sintezu amonijaka i 90 USD / tCO₂ za proizvodnju aluminija i stakla. Također, vodik može igrati važnu ulogu u dekarbonizaciji kamiona s velikim teretom na duge relacije prelaskom na pogon na vodikove gorivne članke, koji bi već do 2031. godine mogli biti jeftiniji u odnosu na kamione na pogon dizelskim motorima. Očekuje se da će industrija FCEV biti najskuplji sektor za povećanje jer će do 2030. godine trebati 105 milijardi USD subvencija.



Slika 7: Vodikov lanac vrijednosti (Izvor: IRENA)

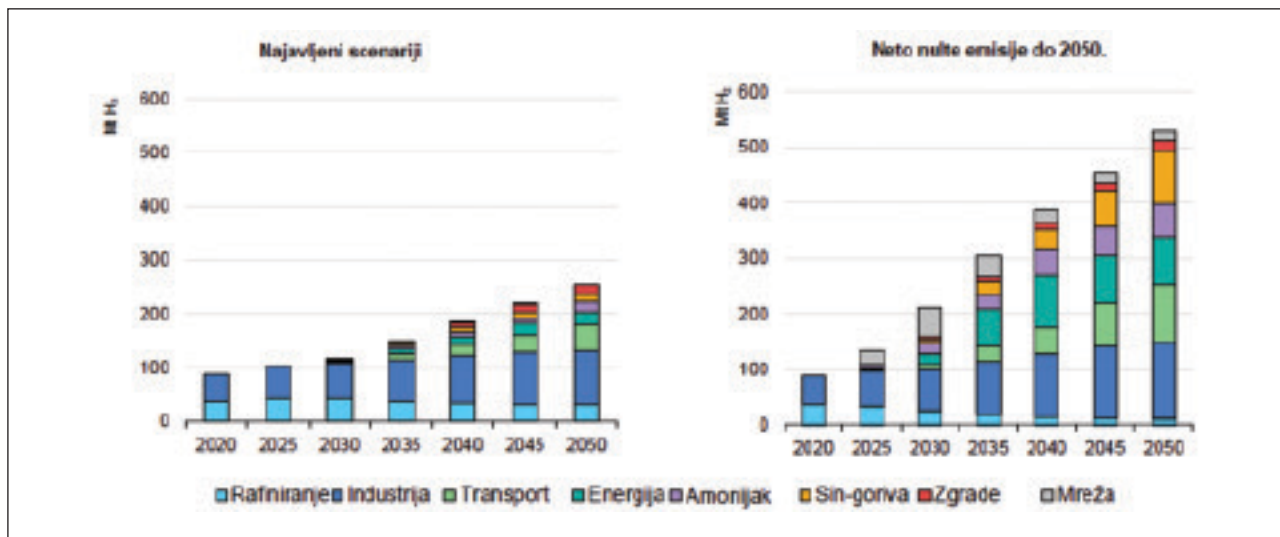
Za brodove, zeleni amonijak iz vodika je obećavajuća opcija i mogla bi biti konkurentna teškom loživom ulju s cijenom CO₂ od 145 USD / tCO₂ u 2050. godini. Sveobuhvatni vodikov lanac vrijednosti (*eng. Hydrogen Value Chain*) prikazan je na slici 7.

Kratkoročno se očekuje da će vodik najviše utjecati na industrijski sektor. S 38% ukupne finalne potražnje za energijom, industrija je najveći sektor krajnje potrošnje i čini 26% emisija CO₂ globalnoga energetskog sustava. U cijeloj industriji, 2020. godine, 6% ukupne potražnje za energijom korišteno je za proizvodnju vodika (51 Mt), koji je prvenstveno služio kao sirovina za kemijsku proizvodnju te u proizvodnji željeza i čelika. Vodik može olakšati dekarbonizaciju ključnih segmenata transportnoga sektora, uglavnom teški cestovni

prijevoz na velike udaljenosti, te sektora brodogradnje i zrakoplovstva. Prometni sektor odgovoran je za više od 20% globalnih emisija stakleničkih plinova i jednu četvrtinu konačne potražnje za energijom, a naftni proizvodi opskrbljuju 90% energije koju troši. Do danas je korištenje vodika u ovom sektoru bilo ograničeno, što predstavlja manje od 0,01% potrošene energije. S ciljem podizanja svijesti o nužnosti tranzicije na čisti transport nultih emisija, 2019. godine organiziran je Croatia Mirai Challenge kroz suradnju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i Toyota Croatia d.o.o. Ovaj projekt proveden je kao putovanje na relaciji Zagreb – Brussels i bilo je to prvi puta da jedan automobil na vodik vozi hrvatskim prometnicama. Na slici 8. prikazan je trenutak ispraćaja na ovo putovanje.



Slika 8: Croatia Mirai Challenge; na fotografiji s lijevo na desno: Prof. dr. sc. Dubravko Majetić (dekan Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu); Nj.E. Misako Kaji (veleposlanica Japana u Republici Hrvatskoj); Doc. dr. sc. Ankica Kovač (voditeljica projekta); Krešimir Bago (direktor Toyota Croatia d.o.o.) (Izvor: Autorica AK)



Slika 9: Potencijalna potražnja za vodikom po sektorima u scenarijima najavljenih obećanja i neto nultih emisija od strane IEA, 2020.-2050. (Izvor: IEA)

Demonstracija vodika kao goriva u sektoru brodogradnje, postavljanje kvota za singoriva u zrakoplovstvu i postavljanje odgovarajuće infrastrukture za opskrbu gorivom u morskim, riječnim i zračnim lukama ubrzalo bi korištenje vodika, i goriva na bazi vodika, u tim sektorima u kojima je emisije teško smanjiti. Korištenje vodika u proizvodnji električne energije trenutno čini manje od 0,2% opskrbe električnom energijom, uglavnom povezano s korištenjem miješanih plinova s visokim udjelom vodika iz industrije čelika, petrokemijskih postrojenja i rafinerija, te korištenjem nusprodukta čistog vodika. Proizvođači plinskih turbina uvjereni su da mogu osigurati plinske turbine koje rade na čistom vodikom do 2030. godine. Vodik može poslužiti i kao sezonski medij za pohranu u energetskim sustavima s visokim udjelom povremene proizvodnje električne energije iz OIE i odgovorom na nisku potražnju osiguravajući pouzdanost i fleksibilnost sustava.

Međutim, korištenje vodika mora biti podržano snažnom državnom potporom i mjerama za zatvaranje troškovnog jaza s prirodnim plinom. Uzimajući u obzir klimatske ciljeve, kao i najavljene propise i direktive o vodikom u raznim zemljama, i Bloomberg NFL i IEA izradile su procjene o potražnji vodika prema različitim scenarijima. Prema Bloomberg NFL, uz slabu nacionalnu energetska politiku koja se provodi, 187 Mt vodika moglo bi se koristiti do 2050. godine, što je dovoljno za zadovoljavanje 7% projiciranih konačnih energetska potreba u scenariju u kojemu je globalno zatopljenje ograničeno na 1,5°C. S druge strane, ako se provode snažne i sveobuhvatne poli-

tike, moglo bi se iskoristiti 696 Mt vodika (zadovoljavanje 24% konačne energije u scenariju od 1,5°C). To bi zahtijevalo više od 11 bilijuna USD ulaganja u proizvodnju, pohranu i transportnu infrastrukturu. Godišnja prodaja vodika iznosila bi oko 700 milijardi USD, s milijardama više utrošenih na opremu krajnje uporabe. U slučaju da svi sektori, za koje je malo vjerojatno da će se elektrificirati, koriste vodik, potražnja bi do 2050. godine mogla doseći čak 1.370 Mt vodika. Procjene IEA u vezi s potražnjom za vodikom uzimaju u obzir neto nulte emisije i scenarije najavljenih obećanja kako je prikazano na slici 9.

Na najambicioznijem putu, potražnja za vodikom višestruko se povećava (gotovo šesterostruko) kako bi dosegla 530 Mt do 2050. godine, s polovicom ove potražnje u industriji i transportnom sektoru. Konkretno, potražnja industrije gotovo se utrostručuje s oko 50 Mt u 2020. na oko 140 Mt u 2050. godini. Transportna potražnja brzo raste s manje od 20 kt na više od 100 Mt u 2050. godini, zahvaljujući količinama koje mali udjeli vodika mogu postići u određenim segmentima. Prodor u energetska sektor također se značajno povećava jer korištenje vodika u plinskim elektranama i stacionarnim gorivnim člancima pomaže u ravnoteži rastuće proizvodnje iz promjenljivih OIE, osiguravajući sezonsku pohranu energije. Korištenje vodika u zgradama se povećava, ali s postojećim ograničenjima gdje postoji bolja tehnologija.

Do 2050. godine otprilike jedna trećina potražnje za vodikom u scenariju neto nulte emisije koristi se za proizvodnju goriva na bazi vodika kao što su amonijak, sintetski kerozin i sintetski metan. Korištenje

amonijaka proširuje se izvan postojećih primjena (prvenstveno dušikovih gnojiva) koje se koriste kao gorivo, kao i sintetičkih goriva (singoriva) proizvedenih od vodika i CO₂ zarobljenih iz primjene biomase (električna energija na bioenergiju ili proizvodnja biogoriva) ili iz atmosfere. Sintetički kerozin zadovoljava oko jednu trećinu globalne potražnje za zrakoplovnim gorivom, dok sintetički metan zadovoljava oko 10% potražnje za korištenjem plina iz mreže u zgradama, industriji i transportu.

7. Vodik u republici hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj na nekoliko se znanstvenih institucija provode istraživanja vezana na vodikove tehnologije u okviru vrijednih što domaćih što međunarodnih projekata, a povećani interes za vodikom kao jednim od rješenja za postizanje klimatske neutralnosti sve je više projekata i u gospodarstvu koji se provode u suradnji s akademskom zajednicom. Za primjer, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu trenutno se provode dva velika projekta: projekt pod nazivom *Osiguranje električne energije u slučaju klimatskih ekstrema i prirodnih katastrofa* unutar kojega se razvija na vodik u zasnovana energetska jezgra koja se sastoji od sustava koji koristi obnovljivi izvor energije, elektrolizatora, kompresora vodika, spremnika vodika, svežnja gorivnih članaka, i automatskog sklopa za nadzor i upravljanje jezgrom na koju su priključeni potrošači električne i/ili toplinske energije. Projekt je vrijedan 3,5 milijuna kuna i



Slika 10: Prvi hrvatski bicikl na vodik i prva hrvatska punionica vodika instalirani ispred Laboratorija za energetska postrojenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (Izvor: Autorica AK)

financiran je iz Europskog fonda za regionalni razvoj. Drugi projekt je uspostavno-istraživački projekt pod nazivom *Napredne metode proizvodnje i transporta zelenog vodika* unutar kojega se istražuju mogućnosti povećanja učinkovitosti elektrolizatora te učinkoviti načini transporta vodika. Projekt je vrijedan gotovo 2 milijuna kuna, a financiran je iz Hrvatske zaklade za znanost. Također, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu izrađen je i prvi hrvatski bicikl na vodik i instalirana prva hrvatska punionica vodika koji su prikazani na slici 10. Vodik kao spremnik energije ima primjenu u općoj energetici i transportu i ne proizvodi po okolinu štetne emisije. Ova je punionica demonstracijski energetska sustav sa zatvorenim ciklusom korištenja sunčeve energije



Slika 11: Vodikov sustav na biciklu (Izvor: Autorica AK)

i vode za proizvodnju i korištenje vodika umjesto ugljikovodičnih goriva.

U punionici se vodik proizvodi elektrolizom vode korištenjem sunčeve energije preko fotonaponskih članaka instaliranih na krovu iznad punionice, dakle obnovljivi vodik. Zbog svog inovativnoga izgleda, dizajn punionice zaštićen je kao intelektualno vlasništvo na domaćoj i međunarodnoj razini. Punionica trenutno služi za opskrbu bicikla na vodik (s mogućnošću nadogradnje na više tlakove za punjenje npr. autobusa i osobnih automobila) koji je opremljen vodikovim sustavom koji uključuje PEM gorivni članak (300 W), spremnik vodika (30 bar), DC/DC pretvarač, redukcijski ventil i popratnu elektroniku kako je prikazano na slici 11.

Vodikov sustav, smješten na stražnjem nosaču bicikla, postavljen je između elektromotora i kontakata baterije s DC/DC pretvaračem za male prilagodbe. Težište projekta je na istraživanju mogućnosti integracije komercijalno raspoloživih komponenti. Razvijeni prototip prvog hrvatskog bicikla na vodik pokazao je da pedale s električnim pogonom i vodikov sustav funkcioniraju jako dobro: tijekom vožnje nema povlačenja, dinamika sustava je prilično brza, a vožnja je mirna i ugodna. Ovim konceptom punionice vodika i bicikla na pogon vodikom zaokružen je jedan demonstracijski sustav u transportu koji ne koristi ugljikovodična goriva i ne emitira CO₂. U principu, njegove komponente koriste samo sunce i vodu. On predstavlja primjer koncepta koji je primjenjiv općenito, kako u transportu tako i u energetici.

8. Utrka s vremenom

Do 2050. godine potrebno je osigurati klimatsku neutralnost što znači da je potrebno zaustaviti emisije CO₂ u atmosferu, i ne samo zaustaviti, nego ga i izvlačiti iz atmosfere kako bi srednju globalnu temperaturu zadržali na 1,5°C. Ključno je ubrzati energetska tranziciju na OIE i obnovljivi vodik te provesti sveobuhvatnu dekarbonizaciju transporta i proizvodnje svih vrsta dobara. OIE u sprezi s obnovljivim vodikom mogu tu tranziciju značajno ubrzati i time doprinijeti izbjegavanju katastrofičnih scenarija.

U tijeku je energetska tranzicija koja ne uključuje samo postrojenja za proizvodnju električne energije, već uključuje i integraciju energetskih sektora – transporta i grijanja. Centralno pitanje je kako koncipirati i temeljitije i ozbiljnije orijentirati proizvodnju električne energije prema OIE, dominantno prema sunčevoj energiji. Energetska tranzicija prema OIE hitno je potrebna na velikoj skali zbog prijetnje klimatskih promjena, a

nju je moguće ubrzati oslanjanjem na masovno proizvedeni obnovljivi vodik. Sukladno EU strategiji za vodik, ključ za bržu tranziciju na OIE su spremnici energije, konkretno spremnici obnovljivoga vodika. Republika Hrvatska za sada se jedino zakonski obvezala na -7% do 2030. godine za non-ETS sektor što će se uskoro ažurirati, s obzirom na EU cilj od -55%. S obzirom da u Republici Hrvatskoj ne postoji Zakon o emisijama potrebno je hitno zakonski regulirati obveze jer dokle god ne postoje zakonski regulirane obveze, ne može se niti tvrditi da je bilo koji od postojećih scenarija naš propisani cilj. Svi scenariji su za sada samo nacrt. Donošenjem Zakona o emisijama CO₂ ubrzat će se energetska tranzicija prema OIE i vodik. IPCC je objavio 5 novih scenarija globalne promjene klime. Niti jedan od tih scenarija ne predviđa zaustavljanje porasta temperaturne anomalije do 2080. godine bez obzira na tijek intenziteta redukcije emisije stakleničkih plinova u atmosferu. Stoga je za očekivati da će COP26 (UK, Glasgow, studeni 2021.) implicirati donošenje još oštrijih obveza država sudionica.

9. Zaključak

Ako bi učinkovitost energije (uz prosječnu godišnju osunčanost Republike Hrvatske od 1350 kW h m⁻²) koja padne na samo 75 km² bila samo 10%, bilo bi potrebno samo 750 km², odnosno samo kvadrat od 27,4 × 27,4 km Republike Hrvatske mogao bi se iskoristiti za potpunu zamjenu svih današnjih oblika potrošene primarne energije sunčevom energijom. Te bi brojke u stvarnosti bile daleko manje kada bi se iz proračuna izdvojila energija vode koja sada sudjeluje s otprilike 50% i sustavi za pretvorbu sunčeve energije izgradili u južnim dijelovima Republike Hrvatske koji imaju daleko veću osunčanost. Ako bi se dozračenoj sunčevoj energiji pribrojili raspoloživi potencijali vjetrova i valova u jadranskome priobalju, dobivaju se brojke koje definitivno potvrđuju da Republika Hrvatska može, koristeći svoje potencijale OIE za proizvodnju obnovljivoga vodika, zadovoljiti sve svoje potrebe za energijom. Republika Hrvatska ima dovoljno slatke vode i još više morske vode pa bi uz obilje sunčeve energije proizvodnja obnovljivoga vodika mogla biti posve dovoljna za pokrivanje unutarnjih potreba, a preteklo bi i za izvoz, istovremeno ne emitirajući niti grama CO₂. Treba shvatiti da je došlo vrijeme kada se cijena i brža dinamika dekarbonizacije više ne smiju podvrgavati kriterijima ekonomske isplativosti jer se globalne klimatske promjene moraju zaustaviti praktično pod bilo koju cijenu prije nego bude prekasno za sve.

Reference:

1. KOVAČ, A., PARANOS, M., MARCIUŠ, D.: Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46, 16, 10016-10035.
2. KOVAČ, A.: Uloga vodikovih gorivnih članaka u procjeni razvoja prometnog sektora u Republici Hrvatskoj. *Radovi Zavoda za znanstveni rad Varaždin*, 2018, 29, 349-359.
3. KOVAČ, A., PARANOS, M.: Design of a solar hydrogen refuelling station following the development of the first Croatian fuel cell powered bicycle to boost hydrogen urban mobility. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44, 29, 10014-10022.
4. KOVAČ, A., MARCIUŠ, D., PARANOS, M.: Thermal management of hydrogen refuelling station housing on an annual level. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46, 57, 29400-29410.
5. KOVAČ, A., MARCIUŠ, D., BUDIN, L.: Solar hydrogen production via alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44, 20, 9841-9848.
6. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf, (pristupljeno: studeni, 2021.)
7. <https://irena.org> (pristupljeno: studeni, 2021.)
8. <https://www.iea.org> (pristupljeno: studeni, 2021.)
9. <https://hydrogen.hr> (pristupljeno: studeni, 2021.)