

BUDUĆNOST VODIKA KAO GORIVA U HRVATSKOJ

UVOD

Više od 180 godina zna se za mogućnosti vodika (H_2) kao izvora „čiste“ energije. No, tek prije nekoliko godina zacrtane su i donesene strategije europskih zemalja kojima bi se trebala osigurati „dekarbonizacija“ te smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima čijim izgaranjem bitno utječemo na klimatske promjene. Republika Hrvatska (RH) kao najnovija zemlja članica Europske unije (EU) donijela je svoju strategiju za vodik do 2050. godine. No, uz sve benefite koje vodik donosi u ekološkom smislu, svakako treba biti realan i sagledati trenutno stanje odnosno postoji li uopće u RH potražnja za vodikom kao gorivom i kakva nam je infrastruktura potrebna.

Najveće smanjenje emisija ugljičnog dioksida (CO_2) upotrebom vodika kao goriva trebalo bi se ostvariti u sektoru prometa. Ciljevi strategija su postavljeni i za realizaciju su potrebna golema financijska sredstva kako bi se razvile tehnologije i izgradila infrastruktura, ali ključno je i mijenjanje percepcije te dodatna edukacija ljudi. Upravo rat u Ukrajini pokazao je koliko smo ovisni o fosilnim gorivima. Stoga je ovakav radikalni zaokret bio neophodan u kontekstu korištenja goriva iz obnovljivih izvora, s obzirom da EU do 2050. godine želi dostići nultu stopu emisija CO_2 .

Kod proizvodnje vodika ključno je pitanje ugljičnog otiska jer postoji nekoliko tehnoloških pristupa, a ovisno o emisijama CO_2 tijekom proizvodnje, razlikujemo „zeleni“, „plavi“ i „sivi“

vodik. Utrošak energije kod dobivanja vodika također je značajan pa će u budućnosti investiranje u obnovljive izvore energije umnogome utjecati i na „pojeftinjenje“ vodika. Bitno je i rješavanje pitanja skladištenja te sigurnog transporta vodika do mjesta za punjenje. To su sve veliki izazovi i za „jače“ ekonomije, stoga realizacija budućih projekata uvelike ovisi o EU novcu.

VODIK KAO GORIVO

Gledajući periodički sustav elemenata, vodik zauzima prvo mjesto zbog svoje atomske mase, a pri standardnom tlaku i temperaturi, to je plin bez boje, mirisa i okusa, neotrovan i 14,4 puta je lakši od zraka. Vodik na standardnoj temperaturi ($20^\circ C$) i tlaku (100 kPa/1 bar) zauzima 3.000 puta više prostora od zraka. Vrlo je reaktivan i veže se s drugim elementima u spojeve pa je zato nepostojan i rijedak u prirodi. Zato ga je za potrebe skladištenja i transport neophodno tlačiti i hladiti na $-253^\circ C$, čime postaje tekućina tj. izvršiti ukapljivanje. Sastavni dio je vode koja, gledajući količinu vode na zemlji, može biti njegov neiscrpní izvor.

O vodik u kao energentu vizionarski je još 1875. godine pisao francuski romanopisac, pjesnik i dramatičar Jules Gabriel Verne koji je u komponentama vode tj. vodik u i kisiku vidio neograničeni izvor energije i topline. Njegov suvremenik Velšanin William Robert Grove (1811. – 1896.) još je 1839. godine opažanjem došao do

zaključka da se kod elektrolize vode može dobiti električna energija, a dokazao je i da se vodena para može razdvojiti na vodik i kisik.

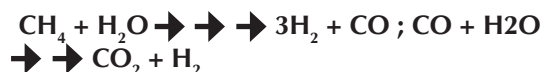
katalizator (Pt)



U gorivoj ćeliji se pod kontroliranim uvjetima između kisika i vodika zbiva reakcija plina praskavca. Gorive ćelije sastoje se od anode – pozitivnog pola, elektrolita, membrane i katode – negativnog pola. Na jednoj strani se dovodi vodik, a na drugoj kisik. Oba elementa (omjer vodik : kisik = 2 : 1) se ponovno žele povezati u vodu. Membrana, koja je najčešće od platine kao najučinkovitijeg katalizatora, propušta samo dio vodikovog atoma tj. pozitivno nabijen proton, dok negativno nabijen elektron putuje zaobilazno, što rezultira nastankom vodikove energije odnosno električne struje koja preko vodiča može pokretati elektromotor. Zbog cijene platine koja čini oko 60 % cijene elektrolizatora, istraživanja su usmjerena na alternativne i jeftinije materijale. Ako se vodik upotrebljava u energetske svrhe, on ne uzrokuje emisije stakleničkih plinova, a voda je jedini nusproizvod procesa. Moguće ga je upotrebljavati i za proizvodnju drugih plinova te tekućih goriva.

SIVI, PLAVI I ZELENI VODIK

„Sivi“ vodik proizvodi se SMR postupkom (engl. Steam Methane Reforming) odnosno reformiranjem prirodnog plina, tehnologijom obrade koja se koristi za reorganizaciju molekularne strukture ugljikovodika. U ovom procesu se metan (CH_4), koji je sastavni dio zemnog plina, miješa s parom pod visokim tlakom i na visokoj temperaturi kako bi se katalitičkom reakcijom dobio vodik i ugljični dioksid. Ova tehnika najčešće se primjenjuje u naftnoj industriji i kako se u tom postupku ne „hvataju“ nusprodukti, gotovo 10 kg ugljičnog dioksida ispušta se u atmosferu za svaki 1 kg proizvedenog sivog vodika. Uzimajući u obzir i štetnost CH_4 koji je 8 puta štetniji od CO_2 za „efekt staklenika“ tada je ukupni ugljični otisak vodika iz zemnog plina puno veći.



„Plavi“ vodik u osnovi je postupak proizvodnje „sivog“ vodika, ali uključuje CCS postupak (engl. Carbon Capture and Storage) tj. hvatanje i skladištenje ugljika. Proces proizvodnje plavog vodika ne eliminira u potpunosti emisije CO_2 u atmosferu, ali ekološki je prihvatljivije rješenje jer se CO_2 utiskuje u duboke geološke strukture gdje će ostati „usklađeno“ odnosno neće biti ispušten u atmosferu. Moguće je da u postupku utiskivanja određeni dio CO_2 ipak ode u atmosferu, stoga je upitna tvrdnja da se oko 90 % CO_2 nastalog kod proizvodnje plavog vodika ne emitira u atmosferu. To su uglavnom najjači aduti koje koristi naftna industrija kako bi nastavila svoje poslovanje i eventualno povukla subvencije koje prate strategije vodika.

„Zeleni“ vodik za razliku od prethodno spomenutih u svom proizvodnom procesu koristi elektrolizu. Elektrolizom se voda razdvaja na vodik i kisik uz posredovanje električne energije. Proces se zbiva u elektrolizatoru (engl. *Electrolyser*) – uređaju za elektrolizu, a za proizvodnju 1 kg „zelenog“ vodika potrebno je oko 9 kg vode te 30 do 50 kWh električne energije. Da ovaj postupak bude ekološki prihvatljiv, neophodno je koristiti električnu energiju iz obnovljivih izvora poput: solarne energije, energije vjetra, vode i geotermalne energije (korištenje zemljine topline). Elektrolizatori se dijele prema mediju koji se u njemu koristi, na: alkalne, PEM (engl. *Polymer Electrolyte Membrane*), parne (visokotemperaturne) i ostale. Ova reakcija obrnuta je od one koja nastaje u gorivim člancima. Također je potrebno sagledati i činjenicu da se puno više energije mora utrošiti u odnosu na dobiveni potencijal, jer 1 kg vodika ima potencijal stvaranja oko 33 kWh električne energije u gorivom članku. S obzirom na trenutne cijene i potražnju električne energije, proizvodnji „zelenog“ vodika iz obnovljivih izvora treba pristupiti strateški i geografski. Ekonomično je „suvišak“ solarne energije umjesto u mrežu usmjeriti na instalirane elektrolizatore kako bi se proizvodio vodik, koji tijekom noći može biti gorivo za proizvodnju električne energije ili za druge namjene. Sve navedeno stavlja „zeleni“ vodik u ekološki prihvatljiv oblik energije.

Prema EU strategiji za vodik, cijena „sivog“ vodika je oko 1,5 eura po kilogramu ne uzimajući u obzir cijenu otpuštenog CO_2 u atmosferu

koji tvrtke moraju plaćati zbog sustava trgovanja emisijama. Kod proizvodnje „plavog“ vodika hvata se otpušteni CO₂, čime se podiže cijena na oko 2 EUR po kilogramu. Cijena proizvodnje „zelenog“ vodika trenutno je zbog visokih cijena električne energije i elektrolizatora oko 2,5 – 5,5 eura po kilogramu.

Prema podacima Europske komisije, od vodika se trenutno dobiva oko 2 % energije u EU-u, od čega se 95 % proizvodi iz fosilnih goriva, što oslobađa 70-100 milijuna tona CO₂ godišnje. Osim navedenih, industrija je imenovala još nekoliko vrsta vodika od kojih „smeđi“ ili „crni“ nastaje rasplinjavanjem ugljena, potom „ružičasti“ dobiven elektrolizom energije iz nuklearke, „tirkizni“ dobiven pirolizom metana i dr.

VODIK U SEKTORU PROMETA

Gorive ćelije s vodikom kao gorivom korištene su krajem 1960-ih godina u svemirskom programu Apollo, američke agencije NASA, što je rezultiralo i istraživanjima primjene gorivih ćelija u kopnenom, zračnom i vodenom prijevozu. Prvo komercijalno proizvedeno osobno vozilo na vodikove gorive ćelije je bio Hyundai Tucson FCEV (skraćeno engl. *Fuel Cell Electric Vehicle*), koji je izašao na tržište 2013. godine. Kod ove vrste vozila električna energija nije uskladištena u akumulatoru, nego se proizvodi u gorivim ćelijama. Najveći izazov je skladištenje vodika, a rješenje su spremnici za komprimirani vodik, koji su pod visokim tlakom. Kod osobnih vozila bitan je i položaj spremnika zbog sigurnosti u slučaju sudara, ali i zbog mogućeg smanjenja volumena u samom vozilu. Ukapljeni vodik je najlakša tekućina. Prema tehničkim podacima oko 14 litara ukapljenog vodika je ekvivalent 1 kg vodika s kojim osobno vozilo može prijeći oko 100 km. Naravno da ovi podaci ovise o jačini elektromotora, tlaku u spremniku te uvjetima i načinu vožnje. Prema dostupnim američkim podacima, 1 litra vodika ima ekvivalent 1 galona (3,8 litara) benzina.

Zbog cijene, tehničkih ograničenja i aspekta sigurnosti u EU je do kraja 2022. godine registrirano manje od 3.500 osobnih vozila koji koriste vodikove gorive ćelije te oko 400 teretnih vozila

i nešto preko 200 autobusa (Izvor: <https://www.fchobservatory.eu/>). Prema podacima Centra za vozila Hrvatske (CVH) krajem 2022. godine u RH bilo je registrirano 1.836.016 osobnih automobila. Najveći udio je s motorom na unutarnje izgaranje, od čega je njih 1.027.379 (55,96 %) pokretano dizelom, na benzin 716.031 (39,00 %), na benzin i plin 60.349 (3,28 %), na hibridni pogon njih 27.057 (1,47 %), električnih vozila 4.929 (0,27 %) i niti jedno vozilo na vodikove gorive ćelije (0,00 %); (Izvor: <https://cvh.hr/gradani/tehnicki-pregled/statistika/>).

Gorive ćelije se, također, razvijaju i testiraju u kamionima, autobusima, viličarima, motociklima i biciklima te ostalim vrstama vozila. Promišljanja idu i u smjeru željeznice, poglavito na dijelu neelektrificiranih pruga, kojih u RH ima još puno, no tu se dodatno mora u obzir uzeti rentabilnost određenih linija. S razvojem tehnologije očekuje se i primjena vodika u pomorskom i zračnom prometu.

Za razliku od punjenja električnih vozila na punionicama, sam postupak punjenja ukapljenim vodikom vremenski je puno kraći postupak, no on ima i svojih sigurnosnih poteškoća zbog visokog tlaka i niske temperature. Stoga postoje određena razmišljanja da se ide u smjeru robotizacije postupka punjenja na budućim punionicama, čime se može podići razina sigurnosti i isključiti ljudska pogreška odnosno ozljeđivanje. Tehnički se u strategijama članica EU-a predviđa postavljanje jedne punionice na svakih 200 kilometara prometnica. Trenutno se ukapljeni vodik može točiti samo u većim gradovima EU, dok u RH još ne postoji komercijalni model tj. nema niti jednu punionicu za osobna vozila.

VODIK U INDUSTRIJSKOM SEKTORU

S obzirom da sadašnja većina svih grana industrijske proizvodnje koristi uglavnom fosilna goriva, uz obnovljive izvore energije, vodik može imati veliki potencijal. Neke industrije poput rafinerija i petrokemijskih postrojenja već koriste vodik. No, tu se uglavnom radi o „sivom“ vodikom uz sve izraženiji pristup hvatanja emisija CO₂ tj. predlaže se prelazak na opciju „plavog“ vodika. Osnovna zamisao je da se energetske intenzivne

industrije „prebace“ na vodik i na taj način smanji upotreba zemnog plina koji je preuzeo primat primjenom prethodnih strategija. Izazov u nekim industrijama je i postizanje visokih temperatura u tehnološkom procesu pa su određena istraživanja usmjerena na industriju cementa i stakla. To su veliki proizvođači emisija CO₂, a upravo te industrije su prisutne i strateški zastupljene u svakoj EU članici i po cijelom svijetu.

Osim elektrolizatora vodik će se moći koristiti i za proizvodnju električne energije u postrojenjima na osnovi visokotemperaturnih keramičkih gorivih članaka (skraćeno, engl. SOFC - *Solid Oxide Fuel Cells*) i plinskih turbina, zbog daleko veće učinkovitosti takvih sustava. Na taj način se skraćuje put vodika do industrijskih potrošača, jer bi se proizvodnja vodika mogla obavljati na mjestu proizvodnje električne energije s ciljem rasterećenja elektroenergetskog sustava. Dakle, glavni cilj je korištenje uglavnom „zelenog“ vodika.

Sam transport vodika cjevovodima do velikih potrošača iziskuje dodatnu adaptaciju npr. postojećeg plinovoda, zbog propuštanja na ventilima i spojevima, ali i trošenja metala. Trenutno se vodik može pomiješati s prirodnim plinom i transportirati plinovodom, ali na mjestu korištenja je potrebno osigurati tehnologiju odvajanja vodika od zemnog plina, uz postizanje visoke čistoće tako transportiranog vodika. Opcija pohranjivanja vodika u metalima i ostalim materijalima na razini molekula je trenutno tehnički prezahtjevna, ali pokazuje veliki potencijal zbog zauzimanja mnogo manjeg volumena u odnosu na vodik u plinovitom stanju. Predstojeće očekivano investiranje u takve tehnologije može pojednostaviti i ubrzati cijeli proces razvoja efikasnijih rješenja za pohranu vodika.

STRATEGIJA ZA VODIK DO 2050.

U EU strategiji za vodik navedene su jasne smjernice za suradnju s predstavnicima izvršne i zakonodavne vlasti, industrijom, znanstvenim institucijama i civilnim društvom kroz Europski savez za čisti vodik (engl. *Clean Hydrogen Alliance*) koji je zadužen za razvoj programa ulaganja i niz konkretnih projekata s ciljem primjene

vodikove tehnologije. Strategija za integraciju energetske sustava opisuje kako će trenutni okviri EU politika pridonijeti ostvarenju klimatski neutralnog integriranog energetskog sustava s visokim udjelom obnovljivih izvora energije (OIE). Na tragu navedenog RH je donijela Strategiju za vodik do 2050. (u daljnjem tekstu: Strategija, N.N., br. 40/22.), a ista je usklađena sa svim prethodno donesenim strategijama iz područja razvoja gospodarstva, energetike prometa i dr.

U Strategiji se navodi da se u RH danas vodik uglavnom proizvodi u sklopu industrijskih postrojenja za potrebe vlastitih proizvodnih procesa, a proizvodi se iz prirodnog plina – „sivi“ vodik. Također se ističe da je u proizvodnji potrebno promovirati usavršavanje proizvodnje vodika elektrolizom vode, kao i niz novih tehnologija za proizvodnju obnovljivog vodika ili iz do sada nekorisćenih OIE (primjerice valovi) ili potpuno novim tehnologijama (primjerice pirokizacija otpada, uplinjavanje, fotoelektrokemijsko rastavljanje vode na vodik i kisik i drugo). Pohrana (skladištenje) vodika na samom početku razvoja gospodarstva zasnovanog na vodikom može biti u plinovitom obliku. Transport vodika može se obavljati u prikolicama sa spremnicima za vodik u plinovitom ili tekućem stanju koristeći cestovni, željeznički, pomorski i riječni promet. U slučajevima gdje je potrebno osigurati veće količine vodika i neprekidnu dobavu kao što je to slučaj kod industrijskih procesa, važno je osigurati odgovarajuću infrastrukturu cjevovodima (odnosno vodikovodima) od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje vodika. Izgradnja izravnog vodikovoda je tehnički izvediva, a do 2025. godine očekuje se i donošenje zakonodavnog okvira za transport i pohranu (skladištenja) vodika. Namjera je i utvrditi je li moguća pohrana (skladištenje) vodika u velikim količinama u postojeće podzemno skladište plina »PSP Okoli«, kao i u podzemno skladište plina »PSP Grubišno Polje« koje je u izgradnji. U sklopu istraživačkih aktivnosti i jačanja primijenjenih istraživanja povezanih s vodikom, potrebno je u RH razmotriti osnivanje Regionalnog centra za vodik.

Strategijom su postavljeni strateški ciljevi koji direktno pridonose dekarbonizaciji gospodarstva i dekarbonizaciji Europe u skladu s europskim zelenim planom i nacionalnim ciljevima koji

pokazuju potencijal i smjer kojim će se razvijati uspostava i funkcioniranje gospodarstva zasnovanog na vodik u RH. Strateški ciljevi povezani su sa zajedničkom EU politikom kojoj direktno pridonosi i RH, a kojima će se osigurati postizanje glavnog cilja klimatske neutralnosti EU-a do 2050. godine. Sama provedba strategije trebala bi ići kroz tri faze s obzirom na određene ciljeve i to u kratkoročnom razdoblju do 2026. godine, srednjoročnom od 2027. do 2030. godine i dugoročnom razdoblju od 2031. do 2050. godine

Strategijom su prepoznati sljedeći strateški ciljevi RH:

1. Povećanje proizvodnje obnovljivog vodika;
2. Povećanje iskorištavanja potencijala OIE za proizvodnju obnovljivog vodika;
3. Povećanje korištenja vodika;
4. Poticanje razvoja znanosti, istraživanja i razvoja vodikovih tehnologija.

Gledano kroz brojke, od trenutne nule u 2022. do 2030. / **2050.** godine trebalo bi povećati kapacitete elektrolizatora na 70 / **2.750** MW, udio vodika u ukupnoj potrošnji energije na 0,2 / **11** %, a broj punionica za vodik na 15 / **100**, a do 2050. očekuje se i da će RH imati 50 patentata povezanih s gospodarstvom temeljenom na vodik u. Cijela strategija je zbog sveg navedenog dosta ambiciozna i bez kompletnih rješenja, a vrijeme će pokazati jesmo li si previsoko postavili ljestvicu?

Poseban oblik međunarodne suradnje povezan je s potencijalnom uspostavom dolina vodika (engl. *Hydrogen Valleys*). Radi se o svjetskoj inicijativi te je trenutno na pet kontinenata uspostavljeno 36 dolina vodika. To su regionalni sustavi smješteni unutar više država, koji povezuju proizvodnju vodika, transport i različite krajnje uporabe (poput mobilnosti ili industrijske sirovine) te su važni za uspostavu i jačanje gospodarstva zasnovanog na vodik u. Doline vodika već funkcioniraju u razvijenijim članica EU-a poput: Nizozemske, Španjolske i Njemačke. RH je uključena u projekt »Dolina vodika Sjeverni Jadrani« zajedno s Republikom Slovenijom i Autonomnom regijom Friuli, Venezia Giulia iz sjeverne Italije. EU strategija za vodik procjenjuje

iznos ukupnih ulaganja u proizvodne kapacitete do 2050. godine, na području EU-a, u rasponu od 180 do 470 milijardi EUR. Od tog novca RH bi za ostvarivanje ciljeva Strategije trebala osigurati oko 12,5 milijardi EUR.

ZAKLJUČAK

Kao i kod svih dosadašnjih strategija koje je RH morala donijeti kao članica EU-a, sve to slično na svojevrsni „copy-paste“, prilagođeno hrvatskim prilikama. Ključno je reći da se u RH trenutno dobiva nešto „sivog“ vodika i to u industrijskom sektoru, dok realne potrebe u „dekarbonizacijski“ najzahtjevnijem sektoru prijevoza trenutno uopće ne postoje. Stoga je iluzorno razmišljati da će se u narednih nekoliko godina dogoditi nekakav značajniji progres. Svaki napredak u načelu će ovisiti o EU sredstvima koje će RH morati uspjati povući kroz razne projekte, no za tu priču trebamo tek osposobiti dovoljan broj stručnjaka. Ti „novi“ ljudi će s vremenom morati razvijati nove patente, širiti znanje i graditi potrebnu infrastrukturu. Ako tu ne iskoristimo svoju šansu, strane tvrtke će najvjerojatnije investirati u infrastrukturu i koristiti vlastitu tehnologiju, a to će značiti i određenu ovisnost, ali i odljev novca iz RH. Nameće se i pitanje za koga graditi punionice vodika na svakih 200 km, što je propisani EU standard, ako vlastitih vozila uopće nemamo. Ovo malo preostale industrije u RH trebat će značajne financijske poticaje za prelazak na vodik, a energetski sektor bitno će se morati promijeniti kako bi se ostvarili zacrtani ciljevi Strategije za vodik do 2050.

Za pretpostaviti je i da će se morati mijenjati zakonodavni okvir, kojim će se nastojati subencionirati primjena vodika i ostalih oblika energije iz obnovljivih izvora, dok će se primjena fosilnih goriva nastojati destimulirati zbog ostvarenja konačnog cilja dekarbonizacije EU-a do 2050. godine. Stoga je moguće da će se razvijati i nove tehnologije „hvatanja“ CO₂ uz utiskivanje u duboke zemljine strukture, čime će proizvođači fosilnih goriva ostati i dalje u igri. Svakako će uz pojeftinjenje vodika kao goriva trebati doći i do pada cijena osobnih, teretnih i putničkih vozila, jer svi neće moći doći do državnih subvencija za povoljniju kupnju vozila. Svijest ljudi se mijenja

i svi bi radije izabrali „eko“ opciju, no za sada je to opcija samo za pojedince i uglavnom tvrtke, što se vidi i u omjeru električnih i vozila na fosilna goriva u RH.

Može se zaključiti da je budućnost vodika u RH za sada još samo na papiru, a hoće li se vodik kao gorivo prihvatiti i kojom brzinom, teš-

ko je predvidjeti. Uzimajući u obzir mentalitet ljudi s naših prostora, za pretpostaviti je i da će biti određenog otpora prema svemu što je novo. Dakle, vodik kao gorivo će u predstojećim godinama „morati“ postati realnost u RH, ali sigurno puno sporije i s manjim udjelom nego u najrazvijenijim članicama EU.

dr. sc. Branimir Fuk, dipl. ing. rud.