

Mogućnosti korištenja vodika kao goriva

Potentials of hydrogen as a fuel

prof. dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar dipl. ing.
RGNF Sveučilišta u Zagrebu
daria.karasalihovic-sedlar@rgn.hr

Filip Šarčević, magistar inženjer naftnog rudarstva
RGNE, Sveučilišta u Zagrebu
filip.sarcevic97@gmail.com



Ključne riječi: vodik, elektrolizator, gorivni članak

Key words: hydrogen, electrolyzer, fuel cell



Sažetak

Vodik se s razlogom naziva „gorivo budućnosti“ zbog njegovog velikog potencijala u smanjenju emisija stakleničkih plinova. Preduvjet korištenju vodika kao goriva je razvoj tehnologije elektrolizatora i gorivnih članaka. U ovom radu predstavljeno je trenutno stanje u proizvodnji i potrošnji vodika u svijetu. Također, analiziraju se mogućnosti korištenja postojeće infrastrukture za transport i distribuciju fosilnih goriva za integraciju vodika u globalne energetske sustave.



Abstract

Hydrogen is symbolically called fuel of the future due to its great potential of greenhouse gas emissions reduction. Fuel cell and electrolyzer research and development is a prerequisite to widespread use of hydrogen as a fuel. Current status in production and demand of hydrogen is presented in this thesis. In addition, possibilities of using existent fossil fuel transportation infrastructure for implementation of hydrogen into global energy systems are also discussed.

1. Uvod

Energetska tranzicija predstavlja transformaciju globalnog energetskeg sektora s energije na bazi fosilnih goriva prema niskougljičnoj energiji. Ključna potreba tranzicije je smanjenje emisija stakleničkih plinova iz energetskeg sektora i sektora transporta kako bi se usporile klimatske promjene. No, iako je globalna tranzicija već u tijeku, potrebni su dodatni koraci kako bi se efekti izazvani klimatskim promjenama ublažili. Mnoge države, kao i neke političke organizacije uvele su zakonodavne okvire i razvojne strategije, kako bi se dodatno potaknula energetska tranzicija. Jedna od takvih strategija koju je Europska komisija predstavila 2019. godine je i Europski zeleni plan (*engl. European Green Deal*), okvirni plan koji sadrži mjere za unaprjeđenje učinkovitijeg iskorištavanja resursa prelaskom na čisto „kružno“ gospodarstvo te za zaustavljanje klimatskih promjena i smanjenje onečišćenja. Osim toga, Odbor za okoliš, javno zdravstvo i sigurnost hrane Europskog parlamenta u rujnu 2020. godine usvojilo je izvješće u kojem se zahtjeva povećanje cilja smanjenja emisija stakleničkih plinova s dosadašnjih 50 do 55% na 60% do 2030. godine u odnosu na 1990. godinu (European Parliament, 2020). Ovaj zahtjevniji cilj bi mogao implicirati ozbiljniju namjeru dekarbonizacije teškog transporta i učinkovito zbrinjavanje viška proizvodnje iz nestalnih obnovljivih izvora energije.

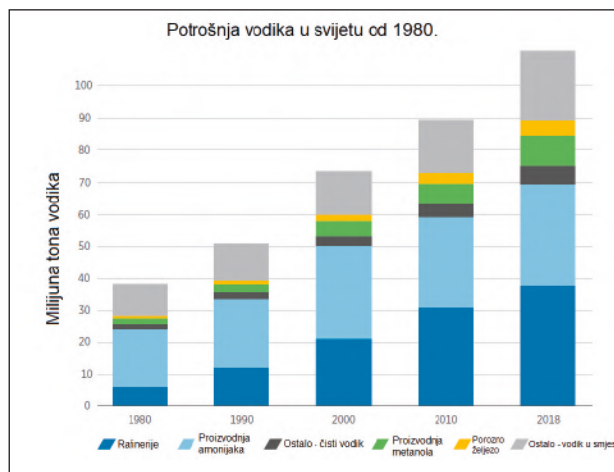
Vodik je najlakši element u periodnom sustavu elemenata i najprisutniji kemijski element u svemiru

(Royal Society of Chemistry, 2020). U znanstvenim i političkim krugovima naziva se gorivom budućnosti zbog činjenice da korištenjem u gorivnom članku proizvodi jedino vodu kao produkt reakcije, uz oslobađanje energije. U svijetu se velika većina vodika proizvodi parnim reformiranjem, parcijalnom oksidacijom te autotermalnim reformiranjem prirodnog plina te različitim postupcima rasplinjavanja ugljena, dok se samo manji dio proizvodi plinifikacijom biomase i elektrolizom vode (U.S. Department of Energy, 2020a). Jedan od potencijalnih pokretača energetske tranzicije i globalne dekarbonizacije svakako predstavlja zeleni vodik, odnosno vodik proizveden iz obnovljivih izvora energije. Pridobivanje zelenog vodika je danas tehnički izvedivo te se približava ekonomskoj konkurentnosti. Povećan interes za opskrbu zelenim vodikom primarno proizlazi iz snižavanja cijena proizvodnje obnovljivih izvora energije i izazova koji proizlaze iz mrežne integracije sve većeg udjela varijabilne energije iz takvih izvora. Politika i društvena svijest čine veliki poticaj potrebnim promjenama. Ako nacionalne i korporativne strategije usvoje zeleni vodik kao dio strategije za dekarbonizaciju, tada bi mogao imati ubranu primjenu uz spuštanje praga ekonomičnosti. To će omogućiti ulaganje u istraživanje i razvoj, tehnološka poboljšanja te pokretanje pilot projekata. Ono što je također bitno u perspektivi razvoja i primjene zelenog vodika je cijena naknada za emisije ugljikovog dioksida na tržištu.

U ovom radu analizirani su načini proizvodnje vodika u svijetu te trenutno globalno stanje u proizvodnji i potrošnji vodika. Također su analizirane vrste elektrolizatora i gorivnih članaka. Proizvodnja plavog i zelenog vodika prikazani su kroz ekonomski osvrt usporedbom s trenutnim cijenama proizvodnje vodika te njihovim budućim projekcijama. U raspravi je također analizirano dodavanje vodika u postojeću plinovodnu mrežu, potencijal koji ono predstavlja te moguće probleme u implementaciji, zatim mogućnost izdvajanja vodika iz plinovodne mreže te načini skladištenja vodika. Također, ukratko su opisani i načini integracije vodika u energetska mrežu, primarno kroz P2P (*engl. Power-to-power*) sustave, transport te iskorištavanje postojeće infrastrukture za eksploataciju ugljikovodika na primjeru Sjevernog Jadrana.

2. Proizvodnja i potrošnja vodika u svijetu

Danas se proizvodi oko 120 milijuna tona vodika godišnje, od čega dvije trećine čini čisti vodik, a ostalu trećinu čini mješavina s drugim plinovima. Većina



Slika 1. Globalna potražnja za vodikom od 1980. godine (IRENA, 2019)

vodika se proizvodi i koristi u industriji na mjestu proizvodnje. Dvije trećine potrošnje vodika čine proizvodnja amonijaka i primjena u naftnim rafinerijama. Prilikom proizvodnje amonijaka, dušik se spaja s vodikom preko Haber-Bosch procesa (IRENA, 2019). Očekuje se porast potražnje za vodikom u narednim godinama kao rezultat strože zakonske regulative u zaštiti okoliša. Na porast potražnje vodika utjecala je i rafinerijska prerada (slika 1.) u kojoj se sve više iskorištavaju rezidualne sirovine i povećana potražnja dizelskog goriva. Sve značajniji procesi u rafinerijama su hidrodesulfurizacija, u kojoj se odsumporavanjem ulazne sirovine stvara sumporovodik, koji se koristi u Clausovom procesu ili za dobivanje sumporne kiseline, hidroizomerizacija za poboljšanje svojstava proizvedenog goriva (oktanskog broja) te procesi de-aromatizacije i hidrokrekiranja koji također koriste vodik u svojim procesima. Vodik se također intenzivno primjenjuje u industriji željeza i čelika te za hidrogenaciju masti, proizvodnju stakla, pogonsko gorivo i hlađenje generatora (IRENA, 2018).

S obzirom na način proizvodnje vodika, razlikujemo glavne skupine:

- Sivi vodik – vodik nastao proizvodnjom iz fosilnih goriva, odnosno metana procesima kao što su parno reformiranje i parcijalna oksidacija
- Plavi vodik – vodik proizveden najvećim dijelom iz prirodnog plina uz korištenje tehnologije hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida (*engl. carbon capture and storage – CCS*)
- Zeleni vodik – vodik proizveden na održiv način, odnosno korištenjem obnovljivih izvora energije. To se postiže u elektrolizatorima, uređajima koji razdvajaju vodu na vodik i kisik korištenjem električne energije iz obnovljivih izvora.

2.1. Ekonomski parametri proizvodnje plavog i zelenog vodika

Postoje tri ključna parametra za ekonomsku opravdanost proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora (IRENA, 2019):

- kapitalna investicija elektrolizatora,
- cijena obnovljivog izvora energije koji se koristi iskazan kao LCOE (*engl. levelized cost of energy*) te
- broj operativnih sati u jednoj godini (faktor opterećenja).

LCOE vrijednosti se regionalno značajno razlikuju, od cijena na lokalnom tržištu rada do dostupnosti energetskog resursa. Primjerice, LCOE za vjetroelektrane na kopnu kreće se od 28,72 USD/MWh u regijama s najvećom kvalitetom vjetra kao resursa do 62,72 USD/MWh u regijama s slabom kvalitetom resursa i visokim kapitalnim troškovima izgradnje (EIA, 2020). Obzirom da će se vjetroelektrane vrlo vjerojatno izgraditi na mjestima koje nude niske troškove i visoke vrijednosti, ponderirana aritmetička sredina je bliža donjoj margini troškova i iznosi 34,10 USD/MWh te 30,39 USD/MWh za fotonaponske ćelije za postrojenja koja s radom kreću 2025. godine (EIA, 2020).

Povećanjem radnih sati elektrolizatora u jednoj godini, odnosno faktora opterećenja, smanjuje se cijena proizvodnje jedinice vodika. Općenito bi s današnjim cijenama investicija faktor opterećenja trebao prelaziti 50%, no gotovo optimalni rezultati postižu se već i iznad 35% (IRENA, 2019). Također, hibridni sustavi (kombinacija solarne i vjetroelektrane) doimaju se kao obećavajuće rješenje te im faktor opterećenja može i značajno prelaziti 50% na mjestima kao što su pustinja Atacama u Čileu gdje su oba energetska

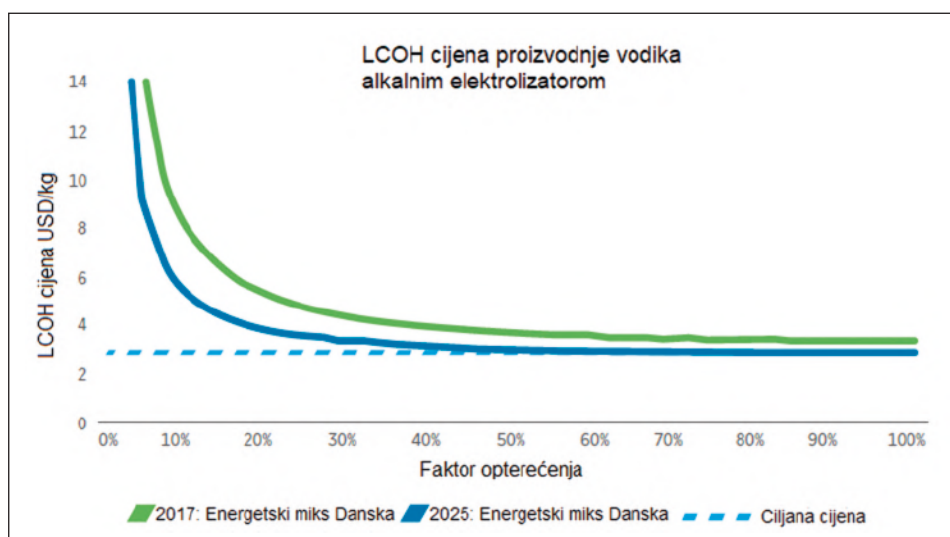
resursa naizmjenično dostupna. Na slici 2. prikazana je ovisnost cijene proizvodnje vodika u Danskoj (*engl. levelized cost of hydrogen – LCOH*) u alkalnom elektrolizatoru spojenom na električni mrežni sustav, o faktoru opterećenja. Cijene su iskazane obzirom na energetski miks za proizvodnju električne energije iz 2017. godine (zeleno) i predviđene cijene 2025. godine (plavo). Isprekidana linija predstavlja ciljanu cijenu proizvodnje. Danska je 2017. godine zadovoljila gotovo polovicu svojih potreba za električnom energijom iz vjetroelektrana, a do 2027. godine planirano je zadovoljiti iznad 90% (Energinet DK, 2018).

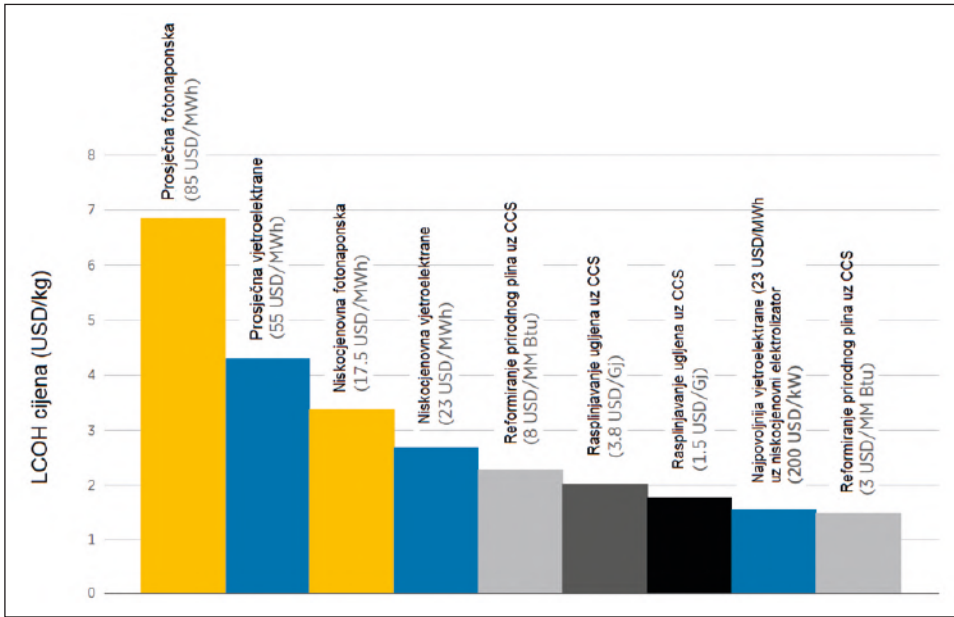
Cijena proizvodnje vodika s fosilnim gorivima kao izvorom uz primjenu CCS tehnologije kreće se između 1,25 dolara do 2,50 dolara po kilogramu proizvedenog vodika, pri čemu se u obzir uzima cijena ulaznog goriva od 1,90 do 5,70 USD/GJ (IRENA, 2019). Kako bi proizvodnja zelenog vodika bila konkurentna na tržištu, cijena proizvodnje bi morala biti niža od 2,50 dolara po kilogramu vodika, no ova brojka također ovisi je li proizvodnja centralizirana ili decentralizirana, tržišnom segmentu i ostalim faktorima (IRENA, 2019).

Na slici 3. prikazana je usporedba cijene proizvodnje vodika ovisno o obliku proizvodnje i vrsti korištenog goriva. Za prva četiri stupca pretpostavljena je cijena kapitalne investicije elektrolizatora od 840 USD po kilovatu instalirane snage, uz učinkovitost od 65%. Faktor opterećenja generaliziran je na 48% za vjetroelektrane te 26% za fotonaponske ćelije (IRENA, 2019).

Slika 3. pokazuje da bi proizvodnja vodika iz obnovljivih izvora energije bila tržišno kompetentna s konvencionalnom proizvodnjom iz fosilnih goriva,

Slika 2. Ovisnost cijene proizvodnje vodika u alkalnom elektrolizatoru o faktoru opterećenja (IRENA, 2019)





Slika 3. Usporedba cijene proizvodnje vodika ovisno o obliku proizvodnje i vrsti korištenog goriva (IRENA, 2019)

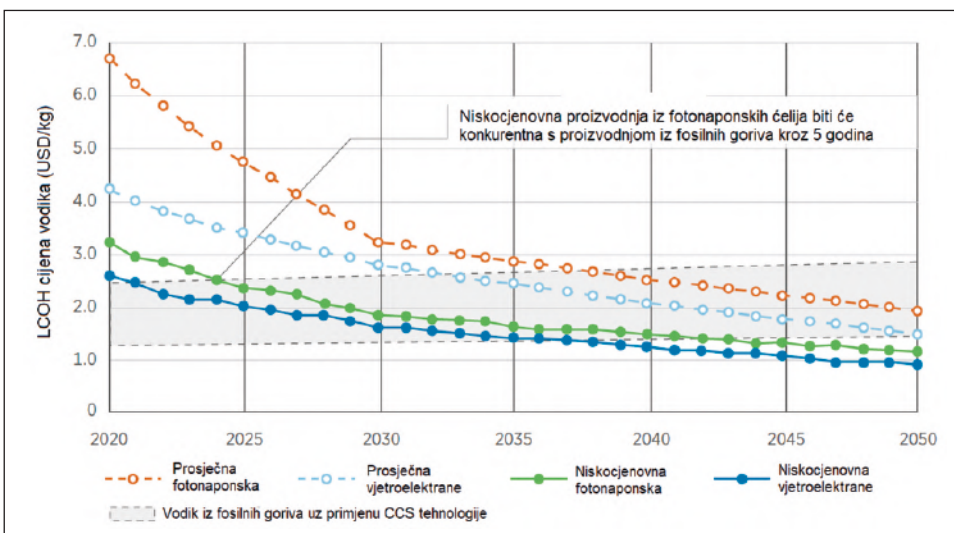
ali u vrlo ograničenim okviru. Takva mogućnost podrazumijeva cijenu proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana od 23 USD/MWh, što je najbolji zabilježeni slučaj u projektima u Brazilu i Saudijskoj Arabiji. Također, pri tome je u obzir uzeta vrlo niska cijena elektrolizatora od 200 USD po instaliranom kilovatu snage, što se procjenjuje da će biti moguće tek 2040. godine (IRENA, 2019).

Slika 4. predstavlja predviđeno kretanje cijena proizvodnje vodika. Pretpostavlja se da će do 2050. godine ukupna instalirana snaga elektrolizatora u svijetu biti oko 1700 GW. Uz taj razvoj te uz dosadašnji tijek razvoja usmjeren na smanjenje cijena, cijena elektrolizatora trebala bi se spustiti na 375 USD po instaliranom kilovatu, u odnosu na današnjih 840 USD/kW (IRENA, 2019). Na grafu je pretpostavljeno linearno smanjenje cijena elektrolizatora, u navedenim

okvirima, do 2050. godine. Također, pretpostavljeno je i poskupljenje cijena naknada za emisije CO₂ na 200 USD/t do 2050. godine. Cijena proizvodnje obnovljivih izvora energije preuzeta je iz tablice 3-2. Uz takav razvoj događaja, do 2040. godine svi oblici proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora energije trebali bi dostići cjenovnu kompetentnost s proizvodnjom vodika iz fosilnih goriva (IRENA, 2019).

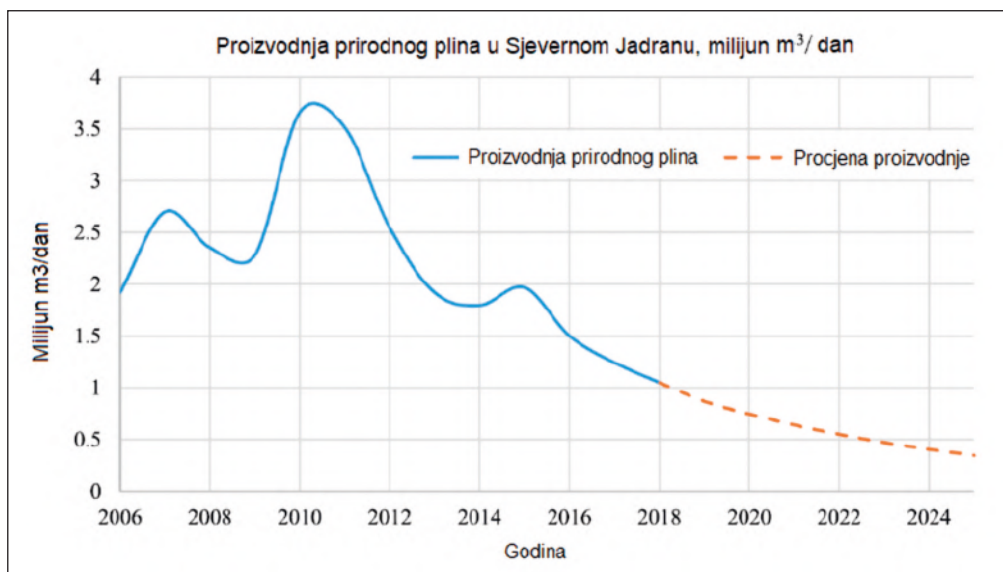
2.2. Mogućnost proizvodnje zelenog vodika korištenjem postojeće plinske infrastrukture u sjevernom Jadranu

Prestankom eksploatacije ugljikovodika na odobalnim postrojenjima, potrebno je započeti proces dekomisije postojeće infrastrukture. Uklanjanje te infrastrukture može biti ekonomski i tehnički zahtjevno, energetski intenzivno te opasno po okoliš i morska



Slika 4. Predviđeno kretanje cijena proizvodnje vodika (IRENA, 2019)

Slika 5. Predviđanje proizvodnje prirodnog plina iz eksploatacijskih polja u sjevernom Jadranu (Klabučar et al., 2019)



staništa. Jedna od mogućnosti je prenamjena takve infrastrukture u odobalne vjetroelektrane i postavljanje infrastrukture za kemijsku konverziju električne energije. Ako se ekonomski dvojbjeni projekti proizvodnje „plave energije“ promatraju kroz aspekt izbjegavanja troškova dekomisije postrojenja, takvi projekti mogu postati komercijalno isplativi (Klabučar et al., 2019).

Proizvodnja prirodnog plina u Jadranu započela je 1998. godine te se eksploatacija trenutno odvija na tri eksploatacijska polja iz 51 bušotine spojene na 19 proizvodnih platformi te jednu kompresorsku platformu. Proizvodnja je dosegla svoj vrhunac 2010. godine s $1,3 \times 10^9$ m³/god, dok su najveće rezerve (1P) od $13,21 \times 10^9$ m³ zabilježene 2007. godine (Klabučar et al., 2019). Od tada, rezerve i proizvodnja prirodnog plina (slika 5.) su u značajnom padu zbog pada ležišnog tlaka, porastu udjela vode u ležištu i općenitoj iscrpljenosti plinskih rezervi. Ukoliko u bližoj budućnosti ne dođe do značajnog otkrića novih rezervi, vrlo brzo se može očekivati dosezanje granice ekonomske isplativosti eksploatacije (Klabučar et al., 2019).

Proračunima koji su izrađeni od strane kompanija INAgip i Edina izračunato je da bi ukupan trošak dekomisije i uklanjanja svih 20 platformi iz sjevernog Jadrana iznosilo 93,5 milijuna eura, pri čemu se najveći dio (25 milijuna eura) odnosi na trošak uklanjanja pet proizvodnih platformi i jedne kompresorske platforme s polja „Ivana“ (Zelenko, 2020). Sam proces od prestanka proizvodnje do čišćenja i pregleda terena trajao bi oko 6 godina. Također, proces dekomisije tijekom izvođenja može predstavljati veliki ekološki rizik, osobito u slučaju akcidenta (Karasalihović Sedlar et al., 2019). Iz tog razloga, analizirano je nekoliko opcija prenamjene postojeće infrastrukture nakon

kraja ekonomske opravdanosti eksploatacije ugljikovodika na tom području. Neke od opcija za realizaciju proizvodnje „plave“ energije su:

- proizvodnja električne energije i transmisija visokonaponskom elektroenergetskom mrežom na kopno,
- proizvodnja električne energije za korištenje u procesu elektrolize,
- proizvodnja električne energije za korištenje u procesu metanacije,
- proizvodnja biogoriva pomoću algi te
- stvaranje umjetnih grebena za uzgoj riba i školjki (Karasalihović Sedlar et al., 2019).

Provedena je analiza i izračun proizvodnje električne energije iz vjetroelektrane instalirane snage 5 MW na temelju prosječnih dnevnih i mjesečnih brzina vjetra s plinske proizvodne platforme *Annamaria A*. Izračunom je utvrđeno da bi prosječna godišnja proizvodnja električne energije iznosila 4362 MWh_e, što se može konvertirati u energiju vodika pri donjoj ogrjevnoj vrijednosti (119.96 MJ/kg) u iznosu od 2835 MWh_e, odnosno oko 85 tona vodika godišnje, uz pretpostavljenu učinkovitost PEM elektrolizatora od 65% (Klabučar et al., 2019). Transformacijom svog proizvedenog vodika u električnu energiju primjenom tehnologije gorivnih članaka moguće je proizvesti 1701 MWh_e, uz pretpostavku učinkovitosti gorivnog članka od 60%, odnosno ukupnu učinkovitost P2G2P sustava od 39% (Klabučar et al., 2019). Tablica 1. prikazuje trenutnu i predviđenu proizvodnju prirodnog plina, proizvodnju električne energije iz proizvedenog plina uz učinkovitost postrojenja od 60% te broj potrebnih vjetroturbin instalirane snage 5 MW.

Tablica 1. Usporedba zamjenjivosti proizvodnje prirodnog plina i obnovljivih izvora energije u sjevernom Jadranu (Klabučar et al., 2019)

	2018	2020	2022	2024	2026
Proizvodnja prirodnog plina ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	383,1	272,4	200,8	148,0	109,1
Proizvodnja električne energije iz prirodnog plina ($\times 10^6 \text{ MWh}$) uz $\eta=60\%$	2,094	1,489	1,098	0,809	0,596
Broj vjetroelektrana (5 MW) potrebnih za istu količinu proizvedene energije	480	341	252	185	137

Iz prikazanog se može zaključiti kako proizvodnja „plave“ energije u bliskoj budućnosti ne može parirati proizvodnji energije iz ugljikovodika. Naime, trenutno je potrebno nekoliko stotina vjetroelektrana kako bi proizvodnja iz obnovljivih izvora bila ekvivalentna proizvodnji energije iz fosilnih goriva. Ta činjenica potencijalno može odvratiti kompanije da odgode odluku o dekomisiji odobalnih konstrukcija (Klabučar et al., 2019). Također, analiza je pokazala da je najadekvatnija prenamjena proizvodne infrastrukture na sjevernom Jadranu proizvodnja električne energije iz odobalnih vjetroelektrana kada obnovljivi izvori energije ne predstavljaju značajan udio u proizvodnji električne energije. Međutim, kada obnovljivi izvori energije dosegnu značajan porast tog udjela, najadekvatnija opcija bi u tom slučaju bila proizvodnja električne struje i proizvodnja vodika kako bi se eliminirala potreba za odbacivanjem dijela proizvedene energije zbog ograničenog kapaciteta elektroenergetskog sustava (Klabučar et al., 2019).

3. Elektrolizatori

Elektrolizatori su jedinice u kojima se odvija proces elektrolize vode. Kada izvor električne energije za proces dolazi iz obnovljivog izvora energije, vodik proizveden u elektrolizatorima nema ugljični otisak (<https://covertelpower.com.au>, 2016). Trenutno su u primjeni ili razvoju tri oblika elektrolizatora. To su alkalni, PEM i SOEC elektrolizatori.

Alkalni elektrolizatori predstavljaju zrelu tehnologiju koja je u kemijskoj industriji u upotrebi još od 1920-ih godina, primjerice u proizvodnji klor. Kao elektrolit koristi se otopina kalijeveg hidroksida, odnosno natrijeveg hidroksida u vodi. Alkalni elektrolizatori postižu najvišu iskoristivost pri temperaturama između $60 \text{ }^\circ\text{C}$ i $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Konvencionalni alkalni elektrolizatori rade na naponima između 1,8 V i 2,2 A te imaju gustoću električne struje ispod $0,4 \text{ A/cm}^2$ (Vedrina, 2014). Napredni alkalni elektrolizatori imaju nešto niži radni napon te gustoću električne struje

i do 2 A/cm^2 . Raspon proizvodnje vodika iz takvih jedinica je vrlo širok obzirom na primjenu, a doseže i do $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (Vedrina, 2014).

PEM elektrolizator, odnosno elektrolizator s protonski propusnom membranom (*engl. Proton Exchange Membrane*) je brzo rastuća tehnologija te u novije vrijeme ulazi u komercijalnu primjenu. PEM elektrolizatori imaju određene prednosti kao što su kompaktni dizajn, visoka gustoća struje (preko 2 A/cm^2), visoka učinkovitost, brzi odaziv, nizak ugljični otisak, rad na niskim temperaturama ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ do $80 \text{ }^\circ\text{C}$) te visoko čisti vodik kao proizvod (Kumar i Himabindu, 2019). Održavanje PEM elektrolizatora je također vrlo jednostavno. Ono što ih čini skupljima od alkalnih elektrolizatora su plemeniti metali; platina u katodi te iridij i rubidij u anodi (IRENA, 2018).

Elektrolizatori s protonski propusnom membranom imaju veću fleksibilnost i brži odaziv nego trenutna alkalna tehnologija. To im omogućuje značajnu prednost zbog mogućnosti iskorištavanja potencijala proizvodnje vodika iz nestalnih obnovljivih izvora energije. Također, PEM elektrolizatori proizvode vodik na većem tlaku od alkalnih elektrolizatora, čime se smanjuje potreba kompresije u transportnom sustavu te tako opravdavaju veću cijenu u slučaju kada se proizvedeni vodik transportira cjevovodom (IRENA, 2018).

Elektrolizator s krutim oksidom (*engl. Solid Oxide Electrolysis Cell – SOEC*) radi na vrlo visokim temperaturama ($700 \text{ }^\circ\text{C}$ do $1000 \text{ }^\circ\text{C}$) zbog čega imaju visoku efikasnost. Visokotemperaturna elektroliza je ekonomičnija od niskotemperaturne zbog toga što je proces elektrolize učinkovitiji s porastom temperature. Ključna odlika SOEC elektrolizatora je životni vijek sustava. 2017. godine najmoderniji sustavi imali su životni vijek od 10 000 radnih sati, dok se razvojne projekcije za 2020. godinu kreću između 40 000 i 50 000 radnih sati (VTT Technical Research Centre of Finland, 2018). SOEC elektrolizatori bi trebali imati veću učinkovitost od PEM i alkalnih elektrolizatora. Međutim, SOEC je najnovija tehnologija, bez

komercijalne primjene, osim probne u laboratorijima i manjim demonstracijskim razinama. Njihov kapitalni trošak je za sada veći, no njihova proizvodnja zahtijeva pretežno keramiku i, u manjim količinama, rijetke metale u membrani, odnosno relativno jeftine materijale, osobito u usporedbi s PEM elektrolizatorima. No, oni zahtijevaju visoku radnu temperaturu, za čiju se dobavu iz čistog izvora za sada jedino razmatraju geotermalna i koncentrirajuća solarna energija (IRENA, 2018).

4. Gorivni članci

Gorivni članak je elektrokemijski uređaj koji pomoću reaktanta, odnosno vodika i kisika, na elektrodama konvertira kemijsku energiju goriva u električnu energiju i toplinu (Sundén, 2019). Iako u samom procesu nema izgaranja, vodik se naziva gorivom, no ono oksidira elektrokemijski. Tijekom oksidacije, atomi vodika reagiraju s atomima kisika i tvore vodu. U tom procesu se otpuštaju elektroni koji prolaze kroz vanjski strujni krug kao električna struja. Ovaj proces je obrnut od onog koji se odvija u elektrolizatoru. Svi gorivni članci se temelje na dvije elektrode između kojih se nalazi čvrsti ili tekući elektrolit koji prenosi električno nabijene čestice između njih. Često se koristi i katalizator kako bi se ubrzala reakcija na elektrodama. Vrste gorivnih članaka najčešće se razlikuju po vrsti elektrolita koji se u njima koristi (Hydrogen Europe, 2017). Glavne vrste gorivnih članaka su:

- gorivni članak s krutim oksidom,
- gorivni članak s protonski propusnom membranom,
- alkalni gorivni članak,
- metanolski gorivni članak, te
- gorivni članak s fosforom kiselinom.

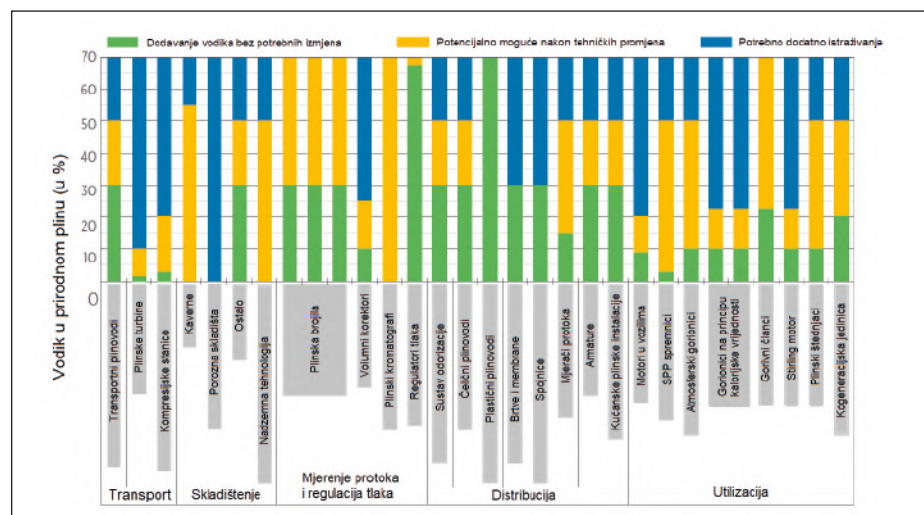
5. Dodavanje vodika u prirodni plin

Miješanje vodika s prirodnim plinom može značajno doprinijeti globalnom smanjenju emisija stakleničkih plinova ako se vodik proizvodi korištenjem niskonagličnih izvora energije kao što su solarna energija, energija vjetra, energija biomase itd. Pozitivni učinci koji proizlaze iz dodavanja zelenog vodika u mrežu prirodnog plina su (Melaina et al., 2013):

- značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova ako se vodik proizvodi iz obnovljivih izvora energije
- vodik u automobilske industriji – potencijalni pozitivni učinci iz smanjenja potrošnje fosilnih goriva i poboljšanja kvalitete zraka smanjenjem udjela sumpornog oksida, dušikovih oksida i emisija čestica
- korištenje mješavine prirodnog plina i vodika u postojećim uređajima za proizvodnju struje i topline. Ovaj pozitivni učinak sličan je povećanju udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji struje (Melaina et al., 2013).

Optimalne koncentracije umješavanja vodika značajno ovise o karakteristikama postojeće plinske mreže, sastavu prirodnog plina i načinu krajnje primjene (IRENA, 2018). Većina postojećih studija pokazuje da miješanje vodika s prirodnim plinom u koncentracijama do 10-20% ne zahtijeva velike investicije ili modifikaciju infrastrukture te se može izvesti na siguran način (IRENA, 2018). Najkritičniji tip infrastrukture predstavljaju plinske turbine, podzemna skladišta, kompresorske stanice te spremnici SPP-a (slika 6.). Primjerice, 5%-tna koncentracija vodika u smjesi stlačenog prirodnog plina smanjuje

Slika 6. Potrebe za modifikacijom različitih uređaja obzirom na povećanu koncentraciju vodika u smjesi prirodnog plina (IRENA, 2018)



minimalnu energiju paljenja smjese za 28% te se brzina plamena u atmosferskim uvjetima povećava za 2,5 puta (Yadav i Sircar, 2017). Također, mjerači protoka plina i plinska brojila u kućanstvu u tom slučaju zahtijevaju prilagodbu i modificiranje. Umješavanje koncentracija vodika većih od 20% bi zahtijevalo značajne promjene infrastrukture i krajnjih uređaja. U pojedinim slučajevima, ekonomičniji scenarij bio bi transformacija kompletne infrastrukture i uređaja za rad s čistim vodikom na lokalnoj ili regionalnoj razini (IRENA, 2018).

5.1. Energetski parametri

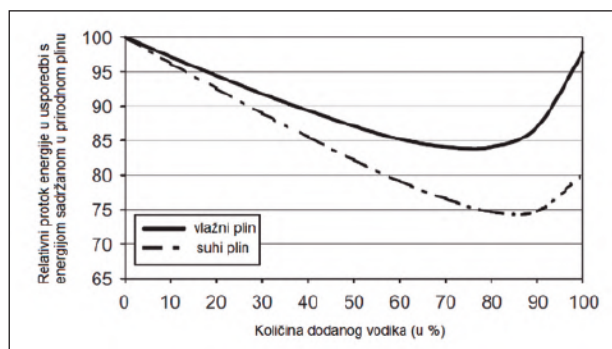
Postojeća plinska mreža sastoji se od magistralnih i distribucijskih plinovoda, kompresorskih stanica, primopredajnih mjerno-redukcijskih stanica i ostale infrastrukture. Svrha plinovoda je prenositi plin, odnosno određenu količinu energije do svakog korisnika.

Gornja ogrjevna vrijednost vodika iznosi oko 12 MJ/m³, dok gornja ogrjevna vrijednost prirodnog plina iznosi oko 39 MJ/m³ (ENTSOG, 2017). Kako bi se zadovoljio jednaki zahtjev za energijom, mora se povećati volumen transportiranog vodika. No, gustoća vodika je devet puta manja od gustoće prirodnog plina. Prema tome, tri puta veći protok vodika od protoka prirodnog plina rezultira otprilike jednakim padom tlaka, što predstavlja najbitniji parametar u plinskoj mreži. Detaljne kalkulacije pokazuju da vodik može prenijeti 98% energije sadržane u suhom prirodnom plinu (>0,13 mol% N₂ ili >0,08 mol% CO₂) te 80% energije u vlažnom prirodnom plinu (Haeseldonckx i D'haeseleer, 2006). Pregled tih kalkulacija prikazan je na slici 7. kao odnos relativnog sadržaja energije obzirom na stopostotni udio prirodnog plina i udjela dodanog vodika, pri jednakom padu tlaka.

5.2. Materijalna ograničenja

Osim razmatranja s energetskog aspekta, važno je razmotriti određena materijalna ograničenja, primjerice korištenje postojećih kompresorskih i mjerno-redukcijskih stanica, propuštanja plinovoda te krtosti plinovoda u prisutnosti vodika.

Zbog Joule-Thomson efekta, smanjenje tlaka prirodnog plina uzrokuje pad temperature od oko 0,5 °C/bar, dok se kod vodika temperatura povećava za 0,035 °C/bar pri padu tlaka. Primjerice, pad tlaka vodika s 80 bar na 15 bar rezultira povećanjem temperature od 2 °C, što neće uzrokovati tehničke poteškoće (Haeseldonckx i D'haeseleer, 2006). Količina gubitaka vodika zbog propuštanja snažno ovisi o vrsti korište-



Slika 7. Odnos relativnog sadržaja energije obzirom na stopostotni udio prirodnog plina i udjela dodanog vodika (Haeseldonckx i D'haeseleer, 2006)

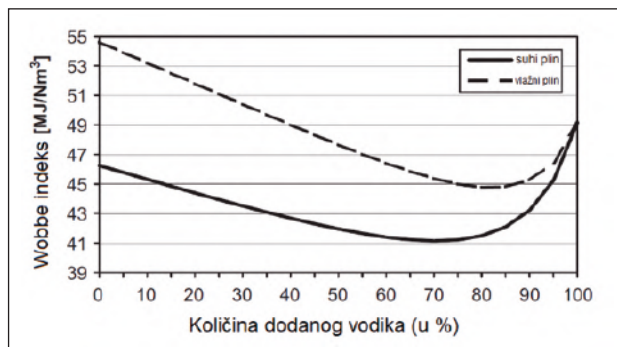
nog plinovoda. Na distribucijskoj razini plinovoda koriste se većinom polietilenske cijevi. Difuzija vodika kroz polietilenske cijevi je pet puta veća od difuzije prirodnog plina, no i dalje zanemariva jer se godišnje ispusti 0,0005 – 0,001% ukupnog volumena transportiranog vodika (Haeseldonckx i D'haeseleer, 2006).

Najvažniji efekt korištenja vodika u plinskim gorionicima je povećanje brzine plamena, što sa sobom nosi rizik povratnog udara plamena (Haeseldonckx i D'haeseleer, 2006). U jednoj studiji (Zhao et al., 2019), napravljena je analiza zamjenjivosti prirodnog plina i mješavine prirodnog plina s vodikom te je analiziran učinak izgaranja (granice povratnog udara plamena, vrijeme paljenja, temperatura izgaranja, emisije itd.). Ustanovljeno je:

- da je granica povratnog udara plamena 25% dodanog vodika u prirodni plin,
- da se dodavanjem 10% vodika temperatura plamena povećava za 63%, što povećava rizik od degradacije materijala plamenika te povećani rizik od povratnog udara plamena te
- da dodavanje vodika ne uzrokuje primjetne promjene emisija dušikovih spojeva, dok se značajno smanjuju emisije ugljikovog monoksida (Zhao et al., 2019).

5.3. Utjecaj dodavanja vodika na Wobbe indeks

Također je potrebno razmotriti utjecaj dodavanja vodika u prirodni plin na Wobbe indeks. Wobbe indeks predstavlja indikator zamjenjivosti plinova temeljem njihovih fizikalnih parametara. Prema Wobbe indeksu se može zaključiti hoće li uređaj kod kojeg prirodni plin izgara kontinuirano u plinskim gorionicima (plinski kotlovi, plinske turbine, plinska kuhala itd.) pouzdano raditi na alternativnom gorivu bez modifikacija.



Slika 8. Ovisnost Wobbe indeksa o miješanju vodika i prirodnog plina (Haeseldonckx i D'haeseleer, 2006)

Ovisnost Wobbe indeksa o miješanju vodika i prirodnog plina prikazan je na slici 8. obzirom na suhi i vlažni plin. Za plinske gorionike na kojima se spaljuje mokri plin, granice u kojima se Wobbe indeks obično kreće su između 48 i 58 MJ/m³ (13,33 – 16,11 kWh/m³), dok je za one koji koriste suhi plin između 41 i 47 MJ/m³ (11,39 – 13,05 kWh/m³) (Haeseldonckx i D'haeseleer, 2006). Iz slike 8. može se vidjeti da bi se teoretski u gorionicima na suhi plin moglo dodati i do 98% volumnog udjela vodika te 45% u gorionike na vlažni plin. No, puni raspon navedenog dodavanja vodika se ne bi mogao primijeniti jer ograničavajući faktor predstavljaju brtvljenje i detektori plamena (Haeseldonckx i D'haeseleer, 2006).

Smjesa koja sadrži 10% koncentracije vodika i 90% koncentracije metana ima 6,9% manju prosječnu ogrjevnu vrijednost (33,42 MJ/m³) od čistog metana (37,78 MJ/m³), dok je taj postotak kod 20%-tne smjese vodika s metanom oko 13,7% (30,96 MJ/m³). Također, Wobbe indeks smjese koja sadrži 10% koncentracije vodika i 90% koncentracije metana ima 2,45% manju vrijednost nego Wobbe indeks čistog metana, odnosno za 4,81% kod 20%-tne smjese vodika s metanom (ISO, 2016).

5.4. Vodikova krhkost i sigurnost upotrebe plinovoda za dodavanje vodika

Vodikova krhkost je izraz koji opisuje stanje uzrokovano djelovanjem vodika i njegovih spojeva u plinskom stanju, a stvara se kao posljedica difuzije molekula vodika u unutrašnjost materijala i nesavršenosti unutar mikrostruktura materijala koji je podvrgnut plastičnim deformacijama. Vodikova krhkost uzrokuje smanjenje mehaničkih svojstava (tvrdoće, vlačne i tlačne čvrstoće, žilavosti i dr.) i oštećenja (zamora, poroznosti, deformacije, loma) materijala (Pokupčić, 2012).

Rizik povezan s vodikovom krhkosti (*engl. hydrogen embrittlement*) plinovoda je složen za predviđanje.

On ne ovisi samo o materijalu od kojeg je plinovod izrađen, nego i uvjetima u kojima je plinovod radio tijekom prošlosti. Općenito se može navesti da se povećanjem fluktuacija tlakova u plinovodu tijekom njegovog radnog vijeka povećava i rizik od vodikove krhkosti i zamora materijala. Prema tome, jedino detaljno ispitivanje cjevovoda, vrste i kvalitete materijala od kojih su izrađeni i radnih uvjeta te analiziranje na pojedinačnoj razini može dovesti do definitivnog odgovora na ovaj potencijalni problem (Haeseldonckx, D'haeseleer, 2006).

Dodatan problem koji može uzrokovati poteškoće je povezan s propuštanjem vodika kroz stijenske plinovoda. Propusnost vodika je oko 4 do 5 puta veća nego za metan u tipičnim polimernim cijevima plinskog distribucijskog sustava (Panfilov, 2016). Propuštanje u čeličnim sustavima plinovoda najčešće se događa u navojima i spojnicama cijevi te je propusnost za vodik veća za oko 3 puta od prirodnog plina. Prema autorima (Melaina et al., 2013), za 20%-tnu koncentraciju vodika u prirodnom plinu duž dionice od 670 km polietilenskih cijevi u SAD-u, gubitak plina iznosio bi oko 13 milijuna m³/god, od čega je 60% vodik, a 40% prirodni plin. Taj volumen plina jednak je 0,0002% ukupne potrošnje u SAD-u u 2010. godini (Panfilov, 2016).

6. Skladištenje vodika

Vodik se može skladištiti u podzemnim geološkim formacijama ako se osigura:

- nepropusnost,
- nezagađenost skladištenog vodika bakterijama, organskim i anorganskim materijalom te
- razvoj i mogućnost proširivanja skladišta po prihvatljivoj cijeni (IEA, 2015).

Način podzemnog skladištenja vodika uvelike ovisi o njegovoj konačnoj primjeni. Razlikuje se nekoliko vrsta podzemnih skladišta vodika obzirom na oblik proizvedene energije, način konačne primjene te oblik energetske transformacije (Panfilov, 2016):

6.1. Podzemno skladište čistog vodika

Konačna primjena ove vrste vodika skladištenog u podzemnim skladištima čistog vodika je u gorivnim člancima gdje se vodik pretvara u električnu energiju te se koristi u, primjerice, vozilima. Najprikladnija mjesta skladištenja vodika visoke čistoće su solne kaverne, koje su gotovo potpuno hermetične te imaju vrlo nisku mogućnost onečišćenja skladištenog plina.

Trenutno postoje 4 podzemna skladišta vodika u solnim kavernama, od kojih su 3 u SAD-u (Clemens Dome, Moss Bluff i Spindletop), dok je jedno u UK (Teesside) (Hévin, 2019). Stijenke kaverni soli su stabilne i nepropusne za plin tijekom cijelog radnog vijeka skladišta. Plastična svojstva soli štite kaverne od pojave i širenja pukotina i gubitka nepropusnosti. Volumen kaverni soli najčešće se kreće između 100 000 m³ i 1 000 000 m³ (Panfilov, 2016).

6.2. Podzemno skladište vodika u smjesi plinova

Vodik se može skladištiti u smjesi s metanom, ugljikovim monoksidom i ugljikovim dioksidom. Smjesa vodika i ugljikovog monoksida naziva se sintetski plin (*eng. syngas*), dok se smjesa vodika, ugljikovog monoksida i metana naziva gradski plin. Ova vrsta smjese se proizvodi podzemnim uplinjavanjem ugljena, odnosno utiskivanjem vodene pare temperature od 800°C zajedno s kisikom. Skladišteni plin može se koristiti u posebno namijenjenim plinskim turbinama za proizvodnju električne energije te kao gorivo koje predstavlja alternativu prirodnom plinu u mjestima s ograničenom plinskom infrastrukturom (primjerice Honolulu, Hawaii). Ovaj način skladišta je osim u kavernama soli izvediv i u akviferima te iscrpljenim ležištima prirodnog plina (Panfilov, 2016).

6.3. Podzemni reaktor za proces metanacije

U ovoj vrsti podzemnog skladišta, vodik i ugljikov dioksid se skladište u akviferu ili iscrpljenom ležištu prirodnog plina gdje su podloženi metanogenim bakterijama koje svojim djelovanjem proizvode metan Sabatierovom reakcijom metanacije. Ovakav proces može se obavljati pri niskim temperaturama zbog djelovanja bakterija, što može biti ekonomski prihvatljivije nego visokotemperaturni proces s primjenom katalizatora (Panfilov, 2016).

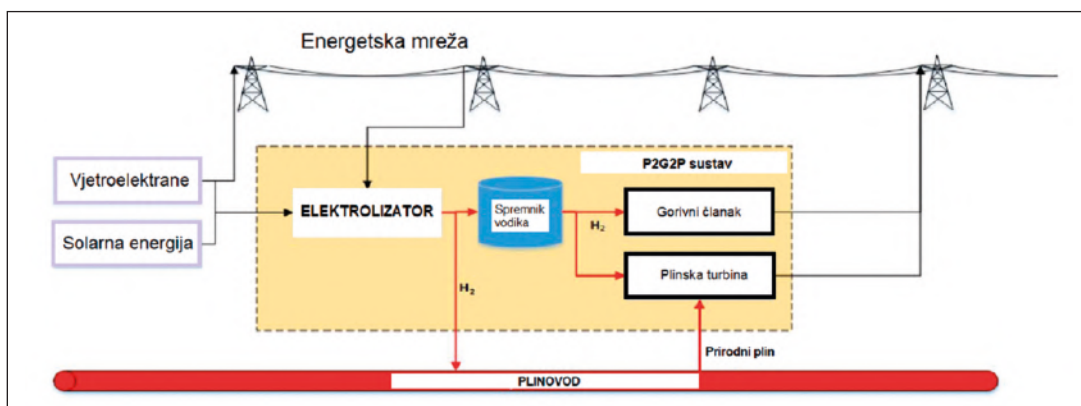
7. Mogućnosti integracije vodika u energetske sustave

Vodik predstavlja postepeno rastući čimbenik u globalnoj energetskej tranziciji, no u bližoj budućnosti očekuje se značajni porast primjene vodika zahvaljujući višestrukim mogućnostima iskorištavanja. Pored postojeće zrele tehnologije u kojima se primjenjuje vodik, kao što su proizvodnja amonijaka i metanola te u rafinerijama, vodik se može koristiti u transportu, odnosno u vozilima pogonjenim gorivnim člankom (osobnim vozilima, autobusima, teškom kamionskom prijevozu), vlakovima te radnim strojevima (Hydrogen Europe, 2017a). Također, gorivni članak se može primijeniti u avionskoj industriji kao sredstvo pogona avionskog elektroničkog sustava te u pomoćnim energetskim jedinicama. U stacionarnim sustavima gorivni članci se mogu koristiti kao decentralizirani izvor energije u područjima koja nisu spojena na elektroenergetsku mrežu te kao mikrokogeneracijska postrojenja s vrlo visokim korisnim učinkom (do 95%) (Hydrogen Europe, 2017a).

7.1. P2G2P sustavi

Vodik se kao prijenosnik energije može koristiti u sustavima za skladištenje energije. To se u prvom redu odnosi na P2G2P sustave (*engl. Power-to-Gas-to-Power*), također poznati i kao P2P sustavi (*engl. Power-to-Power*) koji koriste elektrolizatore i gorivne članke kao komponente za pretvorbu primarne energije, koji istovremeno omogućuju brzo odazivno balansiranje energije u sustavu. P2G2P sustavi smatraju se potencijalnim načinom skladištenja obnovljive energije (Kotowicz et al., 2018). Jednostavna shema P2G2P sustava prikazana je na slici 9.

U *Power-to-Gas-to-Power* postrojenjima, električna energija se pretvara u plinovito gorivo, odnosno vodik, koji se zatim pohranjuje ili transportira za pro-



Slika 9. Jednostavna shema P2G2P sustava (Kotowicz et al., 2018)

izvodnju električne energije. Ova se tehnologija može koristiti za pohranu viškova proizvedene obnovljive energije (najčešće iz vjetroelektrana i fotonaponskih ćelija) koja bi se koristila u periodima visoke potražnje u elektroenergetskoj mreži. Takav sustav može se koristiti lokalno, ili pak biti spojen na glavnu distribucijsku mrežu (Kotowicz et al., 2018). Glavni elementi sustava su:

- elektrolizatori; najčešće korišteni su alkalni i PEM elektrolizatori
- objekt za skladištenje plina; spremnici plina pod tlakom te kriogeni spremnici
- generator električne struje, odnosno PEM gorivni članak ili plinska turbina (Kotowicz et al., 2018).

Udio vjetroelektrana i fotonaponskih ćelija u globalnoj proizvodnji električne energije 2018. godine iznosio je oko 10% (ewind.es, 2020), no njihov ukupni instalirani kapacitet iz godine u godinu raste. Zbog nestabilne proizvodnje električne energije iz takvih izvora koja najviše ovisi o vremenskim uvjetima, postoji sve veći interes za korištenje P2G2P sustava kao oblika skladištenja energije.

Trenutni demonstracijski projekti ove vrste, u usporedbi s ostalim načinima skladištenja energije, imaju relativno nizak koristan učinak, koji ne prelazi 40% (Kotowicz et al., 2018). Glavni razlog tomu je postojanje dva procesa energetske transformacije, mala učinkovitost gorivnih članaka te značajna pomoćna snaga korištena u P2G2P sustavima. Uređaje koji se koriste u P2G2P instalacijama karakteriziraju visoke cijene investicija te kratki vijek trajanja (osobito gorivnih članaka). Korištenje takvih sustava zahtijeva tehno-ekonomsku analizu za svaki zasebni slučaj te nastavak istraživanja i razvoja usmjerenog na povećanje učinkovitosti P2G2P sustava (Kotowicz et al., 2018).

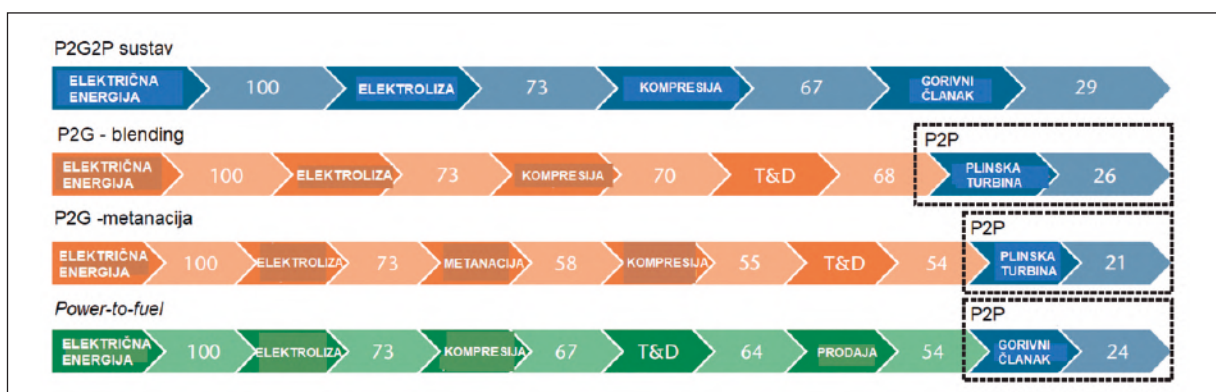
Proizvedeni vodik se, osim za ponovnu elektrifikaciju, može miješati u postojeću plinsku mrežu, koristiti kao gorivo u vozilima s gorivnim člancima te kao ulazna sirovinama u pojedinim granama industrije. Kao i P2G2P sustav, i ostali potencijalni načini integracije obnovljivih izvora energije na bazi vodika se baziraju na nekoliko oblika transformacije energije, što dovodi do relativno niske učinkovitosti cjelokupnih procesa u rasponu od 20% do 30% (prikazano na slici 10.) (IEA, 2015).

7.2. Primjena vodika u transportu

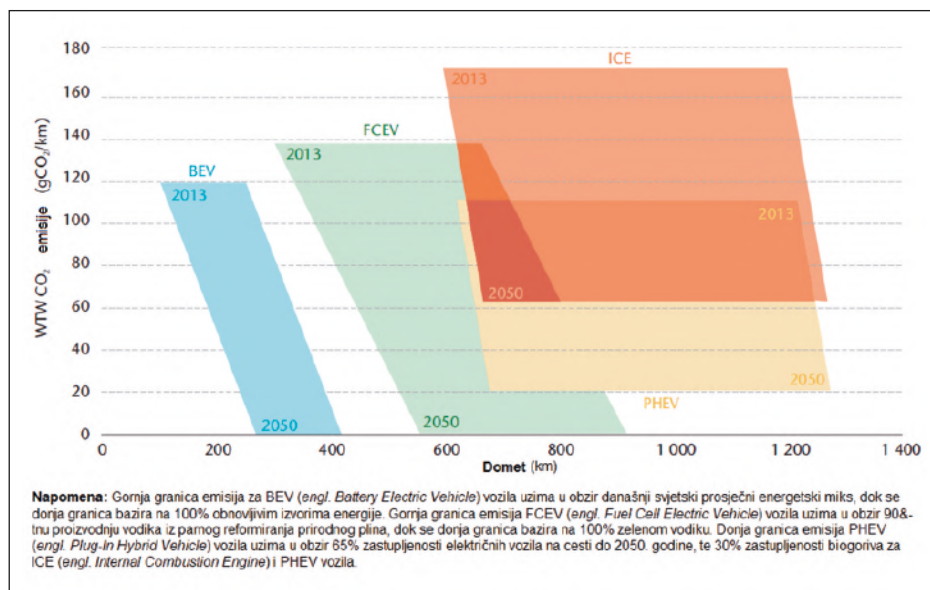
Globalna potražnja energije u sektoru transporta se više nego dvostruko povećala od 45 EJ u 1973. godini, do 110 EJ u 2014. godini, povećavši pri tome svoj udio u globalnoj potražnji energije s 23% na 28% (Hannula i Reiner, 2019). Kako bi se uskladili s ciljevima Pariškog sporazuma, IEA (*engl. International Energy Agency*) procjenjuje kako bi se očekivana potražnja 2050. godine od 160 EJ trebala spustiti na 102 EJ, odnosno da bi trebala ostati približna današnjoj potražnji energije u transportu. Zbog toga, dekarbonizacija cestovnog transporta zahtijeva kombinaciju održivih goriva i novih vrsta pogona vozila (Hannula i Reiner, 2019).

Električna vozila pogonjena gorivnim člankom (*engl. Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV*) su vozila koja koriste vodik pohranjen u tlačnom spremniku (35 MPa do 70 MPa) za generiranje pokretne snage. Energija kočenja se također rekuperira i pohranjuje u bateriji, iz koje se koristi električna struja za optimizaciju potrošnje energije i pokrivanje vršne potrošnje energije u vozilu (primjerice pri ubrzanju) (IEA, 2015).

Trenutna potrošnja goriva je oko 1 kg vodika na 100 prijeđenih kilometara. Trenutna demonstracijska vozila imaju domet između 500 i 650 kilometara. Zbog toga što su karakteristike ovakvih vozila u vožnji



Slika 10. Prikaz učinkovitosti procesa baziranih na elektrolizi vodika (IEA, 2015)



Slika 11. WTW (engl. Well-to-wheel) emisije različitih pogona vozila u odnosu na domet (IEA, 2015)

i vrijeme punjenja vozila slični konvencionalnim vozilima, FCEV vozila ih potencijalno mogu uspješno zamijeniti emitirajući pri tom značajno manje stakleničkih plinova, ovisno o načinu proizvodnje vodika (slika 11.).

Krajem 2018. godine, u svijetu je postojalo 11 200 FCEV vozila, od čega je 4 000 vozila prodano iste te godine, odnosno 80% više nego u 2017. godini. Najviše prodanih vozila bilo je u Kaliforniji, zatim Japanu, Koreji i Njemačkoj (IEA, 2019a).

Značajnu ulogu u ranoj tržišnoj fazi FCEV vozila mogu imati flote vozila, primjerice taksi prijevoznici. Punjenje vozila na baznoj lokaciji uvelike smanjuje potrebu za skupocjenom infrastrukturom punionica vodikom. Zbog toga bi se, kao rezultat bolje iskorisćenosti punionica te veće godišnje kilometraže, ekonomska opravdanost ranije mogla postići kod flote vozila, nego kod individualno posjedovanih vozila. Široko posjedovanje FCEV vozila također može biti ograničeno zabrinutošću potrošača u vezi sigurno-

sti putnika pri akcidentima, dostupnosti punionica te sigurnosti u tunelima i zatvorenim parkiralištima (IEA, 2015).

Teški cestovni prijevoz, odnosno kamionski promet, ima neizvjesnu budućnost, kao i osobna vozila. Naime, moderni dizelski motori u teškim vozilima imaju relativno visoku učinkovitost (i do 40%) pri konstantnoj brzini na autocestama. Učinkovitost gorivnih članaka se smanjuje porastom izlazne snage. Također, u usporedbi s konvencionalnim dizelskim vozilima, vodik u spremniku pod tlakom od 70 MPa zahtijeva četiri puta veći spremnik za istu udaljenost (IEA, 2015). Glavni problem manjka razvoja vozila s gorivnim člankom je njihova neučinkovitost u odnosu na električna vozila. Tablica 3. predstavlja učinkovitost vozila pogonjenih vodikom ovisno o vrsti goriva iz kojeg se proizvodi vodik potreban za pogon.

Nasuprot navedenim vrijednostima, električna vozila mogu imati učinkovitost od 73% (InsideEVs, 2020).

Tablica 2. Modeli vozila pogonjenih gorivnim člankom u trenutnoj prodaji (modificirano iz izvora Turoń, 2020)

Model	Vrijeme proizvodnje	Prosječni domet (km)	Klasa vozila	Prosječna cijena (USD)	Prosječna cijena konkurentnog vozila u klasi
Hyundai ix35fuel cell	2013 – do danas	594	SUV	68 309 – 70 000	33000
Hyundai Tucson FCEV	2014 – do danas	426	SUV	68 309 – 70 000	33000
Toyota Mirai	2014 – do danas	502	D vozilo	58 365 – 65 000	25000
Honda Clarity	2016 – do danas	480	D vozilo	59 385	25000
Hyundai Nexa	2018 – do danas	600	SUV	58 300 – 61 800	33000

Tablica 3. Učinkovitost vozila pogonjenih vodikom obzirom na izvor vodika (Perković, 2020)

	učinkovitost (%)
Vozila pokretana vodikom kao nosiocem energije – vodik iz elektrolize i električna energija iz 100% obnovljivih izvora energije	22,7
Vozila pokretana vodikom kao nosiocem energije – vodik iz elektrolize i električna energija iz energetske miksa Republike Hrvatske	17,4
Vozila pokretana vodikom kao nosiocem energije – vodik iz elektrolize i električna energija iz fosilnih izvora	9,0

Dostatna mreža punionica vodikom je ključna za privlačenje interesa potrošača za FCEV vozila. One mogu biti neovisne (slika 9-4.), ili uklopljene u postojeće benzinske crpke. Najvažniji faktor kod postavljanja punionice vodika je njezin kapacitet. I dok u početku stanice dnevnog kapaciteta od 50 do 100 kg vodika mogu biti dovoljne (što će omogućiti 10 do 20 punjenja dnevno), na razvijenom tržištu su potrebne stanice kapaciteta i do 2000 kg dnevno, pri čemu je opskrba stanice jedino moguća vodikovim cjevovodima ili kamionima za prijevoz ukapljenog vodika (ako se radi o dopremi vodika iz centraliziranog postrojenja). Krajem 2019. godine, u svijetu je postojalo 432 punionice vodika, od čega je 330 javnih punionica. U Europi je postojalo 177 punionica vodika, od čega 87 u Njemačkoj te 26 u Francuskoj (FuelCellWorks, 2020).

8. Zaključak

Vodik predstavlja veliki potencijal u smanjenju emisija stakleničkih plinova i usporavanju globalnog zatopljenja zbog činjenice da vodik kao gorivo izgara bez štetnih emisija. No, važno je naglasiti da se u tom kontekstu radi o zelenom vodikom, odnosno o vodikom proizvedenom korištenjem obnovljivih izvora energije. Plavi vodik također može imati značajnu ulogu u prijelazu na održivi oblik ekonomije, no potrebno je imati na umu da ograničena financijska sredstva mogu limitirati razvoj potpuno obnovljivih goriva i izvora energije. Ključ napretka tehnologije zelenog vodika je istraživanje i razvoj u smjeru elektrolizatora i gorivnih članaka. Elektrolizatori i gorivni članci su tehnologija od iznimne važnosti te ih je potrebno razvijati kako bi se poboljšala njihova ekonomičnost upotrebe. Izazovi pri tome su opravdati rad elektro-

lizatora tijekom cijele godine, obzirom na promjenjivu dostupnost obnovljivih izvora energije te jeftine električne energije iz elektroenergetskog sustava te problem neučinkovitosti zbog višestrukih energetske transformacije u P2G2P sustavima. Iz ekonomske analize proizvodnje plavog i zelenog vodika, vidljivo je da bi se do 2040. godine mogla dostići cjenovna konkurentnost zelenog vodika s vodikom proizvedenim iz fosilnih goriva, no uz određene pretpostavke razvoja događaja kao što su poskupljenje naknada za emisije.

U ovom radu naglasak se daje na korištenju postojeće infrastrukture za eksploataciju i transport ugljikovodika kako bi se obnovljivi izvori energije integrirali u globalne energetske sustave. Izrada potpuno novih sustava i postavljanje nove infrastrukture može naići na značajne prepreke u ekonomskom i praktičnom smislu. Transport vodika plinovodima u smjesi s prirodnim plinom predstavlja realnu mogućnost integracije obnovljivih izvora energije u globalni energetske sustav. Pri tome postoje izazovi kao što su zadovoljavanje potrebe energije na trošilima u kalorijskom smislu, kompatibilnost krajnjih trošila sa smjesom metana i vodika, degradacija otpornosti materijala od kojih su izrađeni postojeći plinovodi te općenito zadovoljavanje sigurnosnih kriterija korištenja plinovoda u tim uvjetima. Svaki od ovih izazova potrebno je detaljno analizirati na svakom pojedinačnom slučaju prenamjene postojećih plinovoda zbog različitih konstrukcijskih karakteristika. Postrojenja za izdvajanje vodika iz smjese imaju potencijal zamijeniti trenutne funkcije primopredajnih mjerno-redukcijskih stanica uz moguće iskorištavanje čistog izdvojenog vodika za industrijske ili energetske namjene.

Najveća trenutna barijera u primjeni vodika u transportu predstavlja manjak dostupnih punionica, prevelika cijena vozila te slaba ukupna učinkovitost vozila obzirom na ostale alternativne pogone vozila. Nezainteresiranošću kupaca usporava se razvoj punionica, dok se slabim razvojem punionica odvrću potencijalni kupci. Uz sve navedeno, najvažniji faktor u prelasku globalnih ekonomija na obnovljive izvore energije je ekonomska opravdanost. Fokusiranim razvojem u tom smjeru, uz financijske potpore razvojnim projektima, zasigurno se može postići postupna tranzicija prema održivim gospodarstvima u dugoročnom razdoblju, pri čemu tehnologija elektrolizatora i gorivnih članaka može pomoći u integraciji obnovljivih izvora energije, odnosno skladištenju takvog oblika energije. Također, iskorištavanjem postojeće energetske infrastrukture smanjuje se cjenovna intenzivnost takvih projekata.

Literatura

1. HAESLONCKX, D., D'HAESELEER, W., 2006. *The use of natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure*. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.018> (20. 4. 2020.)
2. HANNULA, I., REINER, D., 2019. *Near-Term Potential of Biofuels, Electrofuels, and Battery Electric Vehicles in Decarbonizing Road Transport*. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.013> (13. 5. 2020.)
3. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2015. *Technology Roadmap – Hydrogen and Fuel Cells*. IEA Publications. URL: [http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-\(1\).aspx](http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-(1).aspx) (27. 3. 2020.)
4. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA), 2018. *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power> (27. 3. 2020.)
5. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA), 2019. *Hydrogen: A renewable energy perspective*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective> (1. 4. 2020.)
6. KARASALIHović SEDLAR, D., VULIN, D., KRAJAČIĆ, G., JUKIĆ, L., 2019. *Offshore gas production infrastructure reutilization for blue energy production*. *Renewable & sustainable energy reviews*, 108, 159-174. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.052> (2. 7. 2020.)
7. KLABUČAR, B., KARASALIHović SEDLAR, D., SMAJLA, I., 2020. *Analysis of blue energy production using natural gas infrastructure: Case study for the Northern Adriatic*. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.082> (28. 5. 2020.)
8. KOTOWICZ, J., WECEL, D., JURCZYK, M., 2018. *Analysis of component operation in power-to-gas-to-power installations*. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.050> (25. 4. 2020.)
9. KUMAR, S. S., HIMABINDU, V., 2019. *Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review*. KeAi Publishing. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002> (19. 5. 2020.)
10. MELAINA, M. W., ANTONIA, O., PENEV, M., 2013. *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues*. National Renewable Energy Laboratory.
11. PANFILOV, M., 2016. *Compendium of Hydrogen Energy – Volume 2: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure*. Woodhead Publishing Series in Energy. str. 91 – 115. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3> (14. 4. 2020.)
12. PERKOVIĆ, L., 2020. *Distribucija i korištenje energije – materijali s predavanja. Transport i energetika. Energetska i emisijska intenzivnost u sektoru prometa*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet (neobjavljeno).
13. POKUPČIĆ, T., 2011. *Ispitivanje cjevovoda vodika u rafineriji nafte Sisak*. INA d.d.. URL: https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=118617 (17. 5. 2020.)
14. SUNDÉN, B., 2019. *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*. Elsevier. str 123 – 144 URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816950-6.00008-7> (3. 5. 2020.)
15. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY – ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER, 2020a. *Hydrogen Production and Distribution*. URL: https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html (15. 4. 2020.)
16. VEDRINA, I., 2014. *Alkalni bipolarni elektrolizator*. Diplomski rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
17. YADAV, K., SIRCAR, A., 2017. *Hydrogen compressed natural gas and liquefied compressed natural gas: Fuels for future*. Gujarat: Pandit Deendayal Petroleum University. URL: <http://www.pdpu.ac.in/downloads/3%20Hydrogen-Compressed-Natural-Gas.pdf> (8. 9. 2020.)
18. ZELENKO, I., 2020. *Analiza uklanjanja odobalnih postrojenja na Jadranu u odnosu na prenamjenu u odobalnu vjetroelektranu*. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
19. ZHAO, Y., MCDONELL, V., SAMUELSEN, S., 2019. *Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen*. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.011> (16. 4. 2020.)

Web izvori

20. COVERTEL POWER, 2016. *What is an electrolyser?* URL: <https://covertelpower.com.au/products-and-services/electrolysers/what-is-an-electrolysers/> (21. 4. 2020.)
21. ENERGINET DK, 2018. *Environmental Report 2018: Environmental report for Danish electricity and CHP for 2017 status year*. Energinet. URL: <https://en.energinet.dk/About-our-reports/Reports/Environmental-Report-2018> (2. 5. 2020.)

22. EUROPEAN PARLIAMENT, 2020. *EU climate law: MEPs want to increase emission reductions target to 60% by 2030*. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20200907IPR86512/eu-climate-law-meps-want-to-increase-emission-reductions-target-to-60-by-2030> (13. 9. 2020.)
23. EVWIND.ES, 2020. *Wind energy and solar produced 10% of global electricity in H1 2020*. URL: shorturl.at/dorvF (13. 9. 2020.)
24. HÉVIN, G., 2019. *Underground storage of Hydrogen in salt caverns*. European Workshop on Underground Energy Storage November 7th – 8th 2019. Paris. URL: <http://www.energnet.eu/sites/default/files/3-Hevin-Underground%20Storage%20H2%20in%20Salt.pdf> (2. 6. 2020.)
25. HYDROGEN EUROPE, 2017. *Fuel cells*. URL: <https://hydrogeneurope.eu/fuel-cells> (14. 5. 2020.)
26. 26. HYDROGEN EUROPE, 2017a. *Hydrogen Applications*. URL: <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-applications> (21. 5. 2020.)
27. IEA, 2019a. *Tracking Energy Integration, 2019*. URL: <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2019/hydrogen> (20. 5. 2020.)
28. INSIDEEVS, 2017. *Efficiency Compared: Battery Electric 73%, Hydrogen 22%, ICE 13%*. URL: <https://insideevs.com/news/332584/efficiency-compared-battery-electric-73-hydrogen-22-ice-13/> (25. 5. 2020.)
29. ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2016. *ISO 6971:2016 Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition*. URL: <https://www.iso.org/standard/55842.html> (13. 9. 2020.)
30. ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, 2020. *Hydrogen*. URL: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen> (11. 4. 2020.)
31. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY – OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, 2020. *Hydrogen Production: Natural Gas Reforming*. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming> (11. 4. 2020.)
32. U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA), 2020. *Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2020*. U.S. Energy Information Administration. URL: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf (28. 4. 2020.)
33. VTT TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND, 2018. *Flexible combined production of power, heat and transport fuels from renewable energy sources*. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bd5eb58c&appId=PPGMS> (2. 6. 2020.)