

# Vodikova ekonomija

---

**Bešlić, Magdalena**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Economics and Business / Sveučilište u Zagrebu, Ekonomski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:148:175638>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported/Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 3.0](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-12**



*Repository / Repozitorij:*

[REPEFZG - Digital Repository - Faculty of Economics & Business Zagreb](#)



**Sveučilište u Zagrebu  
Ekonomski fakultet  
Specijalistički diplomski stručni studij „Ekonomika energije i okoliša“**

## **VODIKOVA EKONOMIJA**

**Diplomski rad**

**Magdalena Bešlić**

**Zagreb, rujan 2021.**

**Sveučilište u Zagrebu  
Ekonomski fakultet  
Specijalistički diplomski stručni studij „Ekonomika energije i okoliša“**

**VODIKOVA EKONOMIJA  
HYDROGEN ECONOMY  
Diplomski rad**

**Magdalena Bešlić, 0067444190**

**Mentor: prof. dr. sc. Tomislav Gelo**

**Zagreb, rujan 2021.**

---

Ime i prezime studenta/ice

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je \_\_\_\_\_  
(vrsta rada)

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada, te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Student/ica:

U Zagrebu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(potpis)

## **Sažetak**

U suvremenom svijetu koji se odlikuje iznimnim gospodarskim i tehnološkim napretkom, sve je više očita i negativna strana nekontroliranog napretka koja se najočitije manifestira na okolišu. Suočeni s izazovom potrebe za napretkom i održavanjem već postojećeg napretka, znanstvenici i političari pokušavaju pronaći najbolji način da tehnologija kojom se čovječanstvo koristi bude čista. Jedan od najboljih odgovora na takva nastojanja nalazi se upravo u vodik, plinu bez boje i mirisa koji je najzastupljeniji element u svemiru. Postoje realni planovi prema kojima bi vodik mogao postati vodeći energent u budućnosti do 2050. godine. Danas se vodik primjenjuje u puno segmenata, no njegova proizvodnja još uvijek nije klimatski neutralna. Cilj je da proizvodnja vodika postane klimatski neutralna te da vodik zamijeni druge ugljikovodike na tržištu energenata.

**Ključne riječi:** vodik, klima, ekonomija, održivi razvoj

## **Summary**

In the modern world, which is characterized by exceptional economic and technological progress, there is an increasing of negative side of the uncontrolled progress, which is the most clearly manifested in the environment. Faced with the challenge of the need of the progress and sustain of already existing progress, scientists and politicians are trying to find the best way to keep the technology used by humanity clean. One of the best answers to such efforts lies precisely in hydrogen, a colorless and odorless gas that is the most abundant element in the universe. There are realistic plans according to which hydrogen could become the leading energy source in the future by 2050. Today, hydrogen is applied in many segments, but its production is still not climate neutral. The goal is to make hydrogen production climate-neutral and for hydrogen to replace other hydrocarbons in the energy market.

**Keywords:** hydrogen, climate, economy, sustainable development

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>1.1. Problem rada</b> .....	2
<b>1.2. Predmet rada</b> .....	2
<b>1.3. Svrha i cilj rada</b> .....	3
<b>1.4. Metode istraživanja</b> .....	3
<b>1.5. Sadržaj rada</b> .....	3
<b>2. VODIK</b> .....	4
<b>2.1. Proizvodnja vodika</b> .....	5
<b>2.2. Skladištenje vodika</b> .....	7
<b>2.3. Transport vodika</b> .....	9
<b>3. TRANZICIJA NA VODIKOVU EKONOMIJU</b> .....	10
<b>3.1. Vodik u energetskej politici i strategiji Europske unije i Hrvatske</b> .....	14
<b>3.1.1. Vodik u energetskej strategiji Republike Hrvatske</b> .....	17
<b>3.2. Infrastruktura kao preduvjet vodikove ekonomije</b> .....	19
<b>3.2.1. Dopremanje vodika u Europsku uniju</b> .....	23
<b>3.3. Dugoročne projekcije upotrebe vodika</b> .....	25
<b>4. PRIMJERI VODIKOVE EKONOMIJE</b> .....	27
<b>4.1. Primjena vodika u Svijetu</b> .....	34
<b>4.2. Primjena vodika u Europskoj uniji</b> .....	36
<b>4.2.1. Proizvodnja vodika po državama</b> .....	40
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	41
<b>Bibliografija</b> .....	45
<b>Popis Grafova</b> .....	49
<b>Popis slika</b> .....	49

## 1. UVOD

Koncept održivog razvoja evoluirao je u vodeće načelo za život u budućem svijetu u kojem se zadovoljavaju ljudske potrebe uz održavanje ravnoteže s prirodom. Rješavanje izazova održivosti zahtijeva dugoročnu perspektivu i integraciju mnogih elemenata. Energija je jedna od njih. Poticanje globalnog energetskeg sustava na održiv put postupno postaje glavna briga i cilj politike. Pojava održivog globalnog energetskeg sustava, međutim, postupni je dugotrajan proces koji će zahtijevati duboku promjenu njegove sadašnje strukture.

Sve češće se u medijskom diskursu mogu čuti izjave vezane uz nužnost smanjenja emisije stakleničkih plinova, prelazak na održive izvore energije, klimatske promjene... apeli koje mediji, političari i različiti aktivisti upućuju javnosti utemeljeni su na trenutno vrlo lošem stanju u iskoristivosti obnovljivih izvora energije kao i na neprestanom neodrživom razvoju koji se događa posljednjih nekoliko stoljeća.

Iako se mogu pojaviti mnogi alternativni putevi održive energije, takozvana „vodikova ekonomija“ dobila je posebnu pozornost.

Energetski sustav na bazi vodika smatra se održivom i povoljnom opcijom za pružanje visokokvalitetnih energetskeg usluga u širokom rasponu primjena na učinkovit, čist i siguran način uz ispunjavanje ciljeva održivosti. Vodik također idealno nadopunjuje električnu energiju. Obje su prijenosnici energije vrhunske kvalitete, ne sadrže ugljik i stvaraju male ili nikakve zagađujuće emisije na mjestu uporabe. Električna energija je, međutim, u nepovoljnom položaju kada je potrebno skladištenje, dok bi vodik mogao biti prikladan za te primjene. (Ogden, 1999). Svestranost vodikove ekonomije pojačana je činjenicom da se može proizvesti iz raznih fosilnih i nefosilnih primarnih resursa. Stoga se opskrba infrastruktura može razvijati prema sirovinama dostupnim u različitim regijama. To može donijeti konkretne prednosti energetske sigurnosti i olakšati prijelaz na održivi energetski sustav. U početnoj fazi „vodikove ekonomije“ vodik bi se mogao proizvoditi iz sadašnjih konkurentnih fosilnih goriva. U kasnijoj fazi, proizvodni sustav mogao bi se razviti prema obnovljivim izvorima. (International Energy Agency, 2009) Na taj način vodik bi postao idealno sredstvo za „dodavanje vrijednosti“ obnovljivim izvorima i njihovom prilagođavanju za pružanje visokokvalitetnih energetskeg usluga. Istodobno, stvaranje vodika iz obnovljivih izvora dugoročno će dovesti njegov proizvodni sustav prema održivoj putanji. Vodik također ima stratešku važnost u potrazi za niskim emisijama, ekološki povoljnijim, čistim i održivijim energetskeg sustavom. S jedne strane, uvođenje visoko učinkovitih i čistih tehnologija krajnje uporabe na bazi vodika pomoglo bi u smanjenju krajnje potrošnje energije, a osim toga moglo bi donijeti lokalne i regionalne



koristi za okoliš (npr. u vezi onečišćenja zraka). S druge strane, vodik se može proizvesti iz izvora bez ugljika ili iz fosilnih goriva u kombinaciji s odvajanjem i sekvencijom ugljika. Tako bi vodik mogao značajno pridonijeti smanjenju emisija stakleničkih plinova. (The Institution of Engineering and Technology, 2020)

U dalekoj budućnosti vodik bi mogao postati važna energetska roba na globalnoj razini. Postizanje takvog cilja, međutim, zahtijevat će značajna poboljšanja troškova i performansi u proizvodnji, skladištenju, pretvorbi, transportu i tehnologijama krajnje uporabe. Samo zdrava kombinacija istraživanja, razvoja i demonstracijskih napora, kao i komercijalne implementacije dovela bi do potrebnih tehnoloških poboljšanja i smanjenja troškova. Intenzivni napori na istraživanju i razvoju i dalje su potrebni u brojnim područjima. Osim toga, isplativa komercijalizacija vodikovih tehnologija zahtijevat će tržišne strategije koje potiču koordinaciju različitih tržišnih segmenata.

## **1.1. Problem rada**

Brojna su istraživanja analizirala perspektive i moguće strategije za prijelaz na energetske sustav na bazi vodika, takozvanu vodikovu ekonomiju. Međutim, strukturne promjene energetskih sustava traju dugo. Prijelaz s malih tržišnih segmenata na potpuno razvijenu ekonomiju vodika trajao bi kroz mnogo desetljeća. Dakle, kako bi ekonomija vodika postala šira praksa, a ne samo teorija bit će potrebna brojna istraživanja koja će dokazivati superiornost upotrebe vodika nad drugim izvorima energije. U prvom redu radi se o eksperimentalnim istraživanjima prirodnih znanosti, no čak i ukoliko istraživanja i eksperimenti pokažu iznimnu učinkovitost i održivost upotrebe vodika, potrebno je i na tržišnoj razini dokazati isplativost upotrebe vodika kao primarnog izvora energije. Ideje o tome kako bi vodik mogao postati, ako ne primarni, onda barem iznimno korišteni izvor energije postoje već preko dvadeset godina, a ostaje na znanosti da dokaže i njegovu učinkovitost. Glavni je problem rada prikazati koliko je vodikova ekonomija učinkovita, u kojoj se mjeri primjenjuje te koji su njezini dosezi.

## **1.2. Predmet rada**

Predmet rada jest istraživanje uloge vodika u trenutnoj energetske – ekonomskoj situaciji na tržištu te mogućnosti i potencijali koje ekonomija vodika može imati u budućnosti na tržištu energenata. Ne treba poći od pretpostavke da je vodikova ekonomija zaista i najbolja ili tržišno najisplativija. Upravo suprotno, potrebno je analizirati kvantitativna istraživanja s energetske i

s ekonomske strane kako bi se mogla steći cjelokupna slika o isplativosti korištenja vodika kao jednog od primarnih izvora energije.

### **1.3. Svrha i cilj rada**

Vodikova ekonomija čini vrlo mali udio na trenutnom tržištu energenata. Svrha i cilj rada jest prikazati radi li se o opravdano maloj zastupljenosti vodika među najkorištenijim energentima ili se radi samo o nemogućnosti promjene inertnog sustava te prevelikoj moći vodećih aktera u svijetu tržišta energentima.

### **1.4. Metode istraživanja**

Za potrebe ostvarenja ciljeva ovog rada korišteni su odgovarajući podaci do kojih se došlo slijedećim znanstvenim metodama: Metodom analize i to informacija i podataka prikupljenih u toku ovog rada, Metodom deskripcije odnosno opisivanja na temelju prikupljenih podataka i literature, Metodom sinteze podataka prikupljenih u anketi i drugih informacija do kojih se došlo i Metodom prikupljanja i analize podataka iz relevantne literature.

### **1.5. Sadržaj rada**

Rad se sastoji od pet glavnih poglavlja. Prvo poglavlje je uvodno poglavlje u kojemu je prikazan uvod u rad, problemi istraživanja, ciljevi i svrha istraživanja te sami sadržaj rada. U drugom poglavlju detaljno je izloženo što je točno vodik s naglaskom na njegov energetske potencijal. U drugom dijelu poglavlja bit će prikazani načini proizvodnje, skladištenja i transporta vodika. U trećem poglavlju prikazana je tranzicija na vodikovu ekonomiju. Tranzicija se sastoji od nekoliko sastavnica. Potrebno je izračunati energetske potencijal, uskladiti politiku, cijenu i infrastrukturu. Poseban će naglasak biti na energetske politici Europske unije i Republike Hrvatske. Četvrto poglavlje je analiza trenutne tržišne situacije i trenutne upotrebe vodika na energetske tržištu u svijetu, u Europske uniji i naposljetku u Republici Hrvatskoj. Peto poglavlje je zaključak rada u kojemu će se donijeti zaključno vrednovanje o ranije napisanom kao i preporuka za daljnja istraživanja.

## 2. VODIK

Vodik je bezbojna, zapaljiva plinovita tvar bez mirisa i okusa koja je najjednostavniji član obitelji kemijskih elemenata. Atom vodika ima jezgru koja se sastoji od protona koji nosi jednu jedinicu pozitivnog električnog naboja; elektron, koji nosi jednu jedinicu negativnog električnog naboja, također je povezan s ovom jezgrom. U uobičajenim uvjetima, vodikov plin je nakupina nestabilnih plinovitih molekula vodika, od kojih se svaka sastoji od para atoma - dvoatomske molekule,  $H_2$ . Najranije poznato važno kemijsko svojstvo vodika je da gori s kisikom i tvori vodu -  $H_2O$ ; ime vodika potječe od grčkih riječi koje znače „proizvođač vode“. (Turner, 2004) Iako je vodik najrasprostranjeniji element u svemiru (tri puta više od helija, sljedećeg elementa po zastupljenosti), on čini samo oko 0,14 posto Zemljine kore po težini. Javlja se, međutim, u velikim količinama kao dio vode u oceanima, ledenjacima, rijekama, jezerima i atmosferi. Kao dio nebrojenih ugljikovih spojeva, vodik je prisutan u svim životinjskim i biljnim tkivima te u nafti. Iako se često govori da ima više poznatih spojeva ugljika nego bilo kojeg drugog elementa, činjenica je da budući da je vodik sadržan u gotovo svim ugljikovim spojevima i također tvori mnoštvo spojeva sa svim ostalim elementima (osim nekih od plemeniti plinovi), moguće je da su spojevi vodika brojniji. (Turner, 2004)

Robert Boyle proizveo je vodikov plin 1671. godine dok je eksperimentirao sa željezom i kiselinama, ali tek je 1766. Henry Cavendish to prepoznao kao poseban element. Elementu je ime vodik dao francuski kemičar Antoine Lavoisier. Vodik ima tri uobičajena izotopa: procij, koji je običan vodik; deuterij, stabilan izotop koji je 1932. otkrio Harold C. Urey; i tricij, nestabilan izotop otkriven 1934. Razlika između tri izotopa leži u broju neutrona koje svaki od njih ima. Vodik uopće nema neutrona; deuterij ima jedan, dok tricij ima dva neutrona, prema nacionalnom laboratoriju Lawrence Berkeley. Deuterij i tricij koriste se kao gorivo u nuklearnim fuzijskim reaktorima. Vodik se kombinira s drugim elementima, tvoreći brojne spojeve, uključujući uobičajene, poput vode ( $H_2O$ ), amonijaka ( $NH_3$ ), metana ( $CH_4$ ), stolnog šećera saharoze ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ), vodikovog peroksida ( $H_2O_2$ ) i klorovodične kiseline ( $HCl$ ).

Vodik se obično proizvodi zagrijavanjem prirodnog plina s parom kako bi nastala smjesa vodika i ugljičnog monoksida zvana sinteza, koja se zatim odvaja kako bi se proizveo vodik.

Vodik se koristi za proizvodnju amonijaka za gnojivo, u procesu koji se naziva Haberov proces, u kojem reagira s dušikom. Element se također dodaje u masti i ulja, poput ulja od kikirikija, postupkom koji se naziva hidrogenacija. Drugi primjeri uporabe vodika uključuju raketno gorivo, zavarivanje, proizvodnju klorovodične kiseline, smanjenje metalnih ruda i punjenje balona. Istraživači su radili na razvoju tehnologije vodikovih gorivnih ćelija koje omogućuju

dobivanje značajnih količina električne energije pomoću plina vodika kao izvora energije bez zagađenja koji se može koristiti kao gorivo za automobile i druga vozila.

## 2.1. Proizvodnja vodika

Prirodno izvoriste vodika otkriveno je dosad samo na nekoliko mjesta, a jedno od njih je u superdubokoj bušotini Kola u Rusiji na 11 tisuća metara dubine. Nije potpuno jasno koliko vodika ima u litosferi, no postoji nekoliko registriranih kompanija koje se bave potragom za vodikom u elementarnom stanju. Ipak, kad se razmišlja o upotrebi vodika za energetske svrhe, malo tko razmišlja o korištenju elementarnog vodika. (Armaroli & Vincenzo, 2011) Za proizvodnju vodika, vodik se mora odvojiti od ostalih elemenata u molekulama gdje se javlja. Postoji mnogo različitih izvora vodika i načina za njegovu proizvodnju kao gorivo. Dvije najčešće metode za proizvodnju vodika su reformiranje metanske pare i elektroliza (cijepanje vode električnom energijom). (Energy Information Administration, 2021) Reformacija para metana široko je korištena metoda komercijalne proizvodnje vodika. Reforma para metana čini gotovo sav komercijalno proizveden vodik u Sjedinjenim Državama (oko 99.5%) te oko 95% proizvodnje u Europskoj uniji. Komercijalni proizvođači vodika i rafinerije nafte koriste reformiranje para metana za odvajanje atoma vodika od atoma ugljika u metanu ( $\text{CH}_4$ ). Kod reformiranja para metana koriste se visoke temperature ( $1300^\circ\text{C}$  do  $1800^\circ\text{C}$ ) pod tlakom od 3–25 bara događa se reakcija metana u prisutnosti katalizatora za proizvodnju vodika, ugljičnog monoksida, i relativno mala količina ugljičnog dioksida. (Energy Information Administration, 2021) Prirodni plin glavni je izvor metana za proizvodnju vodika u industrijskim postrojenjima i rafinerijama nafte. Odlagališni plin/bioplín, koji se može nazvati i biometan, izvor je vodika za nekoliko elektrana na gorive ćelije u Sjedinjenim Državama i Europi. Biogoriva i naftna goriva također su potencijalni izvori metana. (Energy Information Administration, 2021) Elektroliza je proces koji razdvaja vodik iz vode pomoću električne struje. Elektroliza je pojam koji je relativno poznat svima koji su u srednjim školama imali nastavu iz kemije. U velikim, komercijalnim razmjerima, proces se može nazvati napajanje plinom, gdje je energija električna energija, a vodik plin. Sama elektroliza ne proizvodi nikakve nusprodukte ili emisije osim vodika i kisika. Električna energija za elektrolizu može doći iz obnovljivih izvora kao što su hidro, solarna energija ili energija vjetra. Ako se električna energija za elektrolizu proizvodi iz fosilnih goriva (ugljen, prirodni plin i nafta) ili izgaranjem biomase, tada su povezani učinci na okoliš i emisije ugljičnog dioksida neizravno povezani s elektrolizom. Ovisno o samo

elektrolitu, učinkovitost je slabija dok je kod elektrolize vode učinkovitost daleko najveća. (Energy Information Administration, 2021)

U tijeku su istraživanja kako bi se razvili drugi načini proizvodnje vodika: Korištenje mikroba koji koriste svjetlost za proizvodnju vodika, Pretvaranje biomase u plin ili tekućine i odvajanje vodika, Korištenje tehnologija solarne energije za odvajanje vodika od molekula vode. (Shahabuddin, Krishna, Tallada, & Perkins, 2020)

Proizvođači vodika, trgovci, vladine agencije i druge organizacije mogu kategorizirati ili definirati vodik prema izvorima energije za njegovu proizvodnju. Na primjer, vodik proizveden korištenjem obnovljive energije mogao bi se nazvati obnovljivim vodikom ili zelenim vodikom. Vodik proizveden iz ugljena može se nazvati smeđim vodikom, a vodik proizveden iz prirodnog plina ili nafte može se nazvati sivim vodikom. Proizvodnja smeđeg ili sivog vodika u kombinaciji s hvatanjem i skladištenjem/sekvestracijom ugljika mogla bi se nazvati plavim vodikom. (Shahabuddin, Krishna, Tallada, & Perkins, 2020),

Iako je vodik bez boje i mirisa, postoji čitav spektar boja kojima se opisuje vodik. Radi se o načinu proizvodnje.

No, ne postoji univerzalna konvencija o imenovanju i te se definicije boja mogu promijeniti s vremenom, pa čak i među zemljama.

**Zeleni vodik** - U kaleidoskopu boja vodika, zeleni vodik je onaj koji se proizvodi bez štetnih emisija stakleničkih plinova. Zeleni vodik nastaje korištenjem čiste električne energije iz viška obnovljivih izvora energije, poput solarne energije ili energije vjetra, za elektrolizu vode. Elektrolizatori koriste elektrokemijsku reakciju za cijepanje vode na njene komponente vodik i kisik, pri čemu se oslobađa ugljikov dioksid koji je klimatski neutralan.

Iako je zeleni vodik ono što je najpoželjnije i što će u ovom radu najviše puta biti spomenuto, zapravo je zeleni vodik najrjeđi jer je njegova proizvodnja još uvijek vrlo skupa. Stoga se danas govori o tome da se ne prijeđe direktno na zeleni vodik, nego da tranzicijski vodik bude plavi vodik.

**Plavi vodik** - Plavi vodik proizvodi se uglavnom iz prirodnog plina, postupkom koji se naziva reformom pare, koji okuplja prirodni plin i zagrijanu vodu u obliku pare. Izlazi vodik, ali i ugljični dioksid u obliku pare. Takav ugljični dioksid nije klimatski neutralna, nego se ponaša kao staklenički plin. Kad se govori o hvatanju i skladištenju ugljikova dioksida kao nusprodukta proizvodnje vodika, onda se radi o skladištenju i hvatanju ovog oblika ugljikva.

Prednost plavog vodika je u tome što se ne oslobađa velika količina ugljičnog dioksida kao pri proizvodnji sivog vodika. Njegova proizvodnja nije toliko financijski skupa i stoga je on dobra međuopcija u prelasku sa sivog na zeleni vodik.

**Sivi vodik** - Trenutno je to najčešći oblik proizvodnje vodika. Sivi vodik stvara se iz prirodnog plina ili metana, reformacijom metana u pari, ali bez hvatanja stakleničkih plinova nastalih u procesu. Nažalost, proizvodnjom vodika na ovaj način događa se veliko onečišćenje.

**Smeđi i crni vodik** - Smeđi crni vodik su oblici vodika koji nastaju iz crnog ili smeđeg ugljena. Crni ili smeđi vodik potpuna je suprotnost zelenom vodik<sup>1</sup>. Iako se rijetko koristi, Japan i Australija 10% vodika dobivaju iz ugljena, a najavljuje se i povećanje proizvodnje iz tog izvora.

**Bijeli vodik** - Bijeli vodik prirodni je geološki vodik koji se nalazi u podzemnim naslagama i nastaje frakiranjem. Trenutno ne postoje strategije za iskorištavanje ovog vodika. (Dawood, Anda, & Shafiullah, 2020)

## 2.2. Skladištenje vodika

Trenutno je na raspolaganju nekoliko vrsta tehnologija za skladištenje vodika. Najjednostavniji je stlačeni plin H<sub>2</sub>. skladištenje stlačneog vodika moguće je na temperaturi okoline. Također, proces ulijevanja i izlijevanja vodika iz spremnika vrlo je jednostavan. Ipak, na taj se način ne mogu transportirati velike količine vodika. (Krishna, i dr., 2021) Moguće je i skladištenje tekućeg H<sub>2</sub>. Od 25% do 45% uskladištene energije potrebno je za ukapljivanje H<sub>2</sub>. Kod ove metode gustoća skladištenja vodika je vrlo velika, ali vodik ključa na -253°C i potrebno je održavati ovu nisku temperaturu (inače će vodik proključati i ispariti), pa je potrebna glomazna izolacija. (Krishna, i dr., 2021) Moguće je skladištiti vodik u obliku metalnih hidrida. Metali u prahu apsorbiraju vodik pod visokim tlakom. Tijekom ovog procesa toplina nastaje nakon umetanja vodika, a s otpuštanjem tlaka i primjenom topline, proces se obrće. Glavni problem ove metode je težina upijajućeg materijala - masa spremnika bila bi oko 600 kg u usporedbi s 80 kg jednakog spremnika komprimiranog H<sub>2</sub> plina. (Krishna, i dr., 2021) U ovom trenutku popularna je i apsorpcija ugljika: najnovije polje skladištenja vodika. Pri visokom tlaku vodik će se povezati s poroznim ugljikovim materijalima. Dakle, može se sažeti da čak ni mobilno skladište vodika trenutno nije konkurentno ugljikovodičnim gorivima; to mora postati da bi se ova potencijalna tehnologija koja može spasiti živote u velikoj mjeri ostvarila. (Krishna, i dr., 2021)

---

<sup>1</sup> Kako bi se ispravno razlikovali termini, valja napomenuti da se i sivi vodik ponekad naziva crni vodik jer je crni vodik svaki onaj oblik vodika koji nastaje s velikom emisijom ugljikova dioksida iz fosilnih goriva.

## **Visokotlačno skladištenje vodika**

Najčešća metoda skladištenja vodika je kompresija plinske faze pri visokom tlaku (> 200 bara ili 2850 psi). Komprimirani vodik u spremnicima vodika na 350 bara (5.000 psi) i 700 bara (10.000 psi) koristi se u vozilima na vodik. Postoje dva pristupa povećanju gravimetrijskih i volumetrijskih skladišnih kapaciteta spremnika sa stlačenim plinom. Prvi pristup uključuje kriokomprimirane spremnike. To se temelji na činjenici da se pri fiksnom tlaku i volumenu volumetrijski kapacitet spremnika za plin povećava kako se temperatura spremnika smanjuje. Tako se hlađenjem spremnika sa sobne temperature na temperaturu tekućeg dušika (77K) povećava njegov volumetrijski kapacitet. Ograničenje ovog sustava je energija potrebna za kompresiju plina. Oko 20% energetskeg sadržaja vodika gubi se zbog načina skladištenja. Gubitak energije pri skladištenju vodika može se smanjiti razvojem nove klase lakih kompozitnih cilindara. Štoviše, glavni problem koji se sastoji od konvencionalnih materijala za spremnik vodika pod visokim tlakom je krhkost materijala cilindra tijekom brojnih ciklusa punjenja/praznjenja. (Krishna, i dr., 2021)

## **Ukapljivanje**

Gustoća energije vodika može se poboljšati skladištenjem vodika u tekućem stanju. Ova se tehnologija razvila tijekom ranog svemirskog doba (u pedesetim godinama 20. stoljeća), budući da se tekući vodik donosio na svemirske brodove, ali se danas koristi na gorivim ćelijama na brodu. Također je moguće kombinirati tekući vodik s metalnim hidridom, poput Fe-Ti, i na taj način minimizirati gubitke vodika zbog ključanja. (Krishna, i dr., 2021)

U ovoj metodi skladištenja, prva plinska faza se komprimira pri visokom tlaku, a zatim ukapljuje na kriogenoj temperaturi u spremniku tekućeg vodika ( $H_2$ ). Stanje niske temperature održava se pomoću cilindra s tekućim helijem. Vodik se ne ukapljuje sve do  $-253^\circ C$  (20 stupnjeva iznad apsolutne nule). Međutim, preostaju problemi sa spremnicima  $H_2$  zbog isparavanja vodika, energija potrebna za ukapljivanje vodika, volumen, težina i troškovi spremnika također su vrlo visoki. Oko 40 % energetskeg sadržaja vodika može se izgubiti zbog načina skladištenja. Sigurnost je također drugi problem pri rukovanju tekućim vodikom, kao i materijal spremnika automobila, prilikom skladištenja, pritiska i hlađenja elementa na tako ekstremne temperature. (Krishna, i dr., 2021)

## **Hidridi metala**

Kao što je gore spomenuto, zasigurno postoje neki praktični problemi, koji se ne mogu zaobići, poput sigurnosnih pitanja (za zadržavanje pod visokim tlakom) i ključanja (za skladištenje tekućine). Postoji treće potencijalno rješenje za skladištenje vodika u obliku metalnih hidrida.

U slučaju fizikalne apsorpcije, vodikov kapacitet materijala proporcionalan je njegovoj specifičnoj površini. Skladištenje adsorpcijom privlačno je jer ima potencijal smanjiti ukupni tlak u sustavu za ekvivalentnu količinu vodika, dajući sigurnije uvjete rada. Prednosti ovih metoda su u tome što se napuštaju volumetrijska i kriogena ograničenja. Posljednjih desetljeća razvijene su i istražene mnoge vrste materijala za skladištenje vodika, uključujući legure za skladištenje vodika, metalne nitride i amide. (Krishna, i dr., 2021)

Osim spomenutih, postoje još neki načini skladištenja vodika također u hidridima, no ne nužno hidridima metala, nego hidridima lužina. Ipak, ti su procesi iznimno rijetki zbog previsoke razine tehnologije koja je potrebna. (Krishna, i dr., 2021)

Iako su tehnologije povezane sa skladištenjem vodika iznimno složene i donekle učinkovite, ostaje još puno mjesta za napredak, a neki autori smatraju kako je skladištenje vodika usko grlo u procesu masovnog primjenjivanja vodika kao energenta. (Krishna, i dr., 2021)

### **2.3. Transport vodika**

Vodik nije samo najmanji element na zemlji, već je i najlakši - usporedbe radi, masa jednog galona benzina je približno 2,75 kg, pri čemu jedan galon vodika ima masu od samo 0,00075 kg (pri tlaku od 1 atm i 0°C). (Wulf, i dr., 2018) Mjesto proizvodnje vodika može imati veliki utjecaj na cijenu i najbolji način isporuke. Na primjer, veliko postrojenje za proizvodnju vodika u startu može proizvesti vodik po nižoj cijeni jer proizvodi više, ali isporuka vodika košta više ako je mjesto uporabe udaljenije. (Wulf, i dr., 2018) Danas se vodik transportira od mjesta proizvodnje do mjesta korištenja putem cjevovoda i preko ceste u kriogenim kamionima cisternama s tekućinom ili prikolicama s plinskim cijevima. Cjevovodi se postavljaju u regijama sa znatnom potražnjom (stotine tona dnevno) za koje se očekuje da će ostati stabilne desetljećima. Postrojenja za ukapljivanje, cisterne za prijevoz tekućine i prikolice s cijevima raspoređene su u regijama gdje je potražnja manja ili u porastu. Pokušavaju se i isporuke vodika putem kemijskih nosača (u obliku hidrida). Takvi su pokušaji uglavnom povezani s velikim izvoznim tržištima. (Wulf, i dr., 2018) Prije korištenja vodika dodatne infrastrukturne komponente koje se obično primjenjuju uključuju kompresiju, skladištenje, dozatore, brojila i tehnologije otkrivanja i pročišćavanja onečišćenja. Na primjer, od stanica koje se postavljaju za ispuštanje vodika u vozila sa gorivim ćelijama srednjih i velikih opterećenja očekuje se da će sabiti vodik na tlak od 350–700 bara i ispuštati do 10 kg/min. Trenutno se razvijaju visokopropusne tehnologije koje zadovoljavaju ove zahtjeve. (Wulf, i dr., 2018)



Danas se vodik transportira na tri načina:

**Pomoću cjevovoda** - Vodovodni cjevovodi izrađeni su od metala ili plastike i koriste se za distribuciju vodika bilo putem postojeće infrastrukture prirodnog plina ili izgradnjom novih cjevovoda isključivo za transport vodika. Izgradnja novih cjevovoda vodika zahtijeva velika ulaganja unaprijed, ali je to možda najjednostavniji način distribucije plina. Gradnjom nove infrastrukture učinkovitost, sigurnost i brzina prijenosa vodika mogu se značajno povećati. Vodik, za razliku od prirodnog plina, može se prenositi putem cijevi koje su pod visokim tlakom što omogućava vrlo brz prijenos. S druge strane, korištenje postojeće infrastrukture prirodnog plina uključuje niže početne troškove, ali zahtijeva pažljivo praćenje kako bi se osiguralo da postoji točan udio vodika u mješavini plina. Također zahtijeva ulaganje u dodatnu tehnologiju za odvajanje vodika od prirodnog plina po dolasku na odredište. (Wulf, i dr., 2018)

**Pomoću kamiona** - Ovaj pristup koristi veliki spremnik (sličan benzinu, ali s posebnom opremom zbog visokog tlaka) ili jedinice male i srednje veličine okružene kavezom za dodatnu sigurnost. Visoki tlak koji se mora osigurati pri prijevozu izaziva velike opasnosti u bilo kakvoj prometnoj nesreći. (Wulf, i dr., 2018)

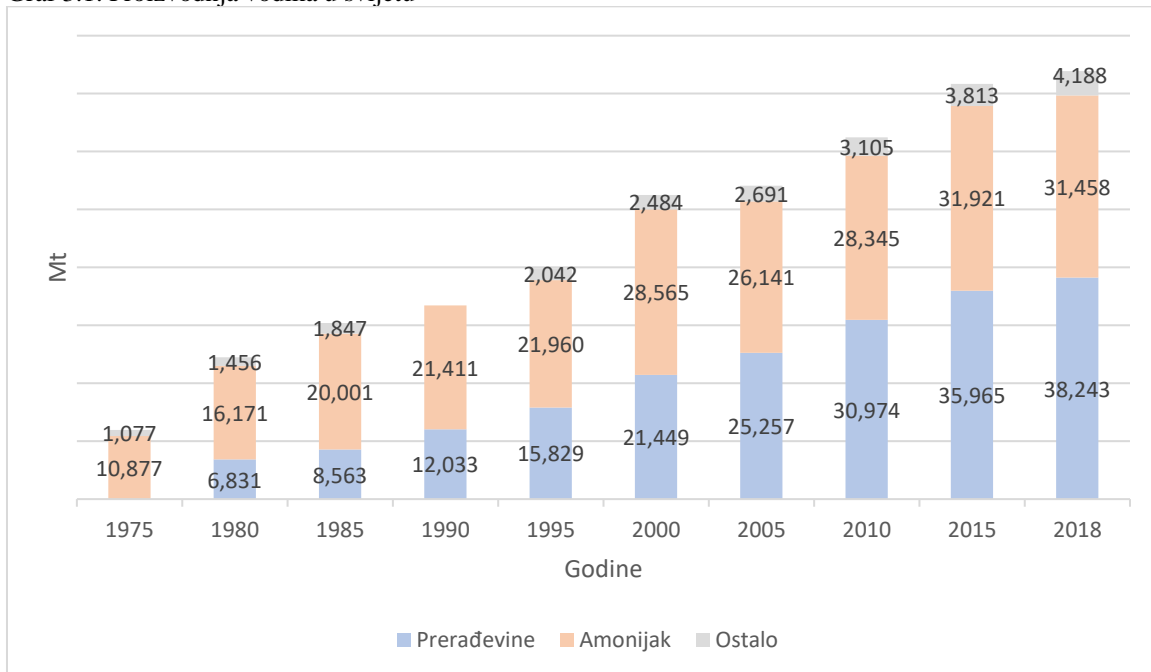
**Pomoću kontejnera** - Posebni spremnici za skladištenje dizajnirani su za držanje ukapljenog ili komprimiranog vodika. Ovi spremnici moraju biti izdržljivi jer je kvar spremnika potencijalno eksplozivan. (Wulf, i dr., 2018)

### 3. TRANZICIJA NA VODIKOVU EKONOMIJU

Na zahtjev vlade Japana, kao zemlje koja predsjedava G20, Međunarodna agencija za energiju izradila je izvješće za analizu trenutnog stanja vodika i za davanje smjernica o njegovu budućem razvoju. Izvješće otkriva da čisti vodik trenutno doživljava izniman zamah, a broj politika i projekata u svijetu brzo se širi. Zaključuje da je sada vrijeme za povećanje tehnologija i smanjenje troškova kako bi se omogućila široka uporaba vodika. (The Future of Hydrogen, 2019) Vodik i energija imaju dugu zajedničku povijest - pokretanjem prvih motora s unutarnjim izgaranjem prije više od 200 godina postao je sastavni dio moderne rafinerijske industrije. Lagan je za skladištenje, energetski gust i ne proizvodi izravne emisije onečišćujućih tvari ili stakleničkih plinova. No, kako bi vodik dao značajan doprinos prijelazima na čiste energije, potrebno ga je usvojiti u sektorima gdje je gotovo potpuno odsutan, poput transporta, grijanja i proizvodnje energije. (The Future of Hydrogen, 2019)

Graf 3.1. Pokazuje koliko je vodika bilo potrebno u svijetu između 1975. i 2018. Sve vrijednosti izražene su u Mt odnosno u milijunima tona.

Graf 3.1. Proizvodnja vodika u svijetu



Izvor: Izvješće *The Future of Hydrogen*, Japan, 2018.

Svjetske potrebe za vodikom neprestano rastu. Plavom bojom prikazan je vodik koji se koristi u procesu rafiniranja odnosno vodik koji se koristi za pokretanje različitih motora, pretežno onih za prijevoz, no najvećim dijelom odnosi se na vodik koji se koristi u različitim industrijama. Narančastom je bojom prikazan vodik koji se koristi za proizvodnju amonijaka. Amonijak se koristi u gotovo svim rashladnim uređajima, za proizvodnju u farmaceutskoj industriji, no najznačajnija primjena amonijaka je u proizvodnji umjetnih gnojiva. (Sikirica & Korpar-Čolig, 2005) Sivom bojom prikazana je količina vodika koja se koristi u ostale svrhe. U prvom su redu to znanstvene i istraživačke svrhe. Korištenje vodika povećava se u svim segmentima, no zanimljivo je primijetiti kako se 2010. vodik počeo u većoj mjeri koristiti u proizvodnji fosilnih goriva, nego za proizvodnju amonijaka. Do 2018. udio vodika koji se koristi za proizvodnju fosilnih goriva se još više povećao.

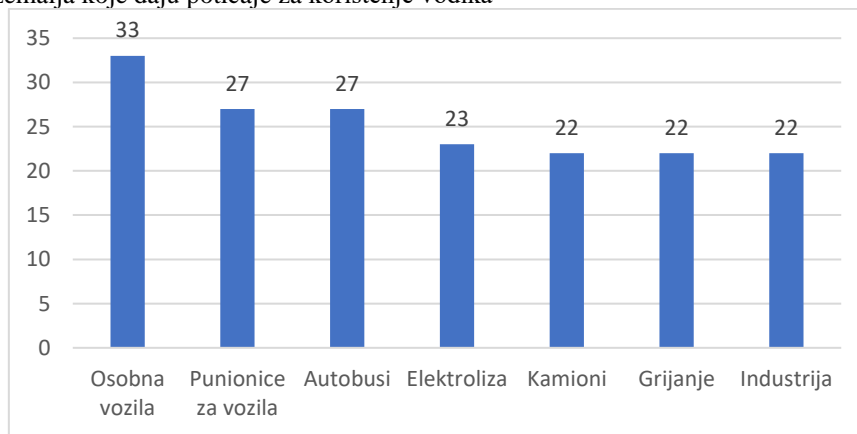
Opskrba vodikom industrijskim korisnicima sada je veliki izazov u cijelom svijetu. Potražnja za vodikom, koja je porasla više od tri puta od 1975., nastavlja rasti. Gotovo u potpunosti se proizvodi fosilnim gorivima, pri čemu 6% svjetskog prirodnog plina i 2% svjetskog ugljena ide na proizvodnju vodika. Kao posljedica toga, proizvodnja vodika odgovorna je za emisije CO<sub>2</sub> od oko 830 milijuna tona ugljičnog dioksida godišnje, što je ekvivalentno emisiji CO<sub>2</sub> u

Ujedinjenom Kraljevstvu i Indoneziji zajedno. To zasigurno predstavlja velik problem u proizvodnji vodika. (The Future of Hydrogen, 2019)

Broj zemalja s politikama koje izravno podržavaju ulaganja u vodikove tehnologije raste, zajedno s brojem sektora kojima su potpore namijenjene. Najveći se dio poticaja za korištenje vodika kao izvora energije koristi u prometu. Kako za privatne korisnike i velika poduzeća tako se i za znanost o proučavanju vodika daju sve veći poticaji. Ipak, još uvijek su poticaji niži od onih koji su se nudili prije desetak godina u svrhe istraživanja.

Graf 3.2. prikazuje koliko država u svijetu daju poticaje i za koju svrhu u proizvodnji i korištenju vodika industrijskim i privatnim korisnicima.

Graf 3.2. Broj zemalja koje daju poticaje za korištenje vodika



Izvor: Izvješće *The Future of Hydrogen*, Japan, 2018.

Najveći broj država daje poticaj za korištenje vodika kao goriva za osobna vozila, a poticaji se daju još za otvaranje punionica za vozila pokretana na vodik, javni autobusni prijevoz, industrijsko korištenje elektrolize, masovni kamionski transport, grijanje i industriju.<sup>2</sup>

Kako je već rečeno, vodik se može ekstrahirati iz fosilnih goriva i biomase, iz vode ili iz njihove mješavine. Prirodni plin trenutno je primarni izvor proizvodnje vodika, što čini oko tri četvrtine godišnje globalne namjenske proizvodnje vodika od oko 70 milijuna tona. To čini oko 6% globalne potrošnje prirodnog plina. Iza plina slijedi ugljen, zbog njegove dominantne uloge u Kini, a mali dio se proizvodi korištenjem nafte i električne energije.

Na cijenu proizvodnje vodika iz prirodnog plina utječe niz tehničkih i ekonomskih čimbenika, pri čemu su cijene plina i kapitalni izdaci dva najvažnija.

<sup>2</sup> U skladu s dokumentom Europske komisije, Europska strategija za vodik iz 2021. sve zemlje članice Europske unije dobivaju poticaje za korištenje vodika za neke od gore navedenih svrha čime je obuhvaćena i Republika Hrvatska. Više o tome u narednim poglavljima.

Troškovi goriva najveća su sastavnica troškova i čine između 45% i 75% troškova proizvodnje. Niske cijene plina na Bliskom istoku, u Rusiji i Sjevernoj Americi uzrokuju neke od najnižih troškova proizvodnje vodika. Uvoznici plina poput Japana, Koreje, Kine, Europske unije i Indije moraju se boriti s višim uvoznim cijenama plina, a to dovodi do većih troškova proizvodnje vodika. (The Future of Hydrogen, 2019)

Danas se, u prijelazu na vodik kao izvor energije, vodik najviše koristi u:

- Industriji - Korištenjem vodika danas dominira industrija, naime: rafiniranje ulja, proizvodnja amonijaka, proizvodnja metanola i proizvodnja čelika. Gotovo sav ovaj vodik opskrbljuje se fosilnim gorivima, pa postoji značajan potencijal za smanjenje emisija iz čistog vodika.
- Transportu - U transportu, konkurentnost automobila na vodikove gorivne ćelije ovisi o troškovima gorivih ćelija i benzinskim postajama, dok je za kamione prioritet smanjenje isporučene cijene vodika. Dostava i zrakoplovstvo imaju ograničene mogućnosti goriva s niskim udjelom ugljika i predstavljaju priliku za goriva na bazi vodika.
- Grijanju - U zgradama bi se vodik mogao uklopiti u postojeće mreže prirodnog plina, s najvećim potencijalom u obiteljskim neboderima i poslovnim zgradama, osobito u gusto naseljenim gradovima, dok bi dugoročni izgledi mogli uključivati izravnu uporabu vodika u kotlovnica na vodik.
- Proizvodnji energije - U proizvodnji energije vodik je jedna od vodećih opcija za skladištenje obnovljive energije, a vodik i amonijak mogu se koristiti u plinskim turbinama za povećanje fleksibilnosti elektroenergetskog sustava. Amonijak bi se također mogao koristiti u elektranama na ugljen kako bi se smanjile emisije.

Vodik se već naširoko koristi u nekim industrijama, ali još nije prepoznat potencijal da vodik može pomoći prijelazu na čiste izvore energije.

IEA (International Energy Agency) je identificirala četiri lanca (industrija, promet, grijanje i proizvodnja energije) vrijednosti koji nude odskočne daske za povećanje ponude i potražnje vodika, nadograđujući se na postojeće industrije, infrastrukturu i politike. Vlade i drugi dionici moći će identificirati koji od ovih nudi najveći kratkoročni potencijal u svom geografskom, industrijskom i energetsom sustavu.

Bez obzira na to koja se od ove četiri ključne prilike koristi - ili drugi lanci vrijednosti koji ovdje nisu navedeni - bit će potreban cijeli paket političkih mjera koje bi trebale omogućiti kvalitetan prijelaz na vodik kao glavni izvor energije. (The Future of Hydrogen, 2019)

### 3.1. Vodik u energetskej politici i strategiji Europske unije i Hrvatske

Europska komisija želi učiniti EU pionirima u korištenju vodika kao prijenosnika energije. Godine 2020. predstavila je svoju strategiju vodika („Strategija vodika za klimatski neutralnu Europu“), čiji je cilj omogućiti široku uporabu vodika do 2050. godine. Prioritet će imati zeleni vodik, koji će se proizvoditi iz obnovljivih izvora energije; međutim, drugi proizvodni procesi, npr. korištenje prirodnog plina kao sirovine ili drugih goriva, također bi se trebali promicati na prijelaznoj osnovi. (Umbach, 2021)

S provedbom vodikove strategije Europska komisija obećava postići različite ciljeve:

- Postizanje ugljično neutralne EU dekarbonizacijom sektora koji nisu dostupni izravnoj elektrifikaciji;
- Bolja integracija energije vjetrova i Sunca s vodikom kao skladišnim medijem;
- Prevladavanje ekonomske štete uzrokovane blokadom Covid-19, osobito pružanjem značajnih subvencija za gospodarstvo vodika iz Sporazuma o oporavku EU-a;
- Otvaranje novih radnih mjesta unutar vodikove ekonomije;
- Suzbijanje uzroka migracija stvaranjem lanaca opskrbe sa zemljama izvan EU-a u okviru vanjske energetske politike EU-a.
- Strategija vodika rezultat je paradigme zbog sumnji u dekarbonizaciju Europske unije isključivo izravnom elektrifikacijom i obnovljivom električnom energijom. Osim toga, vodik bi trebao pomoći u integraciji dosad loše dekarboniziranih sektora kao što su industrija, mobilnost (kamioni/navigacija/zrakoplovstvo) i građevinski sektor. (Umbach, 2021)

Europska unija vodik smatra središnjim elementom svoje nove „Strategije integracije energetskeg sustava“. Prioritet je razvoj čistog, obnovljivog vodika s kumulativnim ulaganjima između 180 i 470 milijardi eura u Europi do 2050. Bruxelles se nada da će zeleno vodikovo gospodarstvo otvoriti 1 milijun novih radnih mjesta za visokokvalificirano osoblje u EU do 2030. godine. (Umbach, 2021)

Njemačka strategija vodika u lipnju 2020. predviđa financiranje projekata Zelenog vodika do devet milijardi eura. Sedam milijardi eura ulaže se na vlastito nacionalno tržište, dok je dodatnih dvije milijarde eura dogovoreno za projekte vodika u Ukrajini i Sjevernoj Africi (Maroko), u pokušaju stvaranja partnerstva jer bi buduća proizvodnja zelenog vodika mogla biti isplativija izvan Europe nego u samoj Njemačkoj. Za 2030. u Njemačkoj planirano je proizvesti do pet GW kapaciteta uređaja za elektrolizu. Međutim, to je i dalje najskuplja opcija. Neki stručnjaci

i dalje zamišljaju zeleni vodik iz isprekidanih obnovljivih izvora kao temeljno neučinkovitu, neekonomsku iluziju. (Europska komisija, 2021).

Za elektrolizu vode potrebna je dovoljna količina vode, čista opskrba električnom energijom i dovoljno prostora za opsežno širenje obnovljive energije, poput solarne energije i energije vjetra. Vodikove strategije EU-a i Njemačke već su priznale da neće moći isporučiti dovoljno vodika za svoje energetske transformacije, jer s obzirom na veliku gustoću stanovništva Europe nema dovoljno prostora, iako bi Španjolska i nekoliko drugih zemalja EU-a mogle postati neto izvoznici vodika. Na primjer, ukupna njemačka potrošnja vodika mogla bi se popeti sa sadašnjih 50TWh<sup>3</sup> na 90-110TWh do 2030. godine, te na 1.800-2.500TWh do 2050. Samo kemijski sektor čini oko 600TWh potražnje za vodikom. Bez obzira na to, ukupna njemačka proizvodnja električne energije u 2019. godini iznosila je samo 511TWh, dok je njezin udio obnovljivih izvora energije bio samo 243TWh. Federacija njemačke industrije (BDI) predviđa uveznu potražnju za vodikom od 340TWh. Druga istraživanja predviđaju još veću uveznu potražnju. Kao jednu od mogućih opcija, Njemačka vidi otvaranje suradnje s Turskom. (Daily Sabah, 2021)

Proširenje europske proizvodnje i proizvodnje vodika u cijelom svijetu stvorit će nove lance vrijednosti i opskrbe, kao i transportne putove uz ambicioznu europsku proizvodnju baterija i povećanu uveznu ovisnost o kritičnim sirovinama. Stoga će uspostaviti nove geopolitičke pobjednike i gubitnike, a rezultirat će i novim izazovima za sigurnost opskrbe energijom, poput povećanja ovisnosti o novim nestabilnim proizvođačima vodika. Dakle, geopolitičke implikacije za budućnost zelenog ili plavog vodika različite su za uveznike i izvoznike vodikove mreže. (Europska komisija, 2021)

Troškovi goriva za proizvodnju vodika najveći su faktor troškova. Oni čine 45-75 posto ukupnih troškova proizvodnje. Niske cijene plina na Bliskom istoku, u Rusiji i SAD -u mogle bi ove zemlje učiniti pobjednicima, dok bi se Japan, Kina i Indija - s višim uveznim cijenama plina (LPG) - mogle pretvoriti u gubitnike. Međutim, to ovisi o budućim opadanjem troškova proizvodnje potaknutim tehnološkim inovacijama, političkom potporom, raznolikošću svjetske ponude i ograničavajućim geopolitičkim čimbenicima. Tirkizni vodik s plinskom pirolizom mogao bi se pokazati isplativom opcijom, no ova tehnologija je još uvijek u ranoj fazi. (Umbach, 2021)

EU aktivno nastoji poboljšati otvorenu stratešku autonomiju za alternativne izvore energije, želi postati tržišno konkurentnija i izbjeći neželjene ekonomske i geopolitičke ovisnosti od

---

<sup>3</sup> TWh – Tera Watt sati

autoritarnih zemalja (poput Rusije i Kine, između ostalih). Vodik nudi nove mogućnosti suradnje između demokratskih zemalja G20, poput Australije, koja ima jedinstvene uvjete da postane vodeća zemlja u obnovljivim izvorima energije i supersila vodika. Međutim, dugi pomorski prijevozni putevi za izvoz vodika u Europu mogli bi se pokazati skupim i dovesti do sigurnosnih rizika na moru, poput blokada pojedinih prometnih točaka, što je nedavno doživljeno u Sueskom kanalu. Dok Mali u Africi može proizvoditi prirodni vodik (bijeli vodik), raširene političke nestabilnosti spriječile su sva veća strana ulaganja u posljednjih nekoliko godina. EU i Njemačka identificirale su Maroko kao jednu od najvažnijih partnerskih zemalja vodika s obzirom na ambiciozne planove za solarne elektrane. Ipak, sadašnji bilateralni diplomatski odnosi između Maroka i Njemačke dramatično su se pogoršali zbog različitih stavova u pogledu Zapadne Sahare i nove nacionalističke politike u Maroku. (Umbach, 2021)

U Europskoj uniji postoji jasna inicijativa za to da Europska unija bude svjetski voditelj u korištenju vodika kao izvora energije, no još uvijek postoje brojni izazovi u tome. Kako bi se proizveo jedan kilogram vodika iz zemnog plina, dakle, uz oslobađanje ugljikova dioksida, potrebno je utrošiti oko 1.5 eura. Za proizvodnju vodika iz obnovljivih izvora energije ili za proizvodnju ekološki neutralnog vodika potrebno je utrošiti 2.5 do 5 eura. Na količinu vodika koja je u ovom trenutku potrebna neisplativo je proizvoditi ekološki neutralni vodik, a kako bi se količina potrebnog vodika sve više povećavala, tako bi i razlika u cijeni proizvodnje postajala sve značajnija. (Europska komisija, 2021)

Postoji nekoliko financijskih instrumenata koji se mogu koristiti za proizvodnju vodika u Europskoj uniji. U tu je svrhu osnovana i posebna komisija unutar Europske unije.

Komisija će pratiti provedbu preporuka utvrđenih u izvješću Strateškog foruma o važnim projektima od zajedničkog europskog interesa (IPCEI) za promicanje koordiniranih ili zajedničkih ulaganja i mjera za poticanje lanca opskrbe vodikom u više država članica.

Osim toga, u okviru novog instrumenta za oporavak Next Generation EU kapaciteti programa InvestEU udvostručit će se. Na taj će se način poticati privatna ulaganja koja će potaknuti uporabu vodika. (Europska komisija, 2021)

Više je država članica vodik iz obnovljivih izvora proizveden uz niske emisije ugljika uključilo kao strateški element u svoje nacionalne energetske i klimatske planove. Oni će se morati uzeti u obzir pri izradi nacionalnih planova za oporavak i otpornost u okviru novog mehanizma za oporavak i otpornost. (Europska komisija, 2021) Osim toga, Europski fond za regionalni razvoj i Kohezijski fond, za koje će se izdvojiti dodatna sredstva u okviru nove inicijative REACT-EU, i dalje će biti izvor potpore za zelenu tranziciju. Trebalo bi u potpunosti istražiti i mogućnosti koje se nude regijama s visokim emisijama ugljika u okviru mehanizma za

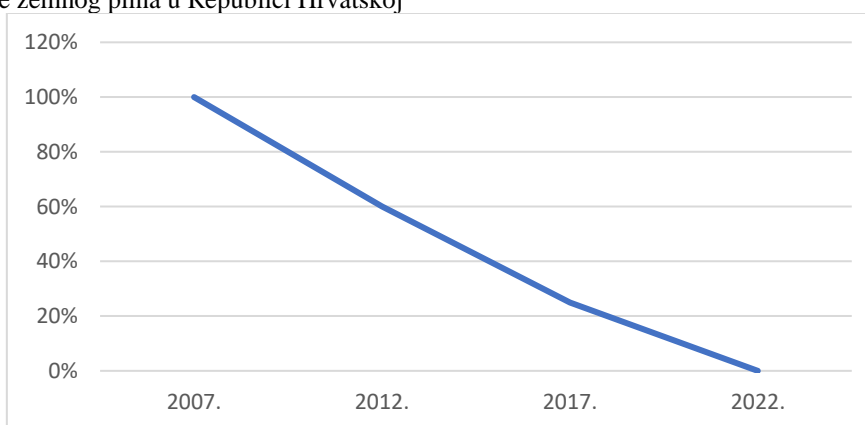
pravednu tranziciju. (Europska komisija, 2021) Za financiranje namjenske infrastrukture za vodik, prenamjenu plinskih mreža, projekte hvatanja ugljika i stanice za opskrbu vodikom iskoristit će se sinergije Instrumenta za povezivanje Europe u području energetike i Instrumenta za povezivanje Europe u području prijevoza. (Europska komisija, 2021) Inovacijski fond za sustav EU-a za trgovanje emisijama, u okviru kojeg će se u razdoblju 2020. – 2030. prikupiti oko 10 milijardi eura za tehnologije s niskom razinom emisija ugljika, mogao bi potaknuti nove projekte za demonstraciju inovativnih tehnologija koje se temelje na vodiku. Prvi poziv na podnošenje prijedloga u okviru Fonda objavljen je 3. srpnja 2020. (Europska komisija, 2021)

### 3.1.1. Vodik u energetskej strategiji Republike Hrvatske

Unutar Republike Hrvatske legislativna regulacija energetske strategije i razvoja stvorena je sukladno članku 5. stavku 3. Zakona o energiji 5. veljače 2020. strategija za energetski razvoj Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. (Narodne novine, 2020) Među glavnim odrednicama vezanim uz Strategiju, nalaze se i upute vezane uz proizvodnju vodika. Kao primarni je cilj postavljena izgradnja infrastrukture koja će omogućiti razvoj ekološki neutralnih izvora energije, a u skladu s tim i tehnologija koja će omogućiti i podržati takvu infrastrukturu. (Narodne novine, 2020) U istom je strateškom planu istaknuto kako su rezerve nafte koje Republika Hrvatska posjeduje u neprestanom padu od 2007. godine, a rezerve plina 2017. svedene su na svega 25% iznosa iz 2007. (Narodne novine, 2020)

Graf 3.3. prikazuje poznate zalihe zemnog plina u Republici Hrvatskoj.

Graf 3.3. Zalihe zemnog plina u Republici Hrvatskoj



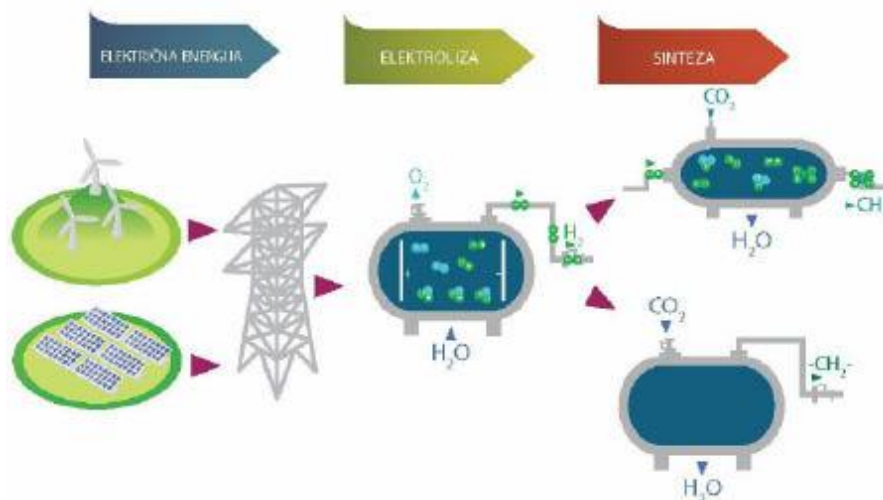
**Izvor:** Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu., u: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_03\\_25\\_602.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_25_602.html).

Ukoliko se količina plina prikaže dijagramom tijekom projekcije su takve da će do 2022. u potpunosti nestati poznate zalihe zemnog plina što će Hrvatsku dovesti u još nepovoljniji



energetski položaj. Kako do toga ne bi došlo, unatoč tome što se intenzivno radi na sustavnoj dekarbonizaciji, investirat će se i u nova istraživanja tla što bi trebalo rezultirati pronalaskom novih rezervi. (Narodne novine, 2020) Jedno od mjesta gdje Strategija predlaže implementaciju vodika je i u prometu. „Osim intenzivne elektrifikacije voznog parka, osnovne odrednice promjena u sektoru prometa su razvoj infrastrukture za korištenje UPP-a u prometu uzimajući u obzir očekivano povećanje korištenja UPP-a u teškom teretnom prometu, pomorskom prometu i željezničkom prometu, kao i povećanje korištenja naprednih biogoriva, povećanje udjela teretnog prometa ostvarenog željezničkim prijevozom, povećanje udjela SPP/SBM te vodika.“ (Narodne novine, 2020) Sukladno uvođenju drugih oblika goriva te procesu dekarbonizacije, očekuje se značajno smanjenje korištenja fosilnih goriva u Republici Hrvatskoj. (Narodne novine, 2020) U energetske strategiji prema kojoj ide Republika Hrvatska, najviše se očekuje iskoristiti vodik u samoj proizvodnji energije. Tako u poglavlju o proizvodnji energije stoji: „Dugoročno promatrano, važnu ulogu u ostvarenju energetske tranzicije imat će nove tehnologije proizvodnje vodika, metana i tekućih goriva iz električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora. To su *power to liquids* (PtL) tehnologija za proizvodnju tekućih goriva poput npr. mlaznog ili dizelskog goriva, odnosno *power to gas* (P2G) tehnologija za proizvodnju vodika i metana, korištenjem električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora. Plinovita i tekuća goriva proizvedena spomenutim tehnologijama bit će neizostavni oblici energije u onim područjima gdje je direktno korištenje električne energije ograničeno, poput avionskog, pomorskog i cestovnog teretnog prometa te u određenim industrijskim procesima. Trenutačno se ove tehnologije primjenjuju na razini pilot i demonstracijskih projekata, a može se očekivati da će u budućnosti imati važnu ulogu, prije svega u segmentu uporabe plina.“ (Narodne novine, 2020)

Slika 3.1. Shematski prikaz *power to gas* i *power to liquid* tehnologija



Izvor: Strategija eneretskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu., u: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_03\\_25\\_602.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_25_602.html).

Dalje nastavlja: „Općenito, na putu prema energiji bez emisija, vodik treba uzeti u obzir kao važno gorivo budućnosti. Pri tome i CCS tehnologija (izdvajanja i spremanja ugljikovog dioksida) može imati značajnu ulogu u tranziciji. Usprkos dosadašnjim, ne sasvim zadovoljavajućim rezultatima u istraživanjima korištenja CCS tehnologije, realno je očekivati da će povećanje cijena emisijskih jedinica ohrabriti novu etapu istraživanja i rezultirati sigurnosno i komercijalno zadovoljavajućim rezultatima, otvarajući dalje prostor dugoročnom razvoju održive globalne energetike na bazi vodika.“ (Narodne novine, 2020)

Može se reći kako je vlada Republike Hrvatske svjesna nepovoljnog položaja Hrvatske po zalihama fosilnih goriva. Sukladno tome, Hrvatskoj iznimno odgovara politika Europske unije koja je usmjerena potpunom napuštanju fosilnih goriva kao izvora energije. Ključnu ulogu u energetske strategiji Republike Hrvatske imat će obnovljivi izvori energije.

U okviru energetske strategije i vodik zauzima značajno mjesto jer se očekuje da će se proizvoditi iz obnovljivih izvora energije, a koristit će se u sektoru prometa, tehnologija i proizvodnje toplinske energije.

### 3.2. Infrastruktura kao preduvjet vodikove ekonomije

Čini se kako će vodik imati ključnu ulogu u klimatski neutralnim gospodarstvima budućnosti, što je pokazano u mnogim novijim scenarijima i putokazima. U sustavu u kojem dominiraju obnovljivi izvori energije, poput sunca i vjetera, vodik povezuje električnu energiju s industrijskom toplinom, materijalima poput čelika, kemijskim proizvodima poput gnojiva,

grijanjem prostora i transportnim gorivima. (Moreno-Benito, Agnolucci, & Papageorgiou, 2017) Nadalje, kako je ranije rečeno, vodik se može sezonski skladištiti i isplativo transportirati na velike udaljenosti brodom ili cjevovodom. Obnovljivi vodik u kombinaciji s obnovljivom električnom energijom ima potencijal dugoročno u potpunosti zamijeniti ugljikovodike. (Moreno-Benito, Agnolucci, & Papageorgiou, 2017) Nažalost, tranzicija na ekonomiju vodika kratkoročno do srednjeročno bila bi ovisna o dobivanju vodika pomoću ugljika zbog cijene proizvodnje, ali i dok se ne izgradi podržavajuća infrastruktura za proizvodnju ekološki neutralnog vodika pomoću obnovljivih izvora energije te proizvodnje čistog vodika. (Mulder, Hetland, & Lenaers, 2007) Godine 2020. pojavile su se vodikove strategije u mnogim zemljama i regijama diljem svijeta: Japanu, Južnoj Koreji, Australiji, Čileu, Maroku, Kini, Rusiji, Saudijskoj Arabiji, Austriji, Francuskoj, Njemačkoj, Nizozemskoj, Norveškoj, Portugalu, Španjolskoj... u tim su zemljama izdvojene velike količine novca koje bi trebale poslužiti kao poticaj za prelazak na vodikovu ekonomiju koja je još uvijek neisplativa, no dugoročno će zasigurno postati isplativa. (Technology, 2020)

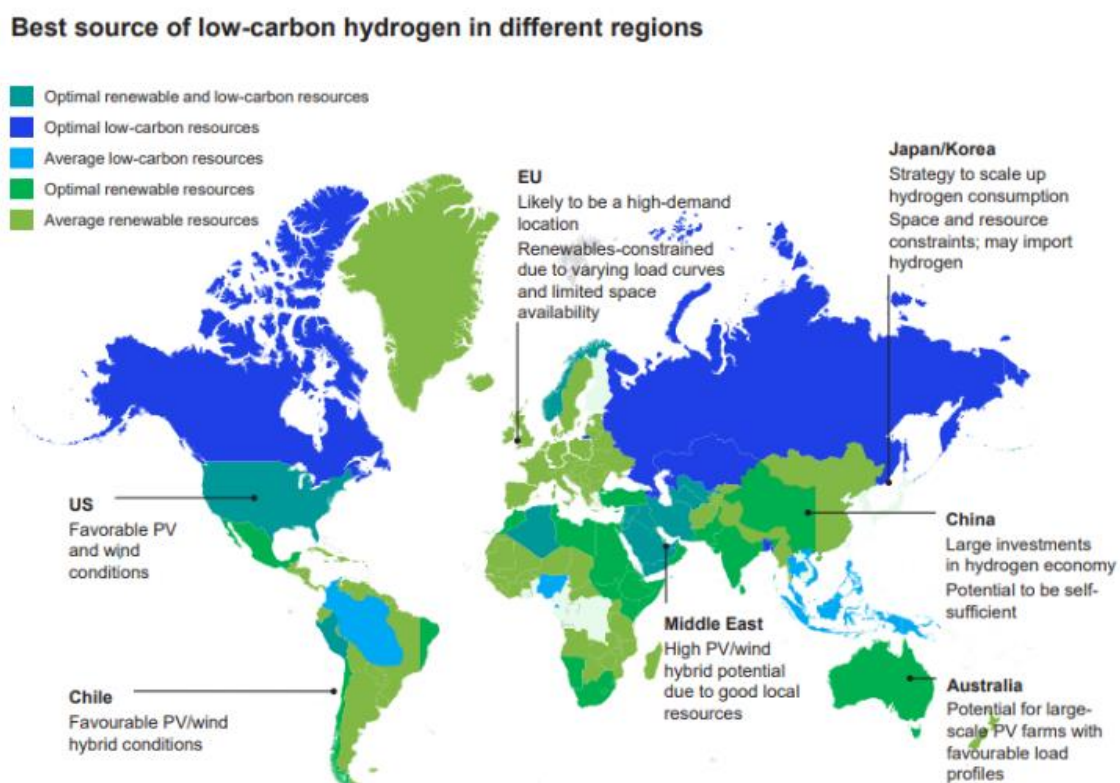
U Europi, što je najvažnije, 8. srpnja 2020. Europska komisija objavila je Strategiju vodika za klimatski neutralnu Europu, kao dio svog Europskog zelenog dogovora. (Europska komisija, 2021.) Strategija postavlja cilj od milijun tona godišnje vodika i elektrolizera kapaciteta šest gigavata (GW) 2024., te 10 milijuna tona godišnje i  $2 \times 40$  GW do 2030. godine. (Europska komisija, 2021.)  $2 \times 40$  GW odnosi se na izvješće koje je *izdalo Hydrogen Europe: Hydrogen for a European Green Deal*, inicijativa  $2 \times 40$  GW. Ovo izvješće ocrtava putokaz za proizvodnju zelenog vodika do 2030. godine, pri čemu se 40 GW kapaciteta elektrolizera nalazi u zemljama EU-a, a 40 GW u susjednim zemljama, s naglaskom na sjevernu Afriku. (Europska komisija, 2021.) Važno je prepoznati važnost proizvodnje zelenog vodika na mjestima s dobrim solarnim i vjetrovitim resursima. Samo na tim dobrim mjestima obnovljivih izvora može se proizvesti jeftin zeleni vodik koji se može natjecati s današnjim fosilnim vodikom, a dugoročno čak i s prirodnim plinom. (Moreno-Benito, Agnolucci, & Papageorgiou, 2017) (Ovdje valja spomenuti i tendenciju Republike Hrvatske da svoje elektrolizere gradi u blizini mjesta na kojima se električna energija proizvodi iz obnovljivih izvora energije. (Narodne novine, 2020)) Naravno, smanjenje troškova elektrolizera CAPEX i OPEX važno je, ali električna energija je dominantni faktor troškova. S učinkovitošću pretvorbe od 50 kWh po kilogramu vodika, svaki cent po kWh električne energije dodaje 50 centi/kg vodika ukupnim troškovima vodika. (Moreno-Benito, Agnolucci, & Papageorgiou, 2017) Zanimljivo je primijetiti kako u klimatski neutralnim zemljama postoji želja da se vodik nametne kao alternativa električnoj energiji, no

produkcija vodika uvelike ovisi o njoj. Isto tako, iako se vodik pokušava nametnuti kao alternativa ugljikovodičnim gorivima, trenutno su ona glavni izvor za njegovu proizvodnju.

Dobri solarni resursi mogu se pronaći u pustinjskim regijama, posebno oko tropa. Oceani i mora pružaju dobre resurse vjetra, ali dobri uvjeti vjetra mogu se pronaći i na kopnu na određenim lokacijama kao što su pustinja Sahara, Patagonija i određena obalna područja. (Muradov & Veziroglu, 2005) U Europi su najjeftiniji obnovljivi izvori hidroenergija u nordijskim zemljama i Alpama, vjetar na moru u Sjevernom moru, Baltičkom moru i nekim područjima Sredozemnog mora te vjetar na kopnu u odabranim područjima. Najbolji solarni resursi nalaze se u južnoj Europi. (Moreno-Benito, Agnolucci, & Papageorgiou, 2017) Iako mnoge regije u svijetu mogu proizvoditi obnovljivi i/ili niskougljični vodik po niskim cijenama, očito je da će određene regije postati neto izvoznici, a druge regije postat će neto uvoznici vodika, što je pokazalo Svjetsko vijeće za vodik i mnogi drugi. Čak će i unutar regija postojati trgovina, uvoz i izvoz vodika. (Moreno-Benito, Agnolucci, & Papageorgiou, 2017)

Slika 3.2. prikazuje optimalne izvore za proizvodnju niskougljičnog vodika u cijelom svijetu.

Slika 3.2. Optimalni izvori energije za proizvodnju vodika



Izvor: Hydrogen Council, Path to hydrogen competitiveness A cost perspective, 2020.

Za Sjedinjene Američke Države, kao i za cijeli kontinent može se reći da imaju vrlo povoljne uvjete za proizvodnju niskougljičnog vodika. Zahvaljujući mogućnosti da proizvede električnu energiju od vjetra, oceana i sunca te velikoj količini prostora, Sjeverna Amerika trebala bi imati velike mogućnosti u proizvodnji vodika. U Južnoj je Americi situacija nešto manje povoljna, no uvelike se može osloniti na proizvodnju električne energije iz vjetrova koji su snažni na zapadnoj obali kontinenta te vode koje su brze i imaju velik energetske potencijal, također na zapadnom dijelu kontinenta. Europska unija i cijela Europa, kako je gore navedeno, ima dobar potencijal za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, no zbog velikih potreba, a ograničenog prostora mogla bi dijelom biti ovisna o uvozu vodika. U Africi velik potencijal dolazi iz sunčeve energije te se mogu graditi fotonaponske farme. Kao i u Rusiji, u nekim dijelovima Afrike postoje nalazišta elementarnog vodika. U Rusiji također ima dovoljno prostora za skladištenje čime bi Rusija mogla postati među glavnim izvoznicima vodika. Kina ulaže jako velike količine sredstava u prelazak na vodikovu ekonomiju kako bi postala energetske neovisna, a to je moguće zahvaljujući dobrom prirodnom potencijalu i velikom prostoru. Veliki potrošači energije poput Japana i Južne Koreje mogli bi biti uvelike ovisni o uvozu vodika. Naposljetku, Australija ima potencijal da se nametne kao najveći svjetski proizvođač vodika. Osim što ulaže veliku količinu sredstava u infrastrukturu, zahvaljujući slaboj naseljenosti, a izvanrednoj klimi za proizvodnju električne energije iz fotonaponskih farmi, Australija bi mogla postati najveći svjetski proizvođač vodika. Najveći je problem transport. (Forsberg, 2007) Evidentno je da će Europska unija postati neto uvoznik jeftinog vodika, ne samo zbog svojih relativno skromnih obnovljivih izvora energije, već i zbog relativno ograničenog područja i velike gustoće naseljenosti. Nasuprot prostoru Europske unije, pustinja Sahara najsunčanije je područje na svijetu, a ima i vrlo dobra nalazišta vjetra. To područje veliko je, 9,4 milijuna četvornih kilometara, više nego dvostruko veće od Europske unije, dok je gustoća naseljenosti manja od jedne osobe po četvornom km, u usporedbi sa 117 osoba po četvornom km u EU.) Kao što je već napomenuto, troškovima proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora energije u svijetu dominiraju troškovi proizvodnje električne energije pa ih stoga uglavnom određuju raspoloživi obnovljivi izvori energije – gdje postoje obnovljivi izvori energije i prostor za skladištenje, ima smisla proizvoditi vodik. Međutim, troškovi proizvodnje nisu jedini faktor - moraju se uzeti u obzir i transportni i skladišni troškovi. Za vodik s osnovnim opterećenjem isporučen u željezaru, konkurencija u troškovima obično će se sastojati između lokalno proizvedenog obnovljivog vodika (iz sunčeve energije i vjetra), s lokalnim skladištem (npr. slane pećine) i ograničenog transporta cjevovodom i uvezenog vodika (putem broda) i cjevovodom ili eventualno samo na daljinskim cjevovodima, sa skladištem). (Van de Graaf,

Overland, Scholten, & Westphal, 2020) U oba slučaja (lokalna proizvodnja ili uvoz vodika), velika proizvodnja obnovljivih vodika s više GW odvijat će se na mjestu proizvodnje obnovljive energije, a ne na mjestu potražnje. Glavni razlog je taj što je transport vodika cjevovodom isplativiji (otprilike za deset puta) od transporta električne energije putem kabela. Također, tipično, kapaciteti cjevovoda (15-20 GW) mnogo su veći od kapaciteta električnih kabela (1-4 GW). (Van de Graaf, Overland, Scholten, & Westphal, 2020) Nadalje, transport vodika cjevovodom izbjegava ograničenja kapaciteta električne mreže uzrokovane integracijom povećane proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Kao primjer, 2018. je u Njemačkoj smanjena procijenjena snaga vjetra u vrijednosti od milijardu eura zbog nedostatnog kapaciteta prijenosne mreže. Dakle, umjesto transporta rasute električne energije, bilo bi isplativije transportirati vodik. Osim toga, vodik se, poput prirodnog plina, može skladištiti sezonski i stoga može poslužiti kao otpremljivi izvor velike količine energije, što je izrazita prednost u odnosu na električnu energiju. (Van de Graaf, Overland, Scholten, & Westphal, 2020) Stoga je potreban transnacionalni sustav plinovoda vodikovog plina koji omogućuje transport vodika s lokacija za proizvodnju vodika (s dobrim obnovljivim izvorima) do mjesta potražnje. Velika skladišta za skladištenje vodika (npr. Pomoću slanah pećina ili eventualno praznih plinskih polja) potrebno je integrirati u takav sustav za transport vodika kako bi se omogućila isporuka vodika u vrijeme kada on bude potreban. (Van de Graaf, Overland, Scholten, & Westphal, 2020) Takav sustav plinovoda s vodikovim plinovodom sa skladišnim prostorima izgleda vrlo slično kao i današnji sustavi cjevovoda s prirodnim plinom.

### **3.2.1. Dopremanje vodika u Europsku uniju**

Čini se kako bi za Europu ključno moglo biti povezivanje Europe sa Sjevernom Afrikom. Europa ima dobro razvijenu plinsku mrežu koja se može pretvoriti u smještaj vodika uz minimalne troškove. Nedavna istraživanja zaključila su da je postojeća infrastruktura za prijenos i distribuciju plina prikladna za vodik s minimalnim izmjenama ili bez njih. (NS Energy, 2021) Europska transportna mreža za zemni plin dugačka je oko 200.000 km, s distribucijskom mrežom koja je nekoliko puta dulja. Osim mreže prirodnog plina, postoji oko 10.000 km cjevovoda koji prevoze druge tvari poput nafte, kerozina, vodika, etilena, dušika itd. (NS Energy, 2021) U srpnju 2020. skupina od 11 europskih plinskih infrastrukturnih tvrtki predstavila je svoj plan za ostvarivanje namjenske Europske vodikove okosnice. Vodikova okosnica, temeljena na prerađenim plinovodima od 36 i 48 inča, može transportirati oko 8 GW odnosno 15 GW vodika (HHV) po cjevovodu. (NS Energy, 2021) Procjenjuju da bi se mreža

dopreme i transporta vodika u Europskoj uniji sastojala od oko 75% pretvorenih plinovoda i 25% novih vodikovoda, s transportnim troškovima od oko 0,13 €/kgH<sub>2</sub>/1.000 km. (13 centi po kilogramu vodika na 1000 kilometara). No, upotrebom novih velikih namjenskih cjevovoda koji rade pod tlakom do 100 bara mogli bi se postići transportni troškovi čak i ispod 0,1 €/kgH<sub>2</sub>/1.000 km. (NS Energy, 2021) Dugoročno je zasigurno isplativije graditi visokotlačne namjenske plinovode, no treba izračunati nakon koliko bi se godina isplatilo mijenjati postojeći plinovodni sustav. Europa trenutno uvozi prirodni plin iz Alžira i Libije, s nekoliko priključaka plinovoda prema Španjolskoj i Italiji. Ovi priključci cjevovoda imaju kapacitet veći od 60 GW. Za usporedbu, postoje dva kabela za prijenos električne energije, svaki s kapacitetom od 0,7 GW, između Maroka i Španjolske. (NS Energy, 2021) Za Afriku i Europu stoga bi bilo jako zanimljivo otključati izvozni potencijal obnovljivih izvora energije u Sjevernoj Africi pretvaranjem električne energije u vodik i transportiranjem putem cjevovoda, uključujući neke prerađene cjevovode za prirodni plin, u Europu. (NS Energy, 2021) Na primjer, troškovi transporta vodika za novi namjenski cjevovod za prijenos vodika, koji prelazi Sredozemno more, iz Agadira u Maroku i povezuje se s područjem Ruhr u Njemačkoj, na udaljenosti od oko 3.000 km, koštali bi oko 0,3 EUR/kgH<sub>2</sub> ili 0,0075 EUR /kWhH<sub>2</sub> (HHV). Međutim, kako bi se u potpunosti iskoristila prednost nižih transportnih troškova, potrebno je proizvesti i transportirati najmanje milijun tona vodika godišnje. Vjetroelektrane ili solarne elektrane snage 1 do 2 GW dovoljne su veličine za električnu energiju jer odgovaraju kapacitetu veze visokog napona istosmjernje struje (HVDC). (NS Energy, 2021) No, za proizvodnju vodika potrebno je odrediti veličinu vjetroelektrana ili solarnog parka ovisno o kapacitetu cjevovoda za transport vodika. Plinovod snage 10 GW koji radi pri 4000 sati punog opterećenja godišnje transportirat će oko milijun tona vodika (40 teravat sati (HHV)) godišnje. (NS Energy, 2021) Za proizvodnju milijun tona vodika godišnje potreban je prostor. Prostor za proizvodnju električne energije putem sunca ili vjetra, za elektrolizere, kompresore, ožičenje i cjevovode, pristupne ceste...

Za solarnu energiju potrebno je područje od oko 500 četvornih kilometara, gotovo potpuno zauzeto instalacijama i opremom. (NS Energy, 2021) Za vjetar na kopnu i na moru fizički prostor koji je potreban pojedinačnoj vjetroturbini nije velik. Za vjetroelektrane, međutim, turbine moraju biti dobro razmaknute jedna od druge zbog utjecaja interferencija i turbulencije. Zlatno pravilo je razmak sedam puta veći od promjera rotora. Stoga je ukupna površina koja je potrebna za realizaciju vjetroelektrane mnogo veća od površine koju zauzimaju same vjetroturbine. (NS Energy, 2021) Vlade će morati odabrati područja na temelju niza kriterija. Morat će se izgraditi infrastruktura poput cesta i komunikacijske infrastrukture, a tvrtke za energetska infrastrukturu morat će realizirati potrebnu infrastrukturu za transport i skladištenje

vodika i potrebnu električnu infrastrukturu. Glavni ciljevi sadašnjih nacionalnih vodikovih strategija usmjereni su na smanjenje emisija, diverzifikaciju opskrbe energijom, poticanje gospodarskog rasta, integraciju obnovljivih izvora energije i razvoj opskrbe vodikom za izvoz. (Van de Graaf, Overland, Scholten, & Westphal, 2020) Međutim, danas nedostaje okvir za provedbu i sustavnu integraciju vodika u energetska, klimatska, gospodarska i geopolitička sfera. Vodik nije dodatak sustavu prirodnog plina, niti je dio elektroenergetskog sektora. Ne radi se samo o poticanju potražnje u pojedinim sektorima i proizvodnji putem subvencija, poreznih olakšica, natječaja, kvota, postavljanja ograničenja emisija... Vodik ima sistemsku ulogu, kao sirovina, prijenosnik energije i energent. Stoga je potrebno osmisliti i provesti namjenski, integriran i koherentan okvir politike. Takav okvir politike treba stimulirati potražnju i proizvodnju na koherentan način, a potrebna je i namjenska politika prostornog planiranja. (Van de Graaf, Overland, Scholten, & Westphal, 2020) No, okvir politike vodika mora uključivati i razvoj namjenske vodikove infrastrukture, uključujući skladištenje, zajedno s dizajnom i provedbom transparentnih mehanizama tržišta vodika i, ali ne i najmanje važno, međunarodnom trgovinom, sigurnošću opskrbe i politikom strateških rezervi. (Van de Graaf, Overland, Scholten, & Westphal, 2020)

### **3.3. Dugoročne projekcije upotrebe vodika**

Vodik je bio gorivo budućnosti desetljećima. Uvijek se očekivalo da će u sljedećih pet godina postati dominantan energent. (Vidljivo je to i po znanstvenoj literaturi koja još od osamdesetih najavljuje ulazak vodika na globalno tržište energenata kao dominantan energent). Unatoč tome, čini se kako bi se to što je najavljivano desetljećima moglo ostvariti u sljedećih nekoliko godina budući da su vodeće svjetske energetske kompanije najavile povećanje proizvodnje vodika 50 puta u sljedećih pet godina. (Brandle & Schulte, 2021.)

Zeleni vodik proizvodi se obnovljivom energijom i elektrolizom za cijepanje vode i razlikuje se od sivog vodika, koji se proizvodi od metana i ispušta stakleničke plinove u atmosferu, te plavog vodika koji hvata te emisije i skladišti ih pod zemljom kako bi spriječio izazivanje klimatskih promjena. (Mc Pherson, Johnson, & Strubegger, 2018.)

Nova inicijativa na razini G-20 ima za cilj smanjiti troškove zelenog vodika na manje od 2 Eur/kg, što bi pomoglo smanjiti emisije iz svjetski najintenzivnijih industrija, uključujući proizvodnju čelika, transport, proizvodnju kemikalija i proizvodnju energije. Partneri osnivači su saudijska grupa za čistu energiju ACWA Power, australski projektant CWP Renewables, kineski proizvođač vjetroturbina Envision, europski energetska divovi Iberdrola i Ørsted,



talijanska plinska grupa Snam i Yara, norveški proizvođač gnojiva. (Pivovar, Rustagi, & Satyapal, 2018.)

Nedavna analiza sugerira da su 2 Eur/kg potencijalna točka preokreta koja će učiniti zeleni vodik i njegove derivate konkurentnim u više sektora, uključujući proizvodnju čelika i gnojiva, proizvodnju energije i transport na velike udaljenosti. Zeleni amonijak, koji se proizvodi od zelenog vodika, ispituje se kao moguća zamjena za fosilna goriva u proizvodnji toplinske energije, što bi uvelike smanjilo intenzitet emisija postojeće energetske infrastrukture. (Pivovar, Rustagi, & Satyapal, 2018.)

Tvrtke se nadaju da će do 2026. godine vidjeti 25 GW proizvodnje zelenog vodika, što bi imalo veliki utjecaj na emisije plinova iz teške industrije i transportnog sektora. Predstavnici navedenih organizacija ističu kako s industrijske strane ne postoje zapreke za realiziranjem takvih brojeva. Istaknuli su kako je na određenim područjima uspješno realizirana cijena struje iz sunčeve energije od 2 centa/kWh. Stoga je, kako smatraju predstavnici navedenih poduzeća, glavni problem onaj politički. (Brandle & Schulte, 2021.) Povećanje zelenog vodika bit će ključno za pomoć svjetskim ekonomijama u postizanju nulte emisije štetnih plinova do 2050. godine i ograničavanju globalnog porasta temperature na 1,5°C. (Brandle & Schulte, 2021.)

Zeleni vodik mogao bi do 2050. godine opskrbiti do 25% svjetskih energetske potrebe, a do 2050. godine postati adresabilno tržište od 10 bilijuna eura, prema Goldman Sachs. Brojne zemlje nedavno su objavile nacionalne strategije vodika, uključujući Australiju, Čile, Njemačku, EU, Japan, Novi Zeland, Portugal, Španjolsku i Južnu Koreju. (Brandle & Schulte, 2021.)

Za postizanje cilja do 2026. godine bit će potrebna ulaganja od približno 110 milijardi eura i otvaranje više od 120.000 radnih mjesta, pa će također imati važnu ulogu u pomaganju gospodarstvima da se oporave od utjecaja COVID-19. (Hydrogen Council, 2020.)

Grupa koju predvode spomenute organizacije na čelu s G-20 traži više članova i kompanija sa sličnom i usklađenom vizijom i projektima u gigavatnim razmjerima u razvoju, kao i ulagače, kupce i gradske i regionalne vlade usklađene s takvim idejama za sudjelovanje dok se inicijativa oblikuje i jača, organizira globalni zamah uoči sljedećeg samita UN-a o klimi koji bi se trebao održati u Glasgowu u studenom 2021. i koji bi trebao pružiti podršku takvim inicijativama. (Hydrogen Council, 2020.) Ulaganja u proizvodnju zelenog vodika trebalo bi premašiti milijardu dolara godišnje do 2023. jer će troškovi obnovljive energije i tehnologije elektrolizera pasti, a vlade će uvesti politike potpore. Radi se da se prema Europi napravi cjevovod koji bi mogao prenositi 93 GW energije zelenog vodika u minuti, a koji bi trebao zamijeniti postojeći od svega 27 MW. (Hydrogen Council, 2020.) Troškovi proizvodnje zelenog vodika pali su za

40% od 2015. godine, a očekuje se da će pasti za daljnjih 40% do 2025. godine. (Brandle & Schulte, 2021.)

#### **4. PRIMJERI VODIKOVE EKONOMIJE**

Četiri stvarnosti ukazuju na to da trenutna energetska ekonomija nije održiva i da bi je se što prije moralo promijeniti:

Potražnja za energijom raste, a sirovine za uštedu fosilnih goriva se smanjuju. Zalihe nafte, ugljena i prirodnog plina ne nadopunjuju se potrošnjom pa se mora pronaći alternativa.

Većina ljudi koji konzumiraju fosilna goriva ne žive tamo gdje se vade goriva. Ova situacija stvara ogromnu ekonomsku motivaciju nacijama potrošačima da pokušaju kontrolirati regije koje opskrbljuju gorivom. Za mnoge ljude i vlade u svijetu rezultirajući sukobi su neprihvatljivi. Emisije korištenjem fosilnih goriva značajno umanjuju kvalitetu zraka u cijelom svijetu, posebno u sjeveroistočnim Sjedinjenim Državama. Nusprodukti ugljika bitno mijenjaju svjetsku klimu. Za mnoge ljude i vlade u svijetu posljedice na zdravlje i klimu neprihvatljive su. (IRENA, 2018.)

Gospodarstva trećeg svijeta posebno su podložna razvoju energetske sustava potrebnih za poboljšanje svojih gospodarstava. Ekonomija fosilnih goriva dovodi ljude i nacije pod pretjerani utjecaj dobavljača energije. Ovaj nedostatak ekonomske neovisnosti neprihvatljiv je za mnoge tvrtke i vlade. (IRENA, 2018.)

Vodik ima tri osnovne prednosti koje rješavaju ove probleme.

Korištenje vodika uvelike smanjuje zagađenje. Kada se vodik spoji s kisikom u gorivoj ćeliji, proizvodi se energija u obliku električne energije. Ova se električna energija može koristiti za pogon vozila, kao izvor topline i za mnoge druge namjene. Prednost korištenja vodika kao prijenosnika energije je u tome što su u spoju s kisikom jedini nusprodukti voda i topline. Korištenjem vodikovih gorivnih ćelija ne stvaraju se staklenički plinovi niti druge čestice.

Vodik se može lokalno proizvoditi iz brojnih izvora. Vodik se može proizvoditi ili centralno, a zatim distribuirati ili na mjestu gdje će se koristiti. Vodikov plin može se proizvesti iz metana, benzina, biomase, ugljena ili vode. Svaki od ovih izvora sa sobom nosi različite količine zagađenja, tehničke izazove i energetske zahtjeve. (IRENA, 2018.)

Ako se vodik proizvodi iz vode, govori se o održivom proizvodnom sustavu. Elektroliza je metoda razdvajanja vode na vodik i kisik. Obnovljiva energija može se koristiti za napajanje elektrolizera za proizvodnju vodika iz vode. Korištenje obnovljive energije osigurava održivi

sustav koji je neovisan o naftnim derivatima i ne zagađuje okoliš. Neki od obnovljivih izvora koji se koriste za napajanje elektrolizera su energija vjetra, vode, sunca i energije plime i oseke. Nakon što se vodik proizvede u elektrolizeru, može se koristiti u gorivoj ćeliji za proizvodnju električne energije. Nusprodukti procesa gorivih ćelija su voda i toplina. Ako gorivne ćelije rade na visokim temperaturama, sustav se može postaviti kao kogenerator, a otpadna energija se koristi za grijanje. (IRENA, 2018.)

Kada se razmatra proizvodni proces, cijena električne energije potrebna za proces elektrolize jedna je od prepreka održivoj energiji. Trenutno Centar za energiju vodika istražuje vjetar, solarnu energiju, plimu i oseku kao obnovljive izvore energije. Vjetrogeneratori su značajno poboljšani posljednjih godina i mogu proizvoditi električnu energiju po 0,04 centa po kWh što je konkurentno konvencionalnim načinima proizvodnje električne energije. Solarna energijka ovdje još uvijek prilično zaostaje. Ako mjesto ima odgovarajući vjetar, postoji značajan potencijal za postrojenje za proizvodnju vodika. Male hidroelektrane obećavaju mjesta na kojima su lokalna proizvodnja i uporaba odlučujući čimbenici. Snaga plime i oseke uzima sve više maha i demonstracijski projekti su uspješni. Energetski centar za istraživanje vodika surađuje s izumiteljima na razvoju planova za dugoročni demonstracijski projekt proizvodnje električne energije plime i oseke u Novoj Engleskoj. Poboljšanja solarnih nizova fotonaponskih ćelija i dalje snižavaju troškove proizvodnje električne energije. Ako postoji odgovarajuća klima i niz okolnosti, solarna energija je održivo rješenje. (IRENA, 2018.)

Osim elektrolize, proizvodnja vodika ostvarena je i katalitičkom reakcijom otpadnog aluminija. Krajnji proizvodi su vodik i glinica koja se može ponovno upotrijebiti za izradu aluminija. Energetski centar za istraživanje vodika vodi dijalog s kanadskom tvrtkom koja ima patent.

Osim proizvodnje vodika, mora se pažljivo uvesti svakodnevna uporaba i prihvaćanje vodika. Vodik se danas koristi za pogon komercijalnih autobusa kako u motorima s unutarnjim izgaranjem koji sagorijevaju kombinaciju vodika i drugih goriva, tako i isključivo vodikovim motorima koji se koristi u gorivnim ćelijama. Vodik se koristi u mnogim komercijalnim primjenama, od zavarivanja metala do tkanina, do proizvodnje elektronike, plastike i gnojiva. Kad se postigne obnovljiv ekonomski isplativ proces proizvodnje vodika, prednosti će se proširiti na mnoge industrije. Neki od dokazivanja različitih metoda proizvodnje mogu se lokalno razviti kako bi se tim industrijama osigurao vodik. (IRENA, 2018.)

Obnovljivi izvori energije često su ograničeni za komercijalnu upotrebu zbog njihove povremene dostupnosti. Ponekad vjetar ne puše ili sunce ne sja, pa vodik može biti kritična karika koja se koristi kao skladišni medij za opskrbu električnom energijom u tim razdobljima.

Vodik se može koristiti kao mobilni izvor energije za transport tako što se komprimira i skladišti u male spremnike poput onih za skladištenje „kućnog“ plina. (IRENA, 2018.)

Sa sve većom uporabom vodika i tehničkim napretkom, troškovi proizvodnje, distribucije i proizvodnje proizvoda postat će pristupačniji. Nastavkom izgradnje partnerstva između poduzeća, vlade, sveučilišta i neprofitnih organizacija vodik će biti temelj održivog energetskog gospodarstva. (IRENA, 2018.)

### **Industrija**

Iako postoje mnoge primjene u energetski intenzivnim industrijama, pružanje dostatnih količina niskougljičnog vodika potrebnog za podmirivanje tih potreba bit će izazov.

Zbog ograničenja resursa, proizvodnja vodika s niskim udjelom ugljika bit će ograničenih razmjera u usporedbi s ukupnim izazovom ublažavanja klimatskih promjena. Slijedom toga, velike količine vodika potrebno je usmjeriti u maksimalnu vrijednost dekarbonizacije te u sektore i procese u kojima se ne može izravno koristiti električna energija. Na primjer, upotreba vodika s niskim udjelom ugljika u industrijskim procesima trebala bi imati prioritet u odnosu na njegovu uporabu kao gorivo u prijevozu osobnih automobila ili grijanju stanova jednostavno jer ta industrija puno više onečišćuje.

Treba usredotočiti korištenje vodika prioritetno prema onim granama u kojima bi početak primjene vodika mogao u najvećoj mjeri smanjiti emisiju ugljikova dioksida. Iz tog razloga, prioritet za korištenje vodika nisu osobna vozila ili grijanje stanova kako se to često pogrešno i politički potiče i medijski ističe, nego teška industrija. Dok su poticaji koji se nude za korištenje vodika uglavnom usmjereni na male korisnike i za funkciju prijevoza, bilo bi bolje da se čisti vodik počne proizvoditi za potrebe teške i kemijske industrije. Pod tim se industrijama prvenstveno smatraju proizvodnja visokokvalitetnog čelika, cementa i kemijska industrija.

U sektoru čelika postoje dva glavna načina korištenja vodika kao reaktanta:

Vodik se može ubrizgati u postojeću visoku peć kako bi se stvorila toplina i uklonio kisik iz sirove željezne rude. Danas se u tu svrhu koristi koks, 95% ugljik koji sagorijevanjem oslobađa enormne količine ugljikova dioksida. Međutim, nastavi li se vodik proizvoditi postojećim načinima proizvodnje, ne će se znatno smanjiti količina oslobođenog ugljikova dioksida zbog proizvodnje vodika iz fosilnih goriva. Ova uporaba vodika stoga donosi samo do 20% smanjenja emisije u usporedbi s uobičajenom proizvodnjom čelika.

Vodik se također može koristiti kao glavno redukcijsko sredstvo u procesu proizvodnje spužvastog željeza izravnom redukcijom željeza visokoj peći. Dobiveno spužvasto željezo tada se koristi u proizvodnji čelika u elektrolučnoj peći. Spužvasto željezo s vodikom može donijeti značajno smanjenje emisije od približno 90-95%, pod uvjetom da je upotrijebljeni vodik

potpuno ugljično neutralan. Iako je prvi dio ovog procesa bez ugljika, još uvijek postoji potreba za dodavanjem određenog sadržaja ugljika tijekom druge faze procesa proizvodnje čelika (tj. U elektrolučnoj peći).

Pod pretpostavkom da se koristi obnovljivi vodik, potrebne su značajne količine obnovljive električne energije za proizvodnju vodika potrebnog za izravno smanjenje željezne rude i za napajanje elektrolučne peći i drugih komponenti u ovom procesu proizvodnje čelika.

U kemijskoj industriji vodik se može koristiti kao sastojak za različite kemijske proizvode. 84% vodika koji se trenutno koristi u kemijskom sektoru koristi se za proizvodnju amonijaka, 12% za proizvodnju metanola, 2% poliuretana i 2% najlona.

Europska proizvodnja amonijaka koristi 3,6 Mt vodika godišnje. Vodik se pomiješa s dušikom (u omjeru 3: 1) pod određenim tlakom, temperaturnim uvjetima i s dodatnim katalizatorom za proizvodnju amonijaka.

Dekarbonizacijom proizvodnje amonijaka s vodikom s niskim udjelom ugljika, emisije u kemijskom sektoru mogle bi se smanjiti za približno 30 Mt ugljikova dioksida. Zamjena ovog fosilnog vodika vodikom s malo ugljika iz elektrolize zahtijevala bi oko 173 TWh dodatne obnovljive električne energije.

Unatoč čistoj proizvodnji, naknadna uporaba amonijaka može rezultirati dodatnim emisijama dušikova oksida i drugim utjecajima na okoliš, poput poremećaja u ciklusu dušika. Kako bi se dobila potpuna slika utjecaja proizvoda, te se posljedice moraju uzeti u obzir. Ako se vodik s niskim udjelom ugljika koristi za proizvodnju proizvoda koji sadrže ugljikovu komponentu (npr. Metanol, druga rafinirana fosilna goriva ili materijale poput plastike, treba uzeti u obzir izvor ugljika. Petrokemijski sektor, koji je u biti proširenje sektora fosilnih lož ulja i zemnog plina, morat će se prebaciti na potpuno biološke proizvode, sirovine s niskim udjelom ugljika i upotreba obnovljive energije bit će ugljično neutralni. Prijelaz na vodik s niskim udjelom ugljika riješio bi, nažalost, samo dio njihovih emisija.

Za razliku od čelika i kemijskog sektora, vodik ima ograničenu uporabu u proizvodnji cementa. Iako može zamijeniti neka od fosilnih goriva koja se koriste u ovom sektoru, ne može se koristiti kao sastojak ili reaktant u konvencionalnoj proizvodnji cementa. (Dougherty, 2020.)

## **Transport**

Proizvođači također ulažu i u vozila s vodikovim gorivim ćelijama, posebno za uporabu u komercijalnim voznim parkovima, autobusima i teškim prijevozima. Ove obećavajuće mogućnosti podržane su strategijama EU-a za integraciju energetskog sustava i vodika, kao i strateškim akcijskim planom o baterijama. Energetska učinkovitost bit će kriterij za davanje

prioriteta budućem izboru odgovarajućih tehnologija gledajući cijeli životni ciklus. Prijelazna tehnološka rješenja trebala bi u potpunosti poštivati standarde emisija i zagađenja. Željeznički promet također će morati biti dodatno elektrificiran; gdje god to nije izvedivo, treba povećati upotrebu vodika.

Upotreba vodika u prometu stalno se razvija u svim sektorima mobilnosti. U sektoru zračnih prijevoza, na primjer, europski inženjerski div Airbus najavio je planove da zrakoplovna putovanja do 2022. godine učine bez emisija. Kako je izvijestio Institut za proučavanje okoliša i energije, putnički zračni promet proizvodi najveći i najbrži rast pojedinačnih emisija unatoč značajnom poboljšanju učinkovitosti zrakoplovnih i letaćkih operacija u posljednjih 60 godina. Prema AirBusu, koncept nulte emisije može utrti put zelenijem zračnom prometu, smanjujući ugljični otisak zračne industrije za više od 50%.

Sektor željezničkog prometa također ide prema velikom napretku u dekarbonizaciji. Zemlje koje traže načine prijevoza ljudi uz smanjenje emisije plinova koji mijenjaju klimu gledaju vlakove na pogon na vodikove gorivne ćelije. Jedan od prvih vlakova ove vrste je Alstomov Coradia iLint, koji se sada testira u mnogim zemljama. Vlakovi su opremljeni gorivnim ćelijama za pretvaranje vodika i kisika iz zraka u električnu energiju i imaju doseg od približno 1.000 km, navodi tvrtka.

Osim toga, baterija na vlaku može povratiti energiju tijekom kočenja, koja se zatim može koristiti za poticanje vlaka pri ubrzanju. Vlakovi su posebno prikladno sredstvo za razvoj prometa bez ugljika. Gradske regije već neko vrijeme elektrificiraju vlakove, ali taj proces može biti skup, osobito u ruralnim područjima. Prema BBC-u, elektrifikacija jednog kilometra pruge koštala je od 864.000 do 1 milijun eura. Vodik ne zahtijeva dodavanje skupe električne infrastrukture, već omogućuje vlakovima vožnju po postojećoj željezničkoj infrastrukturi.

Vodik je čist i tih poput električne energije, ali nema visoku cijenu. Slijedom toga, svako mjesto koje već nema infrastrukturu električnih vlakova, poput mnogih područja SAD-a i Europe, potencijalni su slučajevi uporabe vlakova vodika. Na primjer, Velika Britanija također testira vlakove na vodikov pogon, nazvane Hydroflex, od 2019. u sklopu svog plana uklanjanja dizelskih vlakova do 2040. Slično, škotsko sveučilište St. Andrews poduzelo je korake u rujnu 2020. kako bi započelo projekt prenamjene vlaka s tri vagona na vodik u sklopu svog projekta vlaka nulte emisije. Škotska se vlada nada da će do 2035. godine dekarbonizirati svoj željeznički prijevoz putnika.

Za cestovni prijevoz dvije alternative koje obećavaju zamijeniti benzin i dizel su električna energija i vodik. Dok električna vozila na baterije dominiraju medijskom pozornošću, tvrtke kao što su Van Hool, Hyundai, Siemens i Toyota rade na proizvodnji autobusa, kamiona,

vlakova i automobila na vodikov pogon. Međunarodna agencija za energiju, Europska komisija, vlade i gradovi već dugo vjeruju da je vodik bitan za postizanje nulte emisije u javnom prijevozu i smanjenje zagađenja zraka.

Na primjer, Pariz, Mexico City i Amsterdam planiraju zamijeniti svoje sadašnje autobuse i kamione modelima na vodik ili električni pogon već 2025. Slično, DHL, Budweiser i francuski poštanski sustav (La Poste) usvajaju cestovni prijevoz na vodikov pogon. Međutim, trenutnu proizvodnju vodika gotovo u potpunosti pokreću fosilna goriva, a samo 4% energije dolazi iz obnovljivih izvora. Dekarbonizacija globalnog transportnog sektora zahtijeva značajno povećanje proizvodnje vodika. Jedna od prednosti koje vodik ima u odnosu na automobile na baterije je brzina dolijevanja goriva, koja je ista kao i za vozila na benzinski pogon, kao i raspon kilometara koje vozilo može prijeći.

Nadalje, prema izvješću Kanadske udruge vodika i gorivih ćelija, količina ispuštenog ugljikovog dioksida po kilometru niža je od one koju ispuštaju električna vozila, naime 2,7 g u odnosu na 20,9 g. Međutim, potrebna su znatna ulaganja kako bi se pokazalo da vodik može značajno pridonijeti prijelazu na čistu energiju. U Europi su Belgija, Danska, Njemačka i Velika Britanija najavile nekoliko zajedničkih projekata za proizvodnju vodika iz obnovljivih izvora. (eni.com, 2021)

## **Grijanje**

Razvoj grijanja vodikom dodatno je dobio na važnosti u Strategiji vodika, ali stručnjaci u industriji sada traže Strategiju topline i grijanja zgrada za uvid u isplativost i učinkovitost grijanja domova vodikom.

Strategija vodika obećala je da će vodik napajati do tri milijuna domova do 2030. godine, ali samo je nekoliko stranica u dokumentu od 121 stranice bilo posvećeno grijanju u kući.

Martyn Bridges, direktor tehničke komunikacije i upravljanja proizvodima u Worcester Boschu, rekao je za Homebuilding & Renovating da očekuje neki preokret u Strategiji za toplinu i grijanje zgrada, koja bi navodno mogla biti objavljena u prvom tjednu listopada 2021. Bridges također kaže da, iako još uvijek postoji izvjestan stupanj neizvjesnosti u pogledu najboljeg načina za dekarbonizaciju topline u domovima u velikom opsegu, očekuje se da će i toplinske pumpe i kotlovi na vodik imati svoju ulogu.

Worcester Bosch razvio je prototip kotla sa 100% vodikom koji prolazi kroz ispitivanja u Velikoj Britaniji, a Bridges kaže da je Vlada jasna za sljedeće korake. Što prije kažu potvrdno stavljanje na tržište kotlova na vodik i vodika, prije će krenuti poticaji za ulaganja u sustav grijanja na vodik.

U Sjedinjenim Državama grijanje i hlađenje stambenih prostora uvelike doprinose ukupnoj emisiji zemlje. Izravne emisije ugljikova dioksida iz poslovnih i stambenih zgrada činile su 12,6% emisije ugljika u zemlji, što iznosi preko 2 milijarde tona ugljičnog dioksida ispuštenog u atmosferu svake godine, što je povećanje od 9% u odnosu na 1990. Što se tiče Ujedinjenog Kraljevstva, oko 25% ili više njihovih emisija dolazi iz stambene uporabe. Jasno je da će i ekonomska računica koja postoji biti velika prepreka energetske neutralnom zagrijavanju.

Vodikovo gorivo ima mnoge prednosti što ga čini idealnom zamjenom za fosilna goriva u grijanju zgrada. Vodik koji se koristi za napajanje može se stvoriti elektrolizom ili reformacijom pare. Tijekom elektrolize struja prolazi kroz vodu unutar elektrolizera, cijepa molekulu i proizvodi plin vodik. Reformacija parom dovodi ugljikovodik, poput prirodnog plina, pod intenzivnu toplinu i pritisak, stvarajući tako vodikov plin zajedno s drugim nusproduktima. Vodik proizveden elektrolizom i reformacijom pare može biti bez ugljika kada se koriste obnovljive sirovine ili sirovine bez emisije, poput vjetra ili solarne energije ili obnovljivog prirodnog plina.

Vodik se također može miješati s trenutnim izvorom toplinske energije, prirodnim plinom, kako bi se smanjila količina izgorjelog fosilnog goriva i smanjile emisije. Dok su ispitivanja i demonstracija miješanja vodika trenutno u tijeku, očekuje se da koncentracije vodika do 20% opskrbe gorivom za grijanje neće zahtijevati zamjenu ili izmjenu postojeće infrastrukture ili uređaja. To može pružiti izvrsnu polaznu točku za pretvorbu dok država ili grad povećavaju svoje kapacitete za proizvodnju vodika i ažurira svoje cjevovode i sustave za kućnu upotrebu. Iako se ove promjene mogu činiti izazovima, zemlje poput Ujedinjenog Kraljevstva poduzimaju proaktivne korake ka budućnosti grijanja vodikom. Britanski premijer Boris Johnson pokušao je potaknuti sektor grijanja izgradnjom jednog grada u potpunosti zagrijanog vodikom do kraja ovog desetljeća u sklopu svoje Zelene industrijske revolucije. Ovaj grad na vodik je test za širu implementaciju. Još jedan mali grad u Engleskoj isprobava miješani vodik/prirodni plin za grijanje preko 650 stambenih i poslovnih nekretnina.

Važan resurs koji bi Sjedinjene Države mogle slijediti za gospodarski remont vodikove ekonomije je Mapa puta do američkog vodikovog gospodarstva, koju su izradili McKinsey i tvrtka u suradnji s Udrugom za gorivne ćelije i vodikovu energiju te brojnim tvrtkama uloženi u budućnost vodika. Izvješće sugerira da bi SAD trebale početi miješati vodik s prirodnim plinom za grijanje već 2026., uz malo ili nikakvu nadogradnju uređaja ili hardvera. Većina domova u Sjedinjenim Državama koji se za grijanje oslanjaju na prirodni plin nalazi se na sjeveroistoku, što ima značajne mogućnosti za proširenje cjevovoda i mreže. Postoji i obećavajuća mogućnost ugradnje gorivih ćelija u stambene i poslovne zgrade za opskrbu



obnovljivom energijom. S ovim koracima prema niskougljičnim izvorima grijanja koji su detaljno opisani u izvješću, Sjedinjene Države mogle bi biti na putu za budućnost vodika do 2050.

U svijetu zagrijavanja vodikom postoji mnogo toga za očekivati. Budući da zemlje poput Velike Britanije ozbiljno napreduju prema univerzalnom ugljično neutralnom grijanju, ostatak svijeta vjerojatno će to slijediti. Njegova isplativost, obnovljive emisije s nultom emisijom i potencijalna upotreba postojeće infrastrukture čine vodik glavnim kandidatom za zamjenu prirodnog plina. Iako postoje logistički izazovi koje treba riješiti, očekuje se značajan napredak kako se svijet približava klimatskim ciljevima za 2050. godinu. (Ligouri, 2021)

### **Proizvodnja energije**

Vodikove gorivne ćelije proizvode električnu energiju kombiniranjem atoma vodika i kisika. Vodik reagira s kisikom kroz elektrokemijsku ćeliju sličnu onoj u bateriji za proizvodnju električne energije, vode i male količine topline.

Mnogo različitih vrsta gorivnih ćelija dostupno je za širok raspon primjena. Male gorivne ćelije mogu napajati prijenosna računala, pa čak i mobitele, te vojne aplikacije. Velike gorivne ćelije mogu osigurati električnu energiju za pomoćno ili hitno napajanje u zgradama i opskrbiti električnom energijom na mjestima koja nisu spojena na električne mreže.

Do kraja listopada 2020. godine u 108 postrojenja u Sjedinjenim Državama radilo je oko 161 gorivnih ćelija s ukupno oko 250 megavata (MW) električne energije. Najveći je energetska centar Red Lion u Delawareu s ukupnim kapacitetom proizvodnje električne energije od oko 25 MW, koji koristi vodik proizveden iz prirodnog plina za pogon gorivnih ćelija.

## **4.1. Primjena vodika u Svijetu**

Proizvodnja vodika velika je i rastuća industrija: 2019. proizvedeno je 70 milijuna tona. Količina energije koja se može osloboditi iz tolike količine vodika odgovara namjenskoj izravnoj potrebi za energijom kakvu ima zemlja poput Njemačke. (Truche, McCollom, & Martinez, 2020.)

Od 2019. rafiniranje i proizvodnja gnojiva su glavna upotreba. Oko polovica proizvedenog vodika koristi se u Haberovom <sup>4</sup>procesu za proizvodnju amonijaka (NH<sub>3</sub>), koji se zatim izravno

---

<sup>4</sup> Haberov proces, koji se naziva i Haber -Boschov proces, postupak je umjetnog učvršćivanja dušika i danas je glavni industrijski postupak za proizvodnju amonijaka. Ime je dobio po svojim izumiteljima, njemačkim kemičarima Fritzju Haberu i Carlu Boschu, koji su ga razvili u prvom desetljeću 20. stoljeća. Postupak pretvara

ili neizravno koristi kao gnojivo. Budući da raste i svjetsko stanovništvo i intenzivna poljoprivreda koja se koristi za njegovu podršku, potražnja za amonijakom raste. Amonijak se može koristiti kao sigurnija i lakša neizravna metoda transporta vodika. Transportirani amonijak tada se membranskom tehnologijom može pretvoriti natrag u vodik u procesu kemijskog pražnjenja. (Morriarty & Honnery, 2019.)

Druga polovica trenutne proizvodnje vodika koristi se za pretvaranje teških naftnih izvora u lakše frakcije pogodne za upotrebu kao gorivo. Ovaj posljednji postupak poznat je kao hidrokreking.<sup>5</sup> Hidrokrekiranje predstavlja još veće područje rasta jer rastuće cijene nafte potiču naftne kompanije da vade siromašnije izvorne materijale, poput naftnog pijeska i uljnih škriljaca. S obzirom na goleme potrebe vodika za proizvodnju amonijaka u Haberovom procesu odnosno za hidrokrekiranje, većina proizvedenog vodika koristi se na „licu mjesta“ odnosno za same proizvođače, a vrlo mali, gotovo neznatan dio proizvedenog vodika otprema se do krajnjih korisnika. Vodik koji se doprema krajnjim korisnicima naziva se i trgovački vodik. Udio trgovačkog vodika u ukupnoj proizvodnji izražava se u promilima. (Truche, McCollom, & Martinez, 2020.)

Do 2019. gotovo sav proizvedeni vodik proizveden je iz fosilnih goriva. Uzme li se prosjek od 2010. do 2019., za proizvodnju vodika godišnje se u atmosferu oslobodi 830 milijuna tona ugljikovog dioksida. (Kako je već spomenuto, toliku količinu ugljikova dioksida ne proizvede cijela Velika Britanija u godini dana). (Morriarty & Honnery, 2019.)

S obzirom na načine proizvodnje vodika, od spomenuta četiri načina, ekonomija je ona koja diktira na koji će se način proizvesti najveća količina vodika: od četiri metode za dobivanje vodika, djelomično izgaranje prirodnog plina u elektrani na NGCC (*natural gass combined cyclus*) (kombinirani ciklus prirodnog plina) nudi najučinkovitiji kemijski put i najveće oduzimanje upotrebljive toplinske energije. (Morriarty & Honnery, 2019.)

Veliko tržište i naglo rastuće cijene fosilnih goriva također su potaknule veliko zanimanje za alternativna, jeftinija sredstva za proizvodnju vodika. Od 2002. većina vodika proizvodi se na licu mjesta, a cijena je otprilike 0,70 eur/kg, a ako se ne proizvodi na licu mjesta, cijena tekućeg vodika iznosi oko 2,20 eur/kg do 3,08 eur/kg. (Morriarty & Honnery, 2019.) Cijena proizvodnje zelenog vodika višestruko je veća, a postat će moguće zamijeniti postojeći način proizvodnje kad se cijena proizvodnje zelenog vodika barem približi proizvodnji vodika iz fosilnih goriva

---

atmosferski dušik (N<sub>2</sub>) u amonijak (NH<sub>3</sub>) reakcijom s vodikom (H<sub>2</sub>) pomoću metalnog katalizatora pod visokim temperaturama i tlakovima. (Encyclopedia Britannica, 2020.)

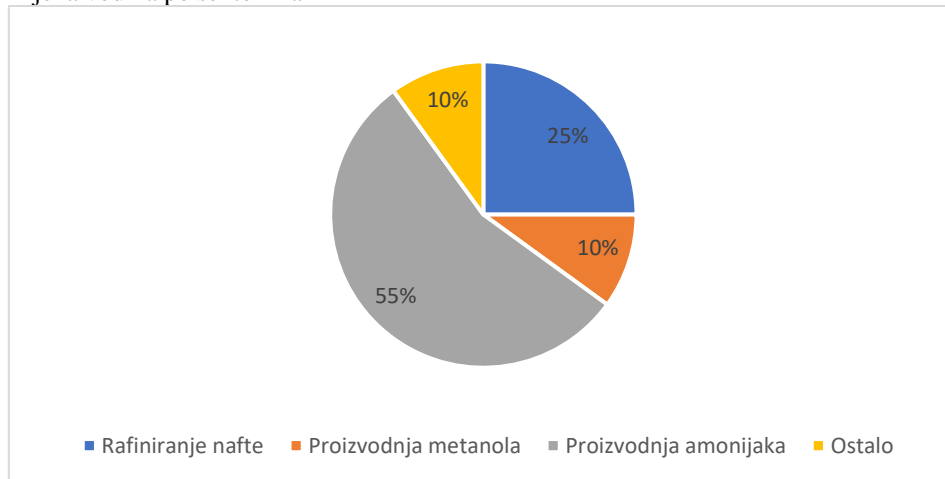
<sup>5</sup> Hidrokreking je jedan od najsvestranijih procesa rafiniranja za pretvaranje komponenata teškog lož ulja u naftu, kerozin, mlazno gorivo, dizelsko ulje ili visokokvalitetna ulja za podmazivanje, kroz katalitičke reakcije u atmosferi vodika pod visokim temperaturama i visokim tlakom. (Kustov & Kustov, 2016)

– smatra se kako će točka prekretnica biti kada cijena zelenog vodika bude 2 eur/kg. (Pivovar, Rustagi, & Satyapal, 2018.)

Kako je istaknuto, četiri su glavna segmenta korištenja vodika – industrija, zagrijavanje, transport i proizvodnja energije.

Graf 4.1. prikazuje ukupnu upotrebu vodika u svijetu po segmentima.

Graf 4.1. Primjena vodika po sektorima



Izvor: Hydrogen Industry Applications: Past, Present, and Future. u: <https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/>

55% ukupne količine vodika koristi se za proizvodnju amonijaka u Haberovu procesu. 25% vodika koristi se u procesu rafiniranja nafte. 10% koristi se za proizvodnju metanola, a 10% za promet, grijanje zgrada, znanost... Graf bi se do 2030. morao znatno transformirati ukoliko se želi početi primjenjivati vodik i u drugim granama u kojima je primjena moguća u većoj mjeri. (Wha-international, 2021)

## 4.2. Primjena vodika u Europskoj uniji

Ukupno je utvrđeno da će u Europi krajem 2018. biti u funkciji 457 proizvodnih pogona vodika. Oni su podijeljeni u tri glavne vrste: proizvodni pogoni za vlastitu proizvodnju, pogoni za proizvodnju trgovaca i postrojenja u kojima je proizvodnja vodika nusproizvod drugih procesa. (Pogoni za vlastitu proizvodnju odnosi se na sve one industrijske pogone koji proizvedu vodik, no odmah ga iskoriste jer im je potreban na licu mjesta u određenom trenutku te ga ne mogu izvoziti, pogoni za proizvodnju trgovaca odnose se na sve one pogone koji će proizvoditi vodik koji će se dalje transportirati i prodavati, a postrojenja u kojima je vodik nusproizvod drugih procesa odnosi se na ona postrojenja koja ne proizvode ciljano vodik, no on nastaje primjerice u reverzibilnom Haberovu procesu). (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Više od polovice ukupne potrošnje vodika odvija se u samo četiri zemlje, a gotovo četvrtina u samo jednoj zemlji: Njemačkoj (22%), Nizozemskoj (14%), Poljskoj (9%) i Belgiji (7%). Ukupni kapacitet proizvodnje vodika u Europi na kraju 2018. iznosio je oko 11,5 milijuna tona (Mt) godišnje. Bez vodika nusproizvoda, nastalog kao dio koksnog plina (COG), ukupni kapacitet proizvodnje čistog vodika dodaje ukupno 9,9 Mt vodika godišnje. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Na temelju procijenjene veličine potrošnje vodika u 2018., prosječna iskorištenost proizvodnih kapaciteta u 2019. iznosila je 84%. Vlastita proizvodnja vodika na licu mjesta daleko je najčešći način opskrbe vodikom, pri čemu je gotovo dvije trećine svih kapaciteta proizvodnje vodika (7,5 Mt godišnje ili 20,5 tisuća MTD<sup>6</sup> u 140 proizvodnih pogona) namijenjeno vlastitoj potrošnji. To je slučaj s rafinerijama, amonijakom, metanolom, pogonima za proizvodnju vodikovog peroksida i drugim objektima, gdje velika količina potrošnje vodika opravdava ulaganje u namjensku jedinicu za proizvodnju vodika (HGU). (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Druga velika skupina su trgovačka postrojenja koja proizvode vodik uglavnom za prodaju. Procjenjujemo da su u Europi u 2018. radila 184 trgovačka postrojenja vodika. Iako su brojnija od vlastitih postrojenja, zbog svog manjeg prosječnog kapaciteta predstavljaju samo 15% ukupnih kapaciteta proizvodnje vodika (1,7 milijuna tona godišnje ili 4.584 MTD). Postrojenja trgovačkog vodika mogu se podijeliti u dvije glavne potkategorije:

- postrojenja namijenjena opskrbi jednog velikog potrošača, s raspoloživim samo suvišnim kapacitetima za opskrbu maloprodajnog tržišta vodika
- mala i srednja mjesta proizvodnje vodika namijenjena opskrbi većinom maloprodajnih kupaca. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Iako se prvi tip može mjeriti po veličini s najvećim kapacitetima za proizvodnju vodika u zatvorenom prostoru, instalacije su projektirane imajući u vidu da je maloprodajno tržište vodikom za red veličine manje u smislu njihovog najvećeg kapaciteta.

Na tržištu trgovačkog vodika u Europi dominiraju četiri tvrtke: Air Liquide, Air Products, Linde Gas i Messer, koje zajedno sa svojim podružnicama posjeduju ukupno 87% ukupnih proizvodnih kapaciteta trgovačkog vodika. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

---

<sup>6</sup> MTD – *metric tones per day* ili metričkih tona po danu. Odnosi se na prosječnu količinu proizvedenog vodika u jednom danu u 2019. godini.

Vodik kao nusprodukt drugih procesa proizvodi se u 133 različita postrojenja. Ukupni kapacitet proizvodnje vodika nusproizvoda procijenjen je na 2,36 Mt godišnje (oko 20% ukupnih proizvodnih kapaciteta), uključujući:

- 1,6 Mt vodika pomiješanog u koksnom plinu (COG),
- 0,21 Mt vodika koji proizvodi klor-alkalijska industrija,
- 0,38 Mt vodika proizveden u industriji etilena,
- 0,12 Mt nusprodukt vodika iz industrije stirena. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Daleko najveći dio nusproizvoda vodika postoji kao smjesa s plinom iz koksne peći. U ovom slučaju, izlazni plin nije čisti vodik, već mješavina vodika (55% - 65%) i metana, ugljičnog monoksida, ugljičnog dioksida i dušika. Kokсни plin koristi se za obogaćivanje kalorijske vrijednosti ostalih procesnih plinova za uporabu u visokim pećima, te za zagrijavanje peći u mlinovima s vrućom trakom i drugim visokotemperaturnim procesima ili za loženje koksnih peći. Višak COG -a može se upotrijebiti u visokoj peći kao alternativno reducirajuće sredstvo, ali i u elektranama. Samo u rijetkim slučajevima vodik ekstrahiran iz COG-a koristi se kao zaseban tok proizvoda. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Najčešća tehnologija za proizvodnju vodika je parno rafiniranje prirodnog plina ili rjeđe djelomična oksidacija ili autotermalno reformiranje. Parno rafiniranje i prirodni plin naširoko se koriste za sve primjene, bilo da se radi o rafiniranju nafte, sintezi amonijaka ili bilo kojoj drugoj masovnoj proizvodnji vodika. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Iako je prirodni plin najčešća sirovina, rafiniranje parom također se koristi s drugim izvorima, uključujući tekuće ugljikovodike poput zemnog plina ili nafte. Ukupno više od 92% svih pogona za proizvodnju vodika koristi fosilna goriva kao sirovinu. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

U slučaju velikih zatvorenih proizvodnih pogona, to je blizu 100%. U 2018., od 228 identificiranih pogona za proizvodnju vodika koji su koristili fosilna goriva kao sirovinu, samo su dvije koristile tehnologije hvatanja ugljika:

- Air Liquide CRYOCAP instalacija u Port Jeromeu, Francuska, hvata ugljični dioksid iz pogona za proizvodnju vodika koji opskrbljuje vodikom rafineriju Exxon. Postrojenje ima kapacitet od oko 50.000 Nm<sup>3</sup> čistog vodika na sat (4.500 kg/h). CRYOCAP tehnologija koristi kriogeno pročišćavanje za odvajanje ugljikovog dioksida od otpadnog plina. Ne samo da tehnologija omogućuje hvatanje više od 97% ugljičnog dioksida, već također povećava i proizvodnju vodika za 10% do 15%. Uhvaćeni i ukapljeni CO<sub>2</sub> isporučuje se lokalnoj industriji pića. Iako postrojenje može hvatati do

3.000 tona CO<sub>2</sub> dnevno, trenutno se koristi samo oko 55% kapaciteta za hvatanje CO<sub>2</sub> zbog nedovoljne potražnje za CO<sub>2</sub>.

- Rafinerija Shell u Rotterdamu, gdje se CO<sub>2</sub> iz proizvodnje vodika hvata kao dio projekta OCAP-a, kojim upravlja Linde. Ukupan udio proizvodnje vodika s niskim udjelom ugljika iz fosilnih goriva u svim kapacitetima proizvodnje vodika (isključujući nusproizvode) iznosi oko 0,7 %. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Vodik se, naravno, može proizvesti i električnom energijom elektrolizom vode. U Europi je instaliran značajan broj elektrolizera. Tradicionalno, elektrolizeri su se koristili kad god je volumen potražnje vodika dovoljno velik da opravda izgradnju posebne instalacije na mjestu upotrebe. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Unutar poglavlja koje se bavi istraživanjem primjene vodika u Europskoj uniji, vrijedi spomenuti i korištenje vodika u Republici Hrvatskoj. Hrvatska je država koja, kako je već spomenuto, gotovo u potpunosti ovisi o uvozu energenata. Stoga bi za hrvatsko gospodarstvo bilo vrlo značajno da na vrijeme počne proizvoditi vodik te postane među europskim pionirima u proizvodnji zelenog vodika, pogotovo zbog toga što bi vjetroelektrane koje Hrvatska danas posjeduje i koje planira postaviti u bližoj budućnosti mogle podnijeti i teret proizvodnje vodika procesom elektrolize vode. (Barbir, 2021)

Vrijedi spomenuti da u Republici Hrvatskoj trenutno prometuje šest automobila koji se pokreću na vodik, a da se planira i izgradnja benzinske postaje za vodik do kraja 2023. (Barbir, 2021)

Da vodik neupitno može koristiti u svakodnevnom životu istaknuto je i na predavanju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu pod nazivom Vodik u energetskej tranziciji. Sustav temeljen na vodiku mogao bi osigurati električnu energiju u svim ekstremnim uvjetima kao što su ekstremno visoke i niske temperature, potresi i poplave. To je najznačajnije za zdravstvene ustanove. Sveobuhvatna dekarbonizacija mogla bi se drastično ubrzati pomoću prelaska na vodik. (Špiljak, 2020)

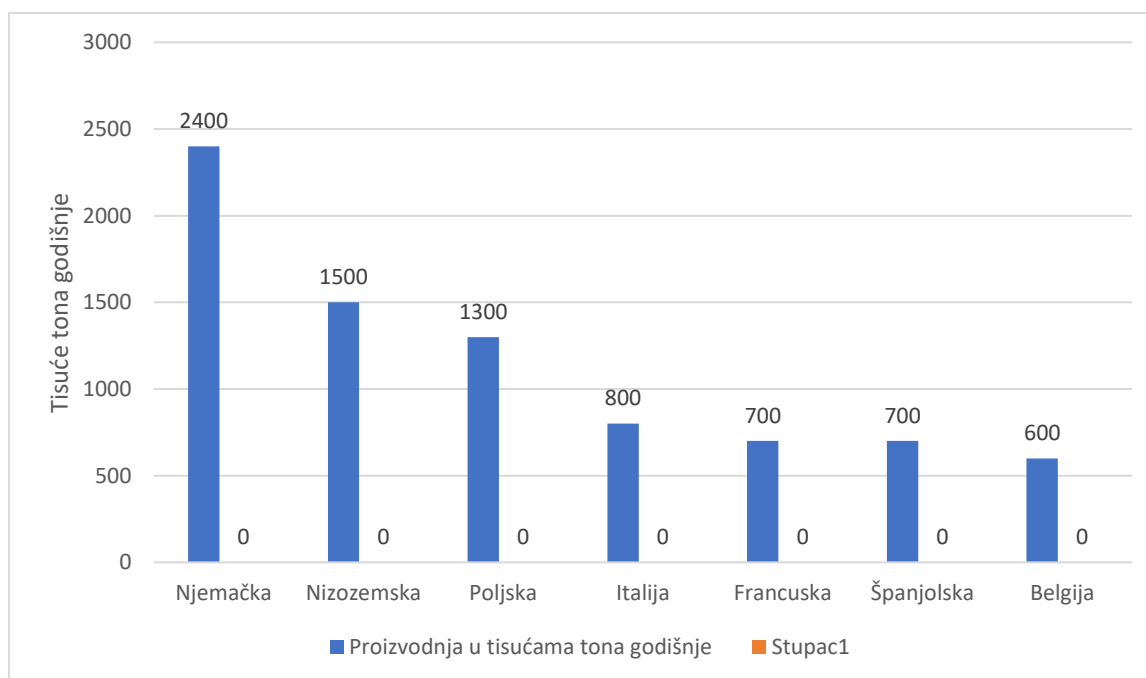
Od proizvodnje vodika u Republici Hrvatskoj treba istaknuti proizvodnju vodika koja se odvija u sklopu Industrije nafte – INE koja vodik proizvodi gotovo isključivo za vlastite potrebe. Za vlastite potrebe vodik također proizvodi i Tvornica gnojiva u Kutini koja vodik proizvodi kako bi mogla sintetizirati amonijak. velik dio vodika proizvedenog u svijetu odlazi upravo na sintezu amonijaka. Posljednji javno poznati primjer proizvodnje vodika jest u sklopu Tvornice ulja u Zagrebu. Tvornica ulja u Zagrebu proizvodi vodik iz elektrolize vode. Takav je vodik najčišći, no struja koju koristi Tvornica ulja u Zagrebu koristi se iz mreže što znači da je udio proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora energije i relativno i apsolutno vrlo nizak, gotovo neznatan.

Ne samo da Republika Hrvatska ima potencijala za proizvodnju vodika za svoje potrebe, nego ima potencijala da vodik izvozi. Osim izvoza čistog energenta, velika je prilika vidljiva i u proizvodnji dijelova za proizvodnju vodika. U oba bi segmenta Hrvatska mogla gospodarski iznimno prosperirati.

#### **4.2.1. Proizvodnja vodika po državama**

S gotovo 2,5 Mt vodika godišnje (21% od ukupnog iznosa Europske unije), Njemačka ima daleko najveći kapacitet proizvodnje vodika u EU-u, ispred sljedeće zemlje - Nizozemske, koja proizvodi 1,5 Mt godišnje. Ostale zemlje sa značajnim kapacitetom proizvodnje vodika su Poljska (1,3 Mt, 11%), Italija (0,8 Mt, 7%), Francuska i Španjolska (0,7 Mt, 6%) i Belgija (0,6 Mt, 5%). Struktura proizvodnje prema vrsti i tehnologiji u različitim zemljama nalikuje ukupnoj strukturi, pri čemu u većini zemalja dominira vlastita proizvodnja. Jedan od velikih potrošača je Poljska. Iako je ova zemlja ukupno treća po ukupnim kapacitetima proizvodnje vodika, postoji relativno mali kapacitet proizvodnje vodika za trgovce. Većina vodika kojim se trguje na poljskom tržištu dolazi ili iz viška kapaciteta u jedinicama za proizvodnju vodika u kemijskim pogonima i rafinerijama, ili iz nusproizvoda vodika, ili se uvozi iz inozemstva - uglavnom iz Njemačke i Češke. (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020)

Graf 4.2. Proizvodnja vodika po država u Europskoj uniji



Izvor: (Clean Hydrogen Monitor 2020, 2020).

## 5. ZAKLJUČAK

Trenutno se godišnje proizvodi 80 milijuna tona vodika, a očekuje se da će se do kraja desetljeća to povećati za oko 20 milijuna tona. Gledajući još više naprijed, do 2050. godine mnoge studije pokazuju da će proizvodnja narasti na oko 500 milijuna tona. Danas se većina tog goriva troši u blizini mjesta na kojem se proizvodi, najčešće u kemijskoj tvornici, no u budućnosti će ta potražnja biti šira, s plavim vodikom koji će tvoriti most do onoga što će biti budućnost zelenog vodika.

Za plin koji je bez boje, okusa i mirisa, ironično je to što je označen kao siv, plav i zelen...; boja određena ovisno o načinu proizvodnje. Da bi vodik dostigao svoj potencijal kao ekološki prihvatljiv izvor energije, od vitalne je važnosti da opskrbeni lanac postane zeleniji.

Trenutna metoda proizvodnje vodika je većinski iz fosilnih goriva kao što su metan, prirodni plin ili ugljen. Ova vrsta vodika, nazvana sivi vodik, obuhvaća gotovo 95% danas proizvedene količine, a to je proces s intenzivnim emisijama, s više od 10 kilograma CO<sub>2</sub> ispuštenog za proizvodnju svakog kilograma vodika. Poboljšanje se može postići odvajanjem CO<sub>2</sub> koji se proizvodi u procesu, čime se isporučuje plavi vodik.

No, velik dio svijeta nastoji postići zeleni vodik. Ovo je vodik koji se proizvodi obnovljivom električnom energijom koja napaja elektrolizer za stvaranje vodika i kisika iz vode. Ako voda i



energija dolaze iz održivih izvora, tada se vodik klasificira kao čisti zeleni vodik, što je fokus svjetskog poslovanja s novom energijom. Ona vidi tržište vodika koje migrira iz sive, u plavu, a zatim u zelenu boju, pri čemu svaka ima svoju ulogu koristeći različite prijelazne tehnologije. Ključ za omogućavanje potencijala vodikove ekonomije je lanac opskrbe koji može proizvesti zeleni vodik u opsegu i po cijeni koju će tržište platiti. Posljednjih desetak godina to nije bilo moguće, no kako je vodik vrlo zahvalan za transport, znanstvenici se nadaju kako bi zeleni vodik mogao postati ne samo ekološki, nego i tržišno isplativ. Kao i kod svih tehnologija u nastajanju, početna baza troškova bila je visoka, s prototipima i proizvodnjom po mjeri, ali kako tehnologija sazrijeva i usvaja se, troškovi se nastavljaju smanjivati.

S povećanjem opsega proizvodnje, napredna automatizacija može se uvesti u proizvodni proces zajedno s poboljšanjem digitalizacije.

Kako vrijeme odmiče, vodik može postati značajan poput vjetra i sunca, ali u pogledu zrelosti (tržište i tehnologija) zaostaje 15 do 20 godina za ustaljenijim obnovljivim tehnologijama. S vremenom se očekuju slično smanjenje troškova kakvi su se dogodili i u fotonaponskom sektoru. Velika je prednost vodika što je postojeća infrastruktura zadovoljavajuća te se vodik može transportirati na velike udaljenosti u već postojećoj distribucijskoj infrastrukturi.

U konačnici, unatoč ekološkim pritiscima pod kojima se nalazi svaki aspekt industrije, sve će se svesti na cijenu. Da bi vodikova ekonomija postala *mainstream*, gospodarstvo vodika ne može se temeljiti na subvencijama; moraju se stvoriti održiva tržišta, a postizanje ispravnih troškova jedno je od prvih polja koje se mora provjeriti.

Trenutna cijena proizvodnje sivog vodika u industrijskim razmjerima iznosi oko dva eura po kilogramu (kg), ponekad i manje, ovisno o lokalnim uvjetima. Što se tiče uporabe vodika kao goriva za transport, potrošači plaćaju oko devet eura po kilogramu na benzinskoj postaji dok sami transport košta između četiri i šest tu je cijenu potrebno smanjiti barem za trećinu kako bi postala privlačnija. Drugi aspekt je sljedeći: koliko zapravo postoji benzinskih postaja na kojima se mogu napuniti auti vodikom?

Što se tiče usporednih troškova, nema smisla uspoređivati zeleni vodik s konvencionalnim mogućnostima fosilnih goriva koja uvelike doprinose globalnoj emisiji stakleničkih plinova jer je omjer cijena još uvijek neusporediv ipak, sektor mobilnosti na putu je dekarbonizacije i smanjenja emisije stakleničkih plinova, pa očito fosilna goriva moraju imati sve manju ulogu.

Danas se svjetska klimatska politika usredotočuje na emisije iz lakih vozila. U većini zemalja članica Grupe 20 (G-20), ekonomičnost goriva ili standardi učinkovitosti koriste se za regulaciju emisija iz konvencionalnih lakih vozila, a 18 od 20 zemalja predložilo je zabrane konvencionalnih vozila i/ili razvilo poticaje i ciljeve za ubrzanje prodaja vozila s niskim

udjelom ugljika. Zato se prilikom razmatranja potreba za gorivom za lagani prijevoz cijene i performanse vozila na pogon na vodik trebaju usporediti s električnim vozilima na bazi baterija (EV). Unatoč tome, čak i kad bi sva laka vozila postala klimatski neutralna, emisije ugljikovog dioksida u svijetu smanjile bi se za samo 10%. To upućuje na činjenicu da se mora osmisliti sveobuhvatniji plan za smanjenje emisija.

Danas je na raspolaganju daleko više EV modela, a za neke potrošače veliki je plus to što mogu puniti automobile kod kuće. Međutim, automobili na pogon zelenim vodikom superiorniji su u pogledu vremena punjenja i dometa vožnje. Na primjer, manje od 1 kg vodika potrebno je za 100 kilometara vožnje automobilom srednje veličine, a punjenje traje samo tri do pet minuta. Ova je brzina posebno privlačna za vozila hitne pomoći ili taksije koji si ne mogu priuštiti gubljenje previše vremena na punjenje.

Još je važniji transportni sektor srednjih i velikih opterećenja, gdje je zeleni vodik najperspektivnije gorivo s nultom emisijom. Mala težina vodika, dug doseg vožnje i brzo punjenje posebno su važni za teška vozila i vlakove.

Međutim, umjesto cijene po litri, relevantniji izračun je ukupni trošak valniku. U svom izvješću Put do konkurentnosti vodika: perspektiva troškova Vijeće za vodik očekuje da će troškovi vlasniku vozila po vozilu pasti za oko 45% u usporedbi s trenutnim troškovima na proizvodnoj razini od oko 600.000 vozila godišnje.

Da bi zeleni vodik zadovoljio ove cijene, tri su glavna izazova koja se moraju prevladati: cijena električne energije, faktor opterećenja elektrane za elektrolizer te kapitalni i operativni troškovi. Oni ovise o različitim čimbenicima, na koje proizvođači ne mogu utjecati, poput troška električne energije, no budući da obnovljiva energija postaje veći dio energetske miksa, taj bi se faktor trebao sam riješiti.

Što se tiče kapitalnih troškova, kao i kod većine scenarija proizvodnog procesa, ovisi o opsegu i komercijalizaciji elektrane kako bi se smanjili troškovi kupnje. Što se tiče operativnih troškova, digitalni blizanci elektrolizerskih postrojenja mogu se koristiti za optimizaciju dizajna i poboljšanje produktivnosti, uz maksimiziranje životnog ciklusa postrojenja. U područjima koja imaju povoljne uvjete, troškovi proizvodnje zelenog vodika već bi mogli iznositi oko 3 eura po kg, što je vrlo blizu željenoj cijeni.

Elektroenergetski sektor često se smatra glavnim ciljem korištenja zelenog vodika za napajanje turbina, ali budući da je udio u globalnim emisijama CO<sub>2</sub> u elektroenergetskom sektoru manji od 40%, od vitalnog je značaja da proдре i u druge sektore. Danas vjerojatno ne postoji ekonomski isplativ poslovni slučaj za proizvodnju vodika. No, za pilot aplikacije ili u svijetu koji je uvelike dekarboniziran, za daljnju dekarbonizaciju elektroenergetskog sektora, osim

onoga što se može postići instaliranjem više obnovljivih izvora energije, zeleni vodik može ostvariti dugoročna sezonska skladišta električne energije u velikoj mjeri.

Više od polovice globalnih emisija dolazi iz industrije, prometa ili izgrađenog okoliša, pa je potrebno ponuditi rješenja za dekarbonizaciju tih sektora. Tradicionalni obnovljivi izvori energije, poput vjetra, sunca i vode, odigrat će svoju ulogu, ali postoji i značajna uloga vodika proizvedenog iz obnovljivih izvora energije i vode, bilo da se koristi izravno ili u kombinaciji s kemikalijama za stvaranje zelenog metanola i zelenog amonijaka. Te se kemikalije mogu skladištiti, transportirati i koristiti u svim vrstama sektora kao sintetičko gorivo ili gnojivo.

Naposlijetku, očito je da su mogućnosti koje vodik nudi kao grivo iznimno velike, no potrebno je te potencijale iskoristiti jer ideje o korištenju vodika kao energenta postoje već nekoliko desetljeća.

Čini se kako će tranzicijsko razdoblje koje se trenutno događa svakako biti neisplativo, no glupo je gledati kratkoročno. Kad bi postojale zaista dobre političke inicijative, proizvodnja i prodaja vodika vjerojatno bi mogla značajno pomoći gospodarstvu neke zemlje poput Republike Hrvatske koja je energetska vrlo ovisna o drugim zemljama, a ukoliko ne krene na vrijeme u određene pilot projekte, opet će uvelike ovisiti o uvozu.

## Bibliografija

- Armaroli, N., & Vincenzo, B. (2011). *Energy for a Sustainable World. From the Oil Age to a Sun - Powered Future*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Barbir, F. (2021). *Lider*. Preuzeto 25. rujan 2021 iz Hrvatska strategija za vodik: <https://lider.media/konferencije/konferencijeske-vijesti/frano-barbir-hrvatska-strategija-za-vodi-je-u-izradi-i-doprinjete-ce-razvoju-rh-gospodarstva-137469>
- Brandle, G., & Schulte, S. (2021.). Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen. *Applied Energy*(302).
- (2020). *Clean Hydrogen Monitor 2020*. Hydrogen Europe.
- Daily Sabah*. (2021). Preuzeto 5. Kolovoz 2021 iz Germany looking at green hydrogen imports from Turkey: <https://www.dailysabah.com/business/energy/germany-looking-at-green-hydrogen-imports-from-turkey>
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal for Hydrogen Energy*, 7(45), str. 3847-3869.
- Dougherty, C. (2020.). *DGA*. Preuzeto 27. rujan 2021 iz Hydrogen: An Introduction for Commercial and Industrial End-Users: <https://www.dgardiner.com/hydrogen-an-introduction-for-commercial-and-industrial-end-users/>
- Encyclopedia Britannica*. (2020.). Preuzeto 22. kolovoz 2021 iz Haber-Bosch process: <https://www.britannica.com/technology/Haber-Bosch-process>
- Energy Information Administration*. (2021). Preuzeto 25. srpanj 2021 iz Hydrogen Explained: Production of Hydrogen: <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/production-of-hydrogen.php>
- eni.com*. (2021). Preuzeto 28. rujan 2021 iz Hydrogen for travelling: <https://www.eni.com/en-IT/sustainable-mobility/hydrogen-transport.html>
- Europska komisija*. (2021). Preuzeto 5. Kolovoz 2021 iz Pitanja i odgovori: Strategija za vodik za klimatski neutralnu Europu: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/hr/qanda\\_20\\_1257](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/hr/qanda_20_1257)
- Europska komisija*. (2021.). Preuzeto 12. kolovoz 2021 iz Europska strategija z vodik: [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0241\\_HR.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0241_HR.html)
- Forsberg, C. (2007). Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems. *International Journal for Hydrogen Energy*, 4(32), str. 431-439.

- Hrvatska enciklopedija.* (2020.). Dohvaćeno iz Medij:  
<https://enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=39755>
- Hydrogen Council.* (2020.). Dohvaćeno iz Path to hydrogen Competitiveness. A Cost Perspective.
- IRENA. (2018.). *Hydrogen from Renewable Power. Technology Outlook for the Energy Transition.* IRENA.
- International Energy Agency (2009). *Springer Link.* Dohvaćeno iz The International Energy Agency after 35 years: Reform needs and institutional adaptability:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11558-009-9063-8>
- Krishna, R., Titus, E., Salimian, M., Okhay, O., Rajendran, S., Rajkhumar, A., . . . Gracio, J. (2021). *Itechopen.* Preuzeto 7. kolovoz 2021 iz Hydrogen Storage for Energy Application: <https://www.intechopen.com/chapters/38711>
- Kustov, L. M., & Kustov, A. (2016). *Hydrocracking.* Preuzeto 22. kolovoz 2021 iz Further Steps of Zeolites Toward Industrial Applications:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/hydrocracking>
- Ligouri, G. (2021). *FCHEA.* Preuzeto 28. rujan 2021 iz Heating with Hydrogen:  
<https://www.fchea.org/in-transition/2021/2/22/heating-with-hydrogen>
- Mc Pherson, M., Johnson, N., & Strubegger, M. (2018.). The role of electricity storage and hydrogen technologies in enabling global low-carbon energy transitions. *Applied Energy*(216), str. 649-661.
- Moreno-Benito, M., Agnolucci, P., & Papageorgiou, L. (2017). Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development. *Computers & Chemical Engineering*(102), str. 110-127.
- Morriarty, P., & Honnery, D. (2019.). Prospects for hydrogen as a transport fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(44), str. 16029-16037.
- Mulder, G., Hetland, J., & Lenaers, G. (2007). Towards a sustainable hydrogen economy: Hydrogen pathways and infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11(32), str. 1324-1331.
- Muradov, N., & Veziroglu, T. N. (2005). From hydrocarbon to hydrogen–carbon to hydrogen economy. *International Journal for Hydrogen Energy*, 3(30), str. 225-237.
- Narodne novine.* (2020). Preuzeto 12. kolovoz 2021 iz Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_03\\_25\\_602.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_25_602.html)

- NS Energy. (2021). Preuzeto 16. kolovoz 2021 iz A green hydrogen economy: How to make it happen in Europe: <https://www.nsenergybusiness.com/features/renewable-hydrogen-infrastructure/>
- Ogden, J. (1999). Prospects for building a hydrogen energy infrastructure. *Annual Review of Energy and the Environment*, str. 227-249.
- Pivovar, B., Rustagi, N., & Satyapal, S. (2018.). Hydrogen at Scale (H2@Scale): Key to a Clean, Economic, and Sustainable Energy System. *The Electrochemical Society Interface*, 1(27), str. 27-47.
- Shahabuddin, M., Krishna, B., Tallada, B., & Perkins, G. (2020). Advances in the thermochemical production of hydrogen from biomass and residual wastes: Summary of recent techno-economic analyses. *Bioresource Technology*, 1, str. 12-25.
- Sikirica, M., & Korpar-Čolig, B. (2005). *Praktikum iz opće kemije*. Zagreb: Školska knjiga.
- Špiljak, L. (2020). *Poslovni dnevnik*. Preuzeto 25. rujan 2021 iz Ovaj kemijski element mogao bi oživjeti domaće gospodarstvo: <https://www.poslovni.hr/hrvatska/ovaj-kemijski-element-mogao-bi-ozivjeti-domace-gospodarstvo-4251198>
- Technology, T. I. (2020). *IET*. Dohvaćeno iz Transitioning to hydrogen: Assessing the engineering risks and uncertainties: <https://www.theiet.org/impact-society/sectors/energy/energy-news/transitioning-to-hydrogen-assessing-the-engineering-risks-and-uncertainties/>
- (2019). *The Future of Hydrogen*. Japan: IEA.
- Truche, L., McCollom, T., & Martinez, I. (2020.). Hydrogen and Abiotic Hydrocarbons: Molecules that Change the World. *Elements*, 1(16), str. 13-18.
- Turner, J. (2004). Sustainable Hydrogen Production. *Science*, str. 972-974.
- Umbach, F. (2021). *Italian Institute for International Political Studies*. Preuzeto 5. Kolovoz 2021 iz The EU's Hydrogen Strategy and its Geopolitical Challenges: <https://www.ispionline.it/en/publicazione/eus-hydrogen-strategy-and-its-geopolitical-challenges-30521>
- Van de Graaf, T., Overland, I., Scholten, D., & Westphal, K. (2020). The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. *Energy Research & Social Science*(70), str. 101-107.
- Wha-international. (2021). Preuzeto 22. kolovoz 2021 iz Hydrogen Industry Applications: Past, Present and Future: <https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/>

Wulf, C., Reuss, M., Grube, T., Zapp, P., Robinius, M., & Hake, J. (2018). Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options. *Journal of Clear Production*(199), str. 431-443.

## **Popis Grafova**

Graf 3.1. Proizvodnja vodika u svijetu.....	13
Graf 3.2. Broj zemalja koje daju poticaje za korištenje vodika .....	14
Graf 3.3. Zalihe zemnog plina u Republici Hrvatskoj .....	20
Graf 4.1. Primjena vodika po sektorima .....	35

## **Popis slika**

Slika 3.1. Shematski prikaz <i>power to gas</i> i <i>power to liquid</i> tehnologija .....	22
Slika 3.2. Optimalni izvori energije za proizvodnju vodika .....	24