

Ukapljeni prirodni plin i vodik kao alternativna goriva u transportu

Verčević, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:129821>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-06**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

**UKAPLJENI PRIRODNI PLIN I VODIK KAO ALTERNATIVNA
GORIVA U TRANSPORTU**

Diplomski rad

Ivana Verčević

N390

Zagreb, 2022.

UKAPLJENI PRIRODNI PLIN I VODIK KAO ALTERNATIVNA GORIVA U TRANSPORTU

Ivana Verčević

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Vodik i ukapljeni prirodni plin goriva su koja pokazuju veliki potencijal za dekarbonizaciju brojnih sektora, posebice sektora transporta. UPP mnogi vide kao prijelazno rješenje k sve većoj upotrebi obnovljivih izvora energije, dok se zeleni vodik nameće kao dugoročno rješenje za prijenos i skladištenje energije dobivene iz OIE. Iako UPP danas ima razvijenu infrastrukturu i veću upotrebu u sektoru transporta, njegove rekordne cijene i sve ambiciozniji ciljevi smanjenja emisija ubrzavaju razvoj vodikovih tehnologija.

Ključne riječi: ukapljeni prirodni plin, vodik, alternativna goriva

Završni rad sadrži: 60 stranica, 2 tablice, 24 slike i 68 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNF
Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNF

LIQUEFIED NATURAL GAS AND HYDROGEN AS ALTERNATIVE
TRANSPORT FUELS

Ivana Verčević

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Hydrogen and liquefied natural gas are fuels that show great potential for the decarbonization of numerous sectors, especially the transport sector. LNG is seen by many as a transitional solution to the increasing use of renewable energy sources, while green hydrogen is emerging as a long-term solution for the transmission and storage of energy obtained from RES. Although LNG today has more developed infrastructure and greater use in the transport sector, its record prices and increasingly ambitious emission reduction targets are accelerating the development of hydrogen technologies.

Keywords: liquefied natural gas, hydrogen, alternative fuels

Thesis contains: 60 pages, 2 tables, 24 figures i 68 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Reviewers: Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Luka Perković, PhD

Tomislav Kurevija, PhD

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA	VI
1. UVOD	1
2. KLIMATSKE PROMJENE I POTREBA ZA UVOĐENJEM ALTERNATIVNIH GORIVA.....	2
2.1. Emisije iz sektora prometa	2
2.2. Politika i zakonski okvir.....	4
3. UKAPLJENI PRIRODNI PLIN	7
3.1. Područje primjene ukapljenog prirodnog plina	7
3.1.1. <i>Ukapljeni prirodni plin u pomorskom transportu</i>	8
3.1.2. <i>Ukapljeni prirodni plin u cestovnom transportu</i>	10
3.2. Transport ukapljenog prirodnog plina	11
3.3. Tržište ukapljenog prirodnog plina danas	12
4. VODIK.....	14
4.1. Proizvodnja vodika	14
4.2. Vrste vodika.....	17
4.3. Transport vodika.....	18
4.3.1. <i>Transport vodika cjevovodima</i>	19
4.3.2. <i>Transport vodika u obliku amonijaka</i>	20
4.3.3. <i>Transport ukapljenog vodika</i>	20
4.3.4. <i>Transport vodika korištenjem tekućih organskih nosača vodika</i>	21
4.4. Troškovi u lancu opskrbe vodikom	21

4.5. Skladištenje vodika.....	24
4.6. Područje primjene vodika.....	25
4.6.1. <i>Vodik u cestovnom transportu</i>	25
4.6.2. <i>Vodik u željezničkom transportu</i>	26
4.6.3. <i>Vodik za avionskom transportu</i>	27
4.6.4. <i>Vodik u pomorskom transportu</i>	27
4.7. Umješavanje vodika u prirodni plin	28
4.8. Vodik u Europskoj uniji	29
4.8.1. <i>Proizvodnja vodika u Europskoj uniji</i>	31
4.8.2. <i>Potrošnja vodika u Europskoj uniji</i>	32
4.8.3. <i>Proizvodnja vodika korištenjem električne energije iz mreže u Europskoj uniji</i>	32
4.8.4. <i>Proizvodnja vodika elektrolizom uz direktno korištenje obnovljivih izvora energije u Europskoj uniji</i>	33
5. GEOPOLITIČKI ODNOSI.....	34
5.1. Geopolitika i ukapljeni prirodni plin	34
5.2. Geopolitika i vodik, međunarodno upravljanje vodikom.....	35
6. PROJEKCIJE ZA BUDUĆNOST	38
6.1. Budućnost ukapljenog prirodnog plina.....	38
6.2. Budućnost vodika	39
6.2.1. <i>Budući projekti infrastrukture za transport i distribuciju vodika u Europi</i>	41
6.2.2. <i>Važni europski projekti od zajedničkog interes</i>	42
6.3. Barijere uvođenju i poticanje uvođenja zelenog vodika	43

6.3.1. Troškovi	43
6.3.2. Nedostatak namjenske infrastrukture	44
6.3.3. Gubitci energije	44
6.3.4. Osiguravanje održivosti.....	44
6.3.5. Nacionalne strategije.....	45
6.3.6. Određivanje prioriteta	45
6.3.7. Jamstvo podrijetla	45
7. EMISIJE STAKLENIČKIH PLINOVA	47
7.1. Emisije stakleničkih plinova kod ukapljenog prirodnog plina	47
7.2. Emisije stakleničkih plinova kod vodika.....	48
8. USPOREDBA UKAPLJENOG PRIRODNOG PLINA I VODIKA	50
8.1. Usporedba ukapljenog prirodnog plina i vodika u pomorskog transportu	50
8.2. Usporedba ukapljenog prirodnog plina i vodika u cestovnom transportu.....	52
9. ZAKLJUČAK	53
LITERATURA	54

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Emisije stakleničkih plinova u transportu, prema kategoriji potrošnje, 2018.	3
Slika 2-2. Udio emisija iz prometa po regijama te u međunarodnom zrakoplovnom i pomorskom transportu, 2010.-2019.....	4
Slika 2-3. Trenutna ECA i moguća buduća ECA područja	5
Slika 2-4. Vodik u projektima krajnje upotrebe.....	6
Slika 3-1. Obujam trgovine UPP-om u svijetu, 1970.-2020., milijarde kubnih metara.....	7
Slika 3-2. Potrošnja UPP-a u pomorskom transportu, 2010.-2020., MT	9
Slika 3-3. Potrošnja UPP-a u cestovnom transportu, 2010.-2020., MT.....	10
Slika 3-4. Glavni tokovi ukapljenog prirodnog plina u 2020. godini	13
Slika 4-1. Troškovi proizvodnje vodika iz prirodnog plina u odabranim regijama, 2018., USD/kg vodika	15
Slika 4-2. Troškovi proizvodnje vodika prema izvorima proizvodnje, 2018., USD/kg	16
Slika 4-3. Globalna potražnja za vodikom, 1975.-2018., Mt.....	16
Slika 4-4. Globalna proizvodnja vodika, po izvorima, %	17
Slika 4-5. Postojeći i novi članovi „European Hydrogen Backbone“	20
Slika 4-6. Lokacije skladišta vodika u solnim kavernama, akviferima i iscrpljenim plinskim ležištima u Europi.....	24
Slika 4-7. Prikaz funkcionalnih stanica i stanica u nastajanju za punjenje vodikom u Europi	26
Slika 4-8. Ograničenja udjela vodika u prirodnom plinu za odabrane komponente plinske infrastrukture i primjene	29
Slika 4-9. Potražnja za vodikom u EU, prema primjeni, 2018., %.....	32
Slika 4-10. Troškovi proizvodnje vodika korištenjem električne energije iz mreže, 2019., €/kg.....	33
Slika 6-1. Globalna potražnja i opskrba ukapljenim prirodnim plinom, 2015.-2035.	38
Slika 6-2. Procjene globalne potražnje vodika u 2050. godini	40
Slika 6-3. Vodik u Europi do 2050. godine	40

Slika 6-4. Predviđanje potražnje za vodikom u svijetu u scenariju održivog razvoja, 2019. - 2070., po sektorima, milijuni tona.....	41
Slika 7-1. Vrijednosti GWP-a za odabrane metode proizvodnje vodika	48
Slika 8-1. Vrijednosti GWP-a za odabrane metode proizvodnje vodika	52

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Glavne karakteristike amonijaka, ukapljenog vodika i LOHC-a 23

Tablica 4-2. Područja primjene vodika navedena u nacionalnim planovima politika država članica EU 31

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

BOG – otparak plina (engl. *boil-off gas*)

CCS – hvatanje i skladištenje ugljika (engl. *carbon capture and storage*)

CCUS – hvatanje, korištenje i skladištenje ugljika (engl. *carbon capture, utilisation and storage*)

CH₄ – metan

CMM – metan iz rudnika ugljena (engl. *coal line methane*)

CO₂ – ugljični dioksid

CO_{2eq.} – ekvivalent ugljičnog dioksida

ECA – područja s nadzorom emisija (engl. *Emission Control Areas*)

EIA - uprava energetske informacije (engl. *Energy Information Administration*)

EU – Europska unija

FCEV – električno vozilo na gorivne ćelije (engl. *fuel cell electric vehicle*)

GWP – potencijal globalnog zatopljenja (engl. *global warming potential*)

H - vodik

H₂ – molekula vodika

IEA – Međunarodna energetska agencija (engl. *International Energy Agency*)

IMO – Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization*)

IPCEI – važni europski projekti od zajedničkog interesa (engl. *important projects of common European interest*)

ISO – Međunarodna organizacija za standardizaciju (engl. *International Organization for Standardization*)

LCA – procjena životnog ciklusa (engl. *life cycle assessment*)

LH₂ – vodik u tekućem stanju

LNG – ukapljeni prirodni plin (engl. *liquefied natural gas*)

LOCH – tekući organski nosači vodika (engl. *liquid organic hydrogen carriers*)

MARPOL - The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships

NH₃ – amonijak

NO_x – dušikovi oksidi

OECD – Organizacija za ekonomsku suradnju i razvoj (engl. *Organisation for Economic Co-operation and Development*)

OIE – obnovljivi izvori energije

PFC – perfluorouglik

PO₄ - fosfat

PV – fotonaponski (engl. *photovoltaic*)

S – sumpor

SAD – Sjedinjene Američke Države

SF₆ – sumporov heksafluorid

SMR – parna reformacija metana (engl. *steam methane reforming*)

SO₂ – sumporov dioksid

SO_x – sumporovi oksidi

SPP – stlačeni prirodni plin

SUV – terenac (engl. *sports utility vehicle*)

UPP – ukapljeni prirodni plin

USD – američki dolar

WTT – od bušotine do spremnika (engl. *well-to-tank*)

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

°C – stupanj Celzijus

€/kg – eura po kilogramu

EJ – eksadž

GJ/m³ – gigadžul po kubičnom metru

GW – gigavat

kgCO_{2eq}/kgH₂ – kilogram ekvivalenta ugljičnog dioksida po kilogramu vodika

kg/h – kilogram po satu

kJ/kg – kilodžul po kilogramu

km – kilometar

km/h – kilometar na sat

kWh – kilovatsat

m³ – kubični metar

mJ – milidžul

MTPA – milijun tona godišnje

Mt – megatona

MW – megavat

MWh/t H – megavat sat po toni vodika

TWh – teravatsat

USD/kg – američki dolar po kilogramu

1. UVOD

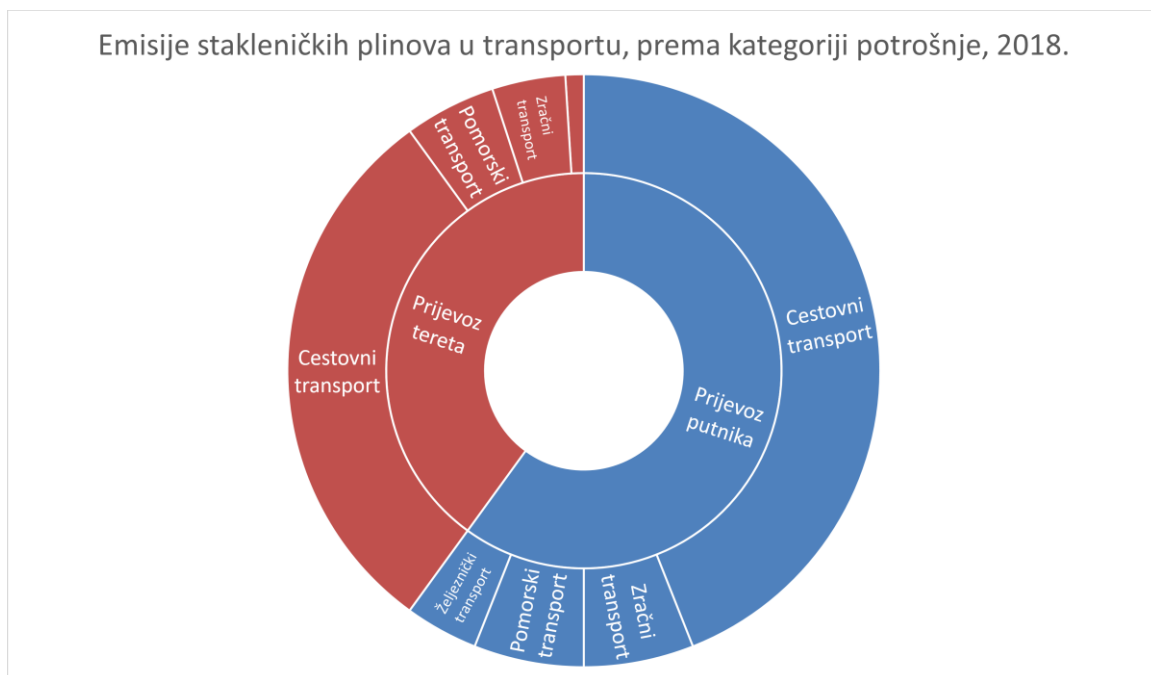
Posljednjih desetljeća došlo je do porasta ekološke svjesnosti i sve većeg praćenja emisija ispušnih plinova. Predviđen je rast globalne primarne potrošnje energije od gotovo 50% između 2018. godine i 2050. godine. Najveći rast predviđen je u zemljama koje nisu članice OECD, osobito u azijskim zemljama (EIA, 2019). Kako bi se zadovoljila potražnja za energijom u budućnosti, uz smanjenje emisija, veliki napori trebaju biti uloženi u implementaciju goriva čijim korištenjem nastaju manje emisije stakleničkih plinova nego korištenjem nafte i ugljena koji danas zauzimaju veliki udio u energetsom miksu. Udio nafte u globalnoj potrošnji primarne energije u 2020. godini bio je najveći od svih goriva, 31,2%, a na drugom mjestu nalazio se ugljen s 27,2%, dok je prirodni plin na trećem mjestu s 24,7%. Proteklih godina uočava se trend pada udjela nafte i ugljena u potrošnji primarne energije, dok prirodni plin i obnovljivi izvori energije bilježe rast (BP, 2021). Iz ovog trenda vidljivo je da se globalno tržište energije sve više okreće ekološki prihvatljivijim gorivima. Prirodni plin jedno je od goriva koje se često spominje kada se govori o smanjenju emisija te gorivo koje je doživjelo konstantan rast udjela u potrošnji primarne energije, a mnogi upravo u njemu vide tranzicijsko gorivo, obzirom da se smatra „najčišćim“ fosilnim gorivom. S druge strane, s obzirom na to da se dosadašnji ciljevi smanjenja emisija nisu ostvarili, zagovara se da tranzicijsko gorivo bude vodik kako bi se dodatno smanjile emisije stakleničkih plinova. Sektor prometa jedan je od najvećih emitera emisija stakleničkih plinova koji uzrokuje 21% globalnih emisija ugljika. Zbog velikih emisija, ali i zbog trenda rasta, ovaj sektor jedan je od prioriteta za dekarboniziranje. Tradicionalno, velik dio ovog sektora još je uvijek baziran na fosilnim gorivima.

2. KLIMATSKE PROMJENE I POTREBA ZA UVOĐENJEM ALTERNATIVNIH GORIVA

Sektor prometa jedan je od sektora koji najviše doprinose povećanju emisija stakleničkih plinova. 95% ovog sektora i dalje ovisi o gorivima na bazi nafte. Brojne politike i strategije naglašavaju važnost dekarboniziranja ovog sektora i smanjenja njegovog doprinosa globalnim emisijama. Potrebni su daljnji napori za dekarbonizaciju ovog iznimno zahtjevnog sektora s obzirom na to da se predviđa da će, uz uspješnu primjenu svih trenutnih politika, emisije iz prometa do 2050. godine narasti za oko 20%. Postavljanje ambicioznih ciljeva moglo bi smanjiti emisije za do 70% pri čemu će važnu ulogu imati alternativna goriva koja će se koristiti u transportu (Brand, 2021).

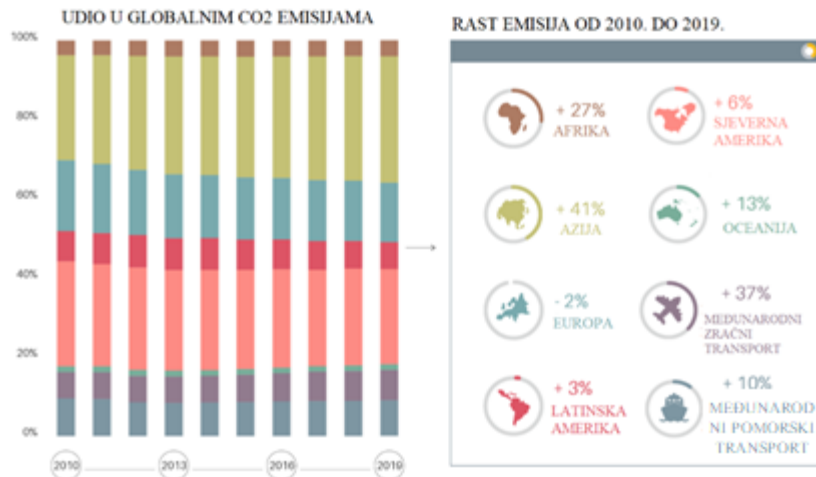
2.1. Emisije iz sektora prometa

Promet stvara oko 21% globalnih emisija ugljika i predstavlja sektor s najvećim emisijama u brojnim zemljama, osobito visoko razvijenim. Veliki rast ovog sektora mogao bi dovesti do značajnog povećanja emisija, ako se u većoj mjeri ne uvedu niskougljična goriva. Do 2050. godine predviđa se da će se ukupna prometna aktivnost više nego udvostručiti do 2050. godine u usporedbi s 2015. godinom. Sama elektrifikacija automobilske prometa u mjeri u kojoj se predviđa nije dovoljna za postizanje ciljeva smanjenja emisija. Veliki je problem spor napredak elektrifikacije, osobito u sektoru teškog cestovnog transporta i cestovnog transporta gdje bolje performanse pokazuju vozila na gorivne ćelije na vodik te ukapljeni prirodni plin (UPP). Dio prometa koji je iznimno teško dekarbonizirati je pomorski transport. Do 2050. godine očekuje se da će emisije iz pomorskog transporta činiti 10% globalnih emisija. Upravo u pomorskom transportu postoji veliki potencijal za korištenje alternativnih goriva, primjerice amonijaka te UPP-a (Brand, 2021). Emisije stakleničkih plinova iz prometnog sektora najvećim dijelom dolaze iz cestovnog transporta putnika (44%) i cestovnog transporta tereta (30%). Raspodjela emisija u transportu prikazana je na slici 2-1. (Slocat, 2021).



Slika 2-1. Emisije stakleničkih plinova u transportu, prema kategoriji potrošnje, 2018. (Slocat, 2021)

Od ukupnih emisija 60% emisija čine emisije iz prijevoza putnika, a 40% emisije iz prijevoza tereta. Najviše emisija čine emisije iz cestovnog transporta, ukupno čak 74%. Emisije iz pomorskog transporta čine 11% ukupnih emisija, emisije iz zračnog transporta 10%, a iz željezničkog transporta 5%. Većina regija ima trend porasta emisija u posljednjim desetljećima. Regija koja ima najveće povećanje emisija iz transporta u razdoblju od 2000. godine do 2019. godine je Azija s rastom od 117%, a slijedi ju Afrika sa 105% te Latinska Amerika s 39%. Iako Europa u ovom razdoblju ima povećanje emisija iz transporta od 7%, ako promatramo razdoblje od 2010. do 2019. godine, Europa ima smanjenje od 2%, što je vidljivo na slici 2-2. (Slocat, 2021).



Slika 2-2. Udio emisija iz prometa po regijama te u međunarodnom zrakoplovnom i pomorskom transportu, 2010.-2019. (Slocat, 2021)

2.2. Politika i zakonski okvir

Brojni zakonski akti, strategije i direktive doneseni su u cilju ograničavanja emisija stakleničkih plinova i antropogenog utjecaja na klimatske promjene. Pariški sporazum o klimatskim promjenama predstavlja prekretnicu u multilateralnom procesu sprječavanja klimatskih promjena kao prvi pravno obvezujući sporazum koji postavlja svim zemljama potpisnicama zajednički cilj da poduzmu ambiciozne napore u borbi protiv klimatskih promjena. Njegov je cilj ograničiti globalno zatopljenje na znatno ispod 2°C, a po mogućnosti na 1,5°C, u usporedbi s predindustrijskim razinama (United Nations Climate Change, 2015). Brojne direktive Europske unije (EU) potiču korištenje obnovljivih izvora energije i alternativnih, odnosno niskougljičnih goriva. 2014. godine donesena je Direktiva 2014/94/EU Europskog parlamenta i Vijeća o uspostavi infrastrukture za alternativna goriva na podlozi Komunikaciji Komisije iz 2013. godine pod nazivom „Čista energija za promet: europska strategija za alternativna goriva”. Ovom Direktivom UPP je prepoznat kao alternativno gorivo za plovila, kojim se može postići propisano smanjenje sadržaja sumpora u brodskim gorivima u područjima kontrole emisija SO_x. Osnovna mreža mjesta za opskrbu UPP-om u morskim lukama i lukama unutarnjih voda trebala bi biti raspoloživa najkasnije do kraja 2025. godine odnosno do kraja 2030. godine. Također, UPP bi mogao ponuditi troškovno učinkovitu tehnologiju koja bi omogućila da teška teretna vozila zadovolje ograničenja emisija onečišćujućih tvari u skladu s normama Euro VI, kako je navedeno u Uredbi (EZ) br. 595/2009 Europskog parlamenta i Vijeća. Osnovna mreža TEN-T (engl.

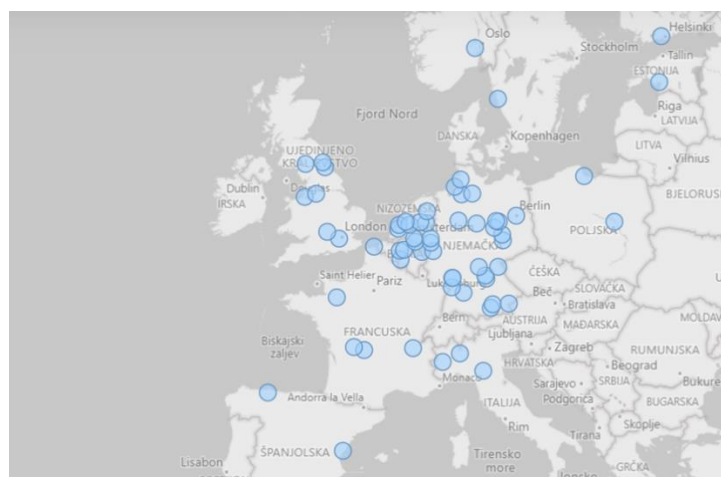
Trans-European Transport Network) koridora trebala bi biti osnova za postavljanje infrastrukture za UPP jer pokriva glavne prometne tokove EU-a. Države članice bi trebale osigurati uspostavu javno dostupnih mjesta za opskrbu do 31. prosinca 2025. godine, barem uzduž postojeće osnovne mreže TEN-T, na odgovarajućim udaljenostima, uzimajući u obzir najmanju udaljenost koju mogu prijeći teška motorna vozila na UPP. Okvirna potrebna prosječna udaljenost između mjesta za opskrbu trebala bi biti 400 km (Službeni list Europske unije, 2014). 2018. godine donesena je Direktiva (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora. Ova Direktiva promiče uporabu obnovljive energije u sektoru električne energije, sektoru grijanja i hlađenja te u sektoru prometa. U ovoj Direktivi vodik se spominje u kontekstu definiranja energetske sadržaja goriva dobivenih iz obnovljivih izvora energije te u kontekstu uvođenja jamstva o podrijetlu (Službeni list Europske unije, 2018). Međunarodna pomorska organizacija (engl. *IMO*) oblikuje jedinstvene i međunarodno priznate sigurnosne i ekološke norme za pomorski promet. Aneks VI MARPOL-a (engl. *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*) prvi put je usvojen 1997. godine. On ograničava glavne onečišivače zraka sadržane u ispušnim plinovima brodova, uključujući SO_x i NO_x, te zabranjuje namjerne emisije tvari koje oštećuju ozonski omotač. Aneks VI MARPOL-a također regulira spaljivanje na brodovima i emisije hlapljivih organskih spojeva iz tankera u područjima s nadzorom emisija (ECA) (IMO, 2019). Trenutna i moguća buduća ECA (engl. *Emission Control Area*) područja prikazana su na slici 2-3.



Slika 2-3. Trenutna ECA i moguća buduća ECA područja (Budanko, 2018)

Europski zeleni plan za EU donesen je 2019. godine te predstavlja novu strategiju rasta EU-a s ciljem neto nultih emisija stakleničkih plinova do 2050. godine. U Zelenom planu se

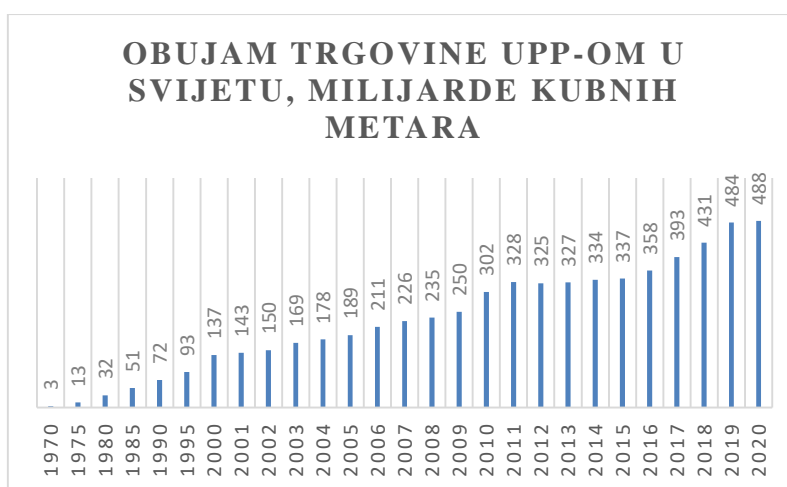
naglašava važnost regulatornog okvira za energetska infrastrukturu i poticanje uvođenja inovativnih tehnologija i infrastrukture, uključujući vodikove mreže. Prioritetna područja uključuju čisti vodik, gorivne ćelije i druga alternativna goriva, skladištenje energije te hvatanje, skladištenje i upotrebu ugljika (Europska komisija, 2019). Postoje i brojni zakonodavni akti koji neizravno potiču korištenje vodika i razvoj tehnologije za vodik. Projekt HyLaw identificirao je više od 50 zakonodavnih akata EU koji neizravno utječu na razvoj vodikove tehnologije. EU podržava istraživačke i inovacijske projekte vezane za vodik kroz istraživački okvir Horizon 2020 i Horizon Europe (2021-2027). U srpnju 2020. godine prihvaćena je strategija za vodik EU-a kojoj je glavni cilj ubrzati razvoj niskougljičnog vodika. Ova strategija predviđa postupnu putanju korištenja vodika, u početku uključujući projekte plavog vodika. Strateški je cilj za 2024. godinu instaliranje najmanje 6 GW elektrolizera koji proizvode milijun tona obnovljivog vodika te 40 GW do 2030. godine uz 10 milijuna tona proizvodnje. Pokrenut je i Europski savez za čisti vodik (engl. *European Clean Hydrogen Alliance*) koji je uspostavio forum u koji su uključene industrija, javna tijela i civilno društvo s ciljem koordiniranja investicija vezanih za vodik. Iako trenutno udio vodika u ukupnoj potrošnji energije EU iznosi tek 2%, Europska komisija previđa udio vodika u ukupnoj potražnji energije u EU od 9% u 2050. godini. Industrijska udruga Hydrogen Europe planira instalirati kapacitete obnovljivog vodika od 40 GW u EU i još 40 GW u Ukrajini i Sjevernoj Africi za uvoz vodika u EU. Vodik predstavlja mogućnost za smanjenje ovisnosti EU o uvozu energije te za diverzificiranje dobavnih pravaca (European Parliament, 2021).



Slika 2-4. Vodik u projektima krajnje upotrebe (ENTSOG, 2022)

3. UKAPLJENI PRIRODNI PLIN

Lanac opskrbe UPP-om uključuje četiri aktivnosti: proizvodnju, ukapljivanje, transport i uplinjavanje. Udio UPP-a u svjetskoj trgovini prirodnim plinom doživio je rast posljednjih godina. 2000. godine u svijetu je obujam trgovine ukapljenim prirodnim plinom iznosio 137 milijardi m³ da bi u 2020. godini taj volumen iznosio 488 milijardi m³ plina (Statista, 2021). Uzlazni trend vidljiv je na slici 3-1. Ovaj uzlazni trend omogućen je rastom kapaciteta za uplinjavanje odnosno ukapljivanje prirodnog plina. Brojne prognoze predviđaju daljnji rast važnosti UPP-a u svijetu.



Slika 3-1. Obujam trgovine UPP-om u svijetu, 1970.-2020., milijarde kubnih metara (Statista, 2021)

3.1. Područje primjene ukapljenog prirodnog plina

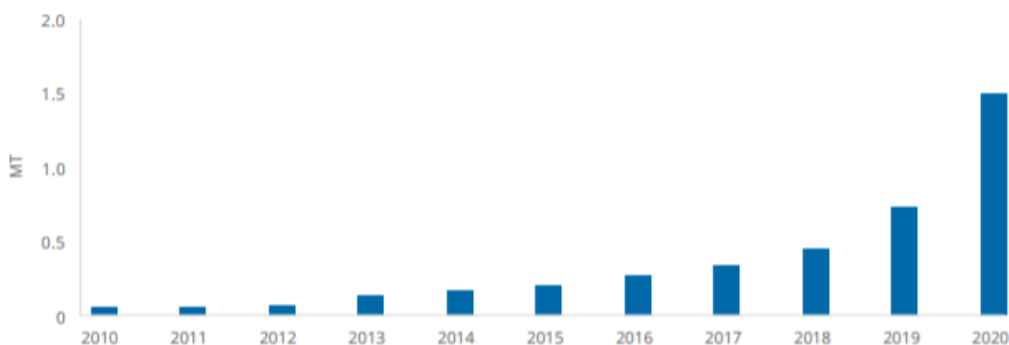
UPP je jedno od najčišćih danas dostupnih fosilnih goriva sa zanemarivim udjelom sumpora i čađe koje ima široki raspon primjene, a neke od njih su proizvodnja električne energije, korištenje u industriji i zgradarstvu, skladištenje prirodnog plina za uravnoteženje „pikova“ potrošnje energije te kao gorivo za cestovni, željeznički i pomorski transport. UPP ima široku primjenu u industriji, a industrije u kojima se koristi su, primjerice, prehrambena, metalurška, kemijska, tekstilna i keramička. Budućnost primjene UPP-a mnogi vide u sektoru transporta u kojem on ima veliki potencijal kao gorivo koje bi moglo značajno smanjiti emisije. Iako su cijene vozila koja koriste UPP kao gorivo veće od onih vozila koja koriste goriva na bazi nafte, UPP ima brojne prednosti u usporedbi s učestalo korištenim gorivima. U cestovnom transportu UPP se danas koristi najviše za teška vozila poput kamiona i autobusa. Primjena u cestovnom transportu u budućnosti će biti ograničena na

vozila s radnim ciklusom od 950 do 1200 kilometara između punjenja gorivom (Drljača, 2018). Primjena UPP-a u pomorskom transportu mogla bi uvelike doprinijeti ostvarivanju zadanih ciljeva smanjenja glavnih zagađivača koji su sadržani u ispušnim plinovima, osobito u ECA područjima. Emisije SO_x ispuštenih tijekom plovidbe predstavljaju 60% globalnih emisija SO_x-a u transportu. Emisije NO_x iz brodskog prijevoza iznose 15% svjetskih antropogenih NO_x emisija i predstavljaju oko 40% globalnih emisija ispuštenih u teretnom prometu. Upravo su emisije NO_x, SO_x, kao i dozvoljen udio sumpora u gorivu, ograničeni na ECA područjima. U usporedbi s teškim loživim uljem UPP emitira 85% manje NO_x i SO_x, 90% manje čađe i 30% manje CO₂ (Budanko, 2018). Najintenzivnija potrošnja UPP-a u transportu, čime nastaju i najveće emisije, je u pomorskom transportu s 2000 kg/h, dok je najmanje intenzivna u cestovnom, 10 kg/h (Banaszkiewicz i drugi, 2020).

3.1.1. Ukapljeni prirodni plin u pomorskom transportu

Trenutne emisije koje dolaze iz pomorskog transporta čine veliki udio u ukupnim svjetskim emisija. Emisije SO_x-a nastale plovidbom čine čak 60% globalnih emisija SO_x dok emisije NO_x nastale tijekom plovidbe čine 15% globalnih emisija NO_x (Budanko, 2018). Da bi ostvarili zadani ciljevi, konvencionalna brodska goriva potrebno je zamijeniti alternativnim gorivima. UPP jedno je od goriva koja se nameću kao moguća zamjena za konvencionalna brodska goriva s obzirom na to da je riječ o jednom od najčišćih dostupnih fosilnih goriva koje ima zanemariv udio sumporovih spojeva i čađe. Korištenjem UPP-a moguće je značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova koje nastaju u sektoru brodskog prometa. Moguće je smanjiti emisije CO₂ za oko 30%, SO_x i NO_x za oko 85% te čađe za oko 90% u odnosu na korištenje konvencionalnih brodskih goriva (Budanko, 2018). Promatranjem cjeloživotnog ciklusa (engl. *Life Cycle Analysis*, LCA) UPP-a, počevši od bušotine, uočeno je da je korištenjem UPP-a kao brodskog goriva moguće smanjenje emisija stakleničkih plinova do 21% u odnosu na sadašnja brodska goriva na bazi nafte. Ako se ista analiza radi počevši od spremnika, smanjenje emisija stakleničkih plinova iznosi do 28% (Thinkstep, 2019). Na kraju 2020. godine bilo je 572 aktivnih UPP plovila (IGU, 2021). U 2021. godini vidljiv je veliki porast broja naručenih UPP plovila, pa tako gotovo 30% novonaručenih plovila, prema bruto tonaži, čine UPP plovila. U sektoru plovila s ultra velikim spremnicima UPP plovila dominiraju među novonaručenim plovilima te njihov udio iznosi više od 50% (SeaLNG, 2021). Cijena UPP plovila važna je stavka u odabiru pri naručivanju novih plovila. Trošak plovila uvelike ovisi o njegovim karakteristikama. Od samog početka korištenja UPP plovila, njihova je cijena bila veća nego cijena konvencionalnih brodova, a

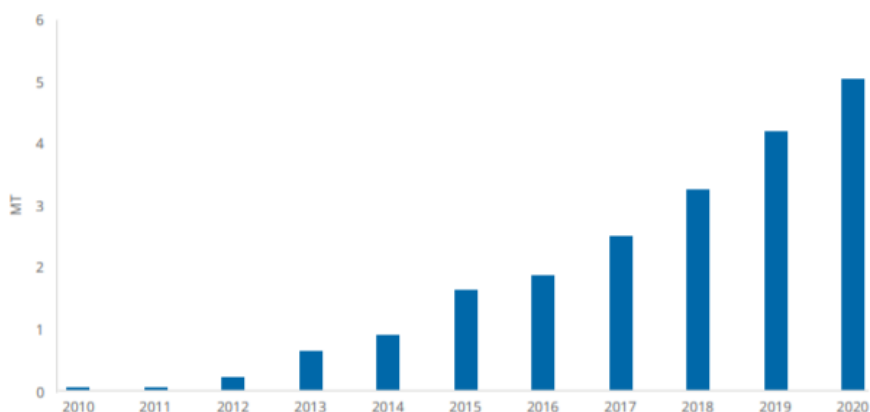
povećanjem njihove učinkovitosti danas se razlika u cijeni smatra nadoknadivom (IGU, 2021.). Infrastruktura za UPP bunkering dostupna je na 141 lokaciji u svijetu, a u 2022. godini očekuje se povećanje ovog broja na 170. Do kraja ovog desetljeća, očekuje se da će infrastruktura za UPP bunkering činiti 10% ukupne infrastrukture za bunkering (SeaLNG, 2021). Jedna od najvažniji stavki u odabiru alternativnog goriva za brodove je cijena UPP-a u usporedbi s ostalim alternativnim gorivima. Cijena UPP-a u pomorskom transportu, kao i cijena UPP bunkeringa, još uvijek nije određena i ovisi o brojnim faktorima. Jedan od važnih faktora je cijena prirodnog plina na pojedinim tržištima. Osim cijene prirodnog plina, važna je i cijena samih brodova pogonjenih UPP-om ili cijena prenamjene brodova kako bi mogli biti pogonjeni UPP-om te njihovi operativni troškovi. Udio UPP-a u pomorskom transportu do 2050. godine imat će različite vrijednosti prema različitim scenarijima. Prema „High gas“ scenariju, koji predviđa mali udio drugih alternativnih goriva, udio UPP-a bi bio najveći, čak 61%. Prema scenariju „Transition“, koji predviđa povećanu upotrebu vodika, udio UPP-a iznosi 11%. „Limited gas“ je scenarij koji predviđa visoke cijene UPP-a te veliku dostupnost biogoriva, a u njemu je udio UPP-a najmanji i iznosi 3%. U „Business as Usual“ scenariju ne previđa se ispunjenje IMO ciljeva te udio UPP-a iznosi 25%. IEA (engl. *International Energy Agency*) je u svojoj projekciji upotrebe brodskih goriva od 2019. godine do 2070. godine, koja se temelji na Scenariju održivog razvoja, predvidjela da potrošnja UPP-a dostiže vrhunac u 2040. godini nakon čega se UPP postupno istiskuje gorivom bez ugljika, kao što je amonijak (International Bank for Reconstruction and Development, 2021). U samo 10 godina, s razvojem UPP infrastrukture, došlo je do značajnog rasta potrošnje UPP-a u pomorskom transportu, što je vidljivo na slici 3-2. (IGU, 2021).



Slika 3-2. Potrošnja UPP-a u pomorskom transportu, 2010.-2020.- MT (IGU, 2021)

3.1.2. Ukapljeni prirodni plin u cestovnom transportu

Cestovni transport uključuje promet autobusa, automobila, kamiona i ostalih vozila. UPP je kao cestovno gorivo doživio nagli porast potrošnje posljednjih godina. Potrošnja u 2020. godini iznosila je 11,7 milijuna tona što predstavlja udvostručenje u odnosu 2016. godinu (IGU, 2021). Porast potrošnje UPP-a u cestovnom transportu vidljiv je na slici 3-3.



Slika 3-3. Potrošnja UPP-a u cestovnom transportu, 2010.-2020., MT (IGU, 2021)

UPP ima značajno manje emisije stakleničkih plinova u odnosu na učestalo korištena goriva u cestovnom transportu. UPP je lakši od benzina ili dizela, ali je nižeg energetskeg sadržaja zbog čega su za prelazak iste udaljenosti potrebni veći spremnici nego kod upotrebe benzina i dizela. Jedna litra dizel goriva ima istu energetskeg vrijednost kao 1,7 litara UPP-a. Ukapljeno stanje omogućava veliki dotok prilikom punjenja spremnika i omogućava dotok punjenja koji je ekvivalentan punjenju spremnika dizelom. Kamionski promet je sektor u kojemu postoji veliki potencijal za UPP. S obzirom na to da do sada nije još dovoljno razvijena druga tehnologija s manjim ugljičnim otiskom koja bi adekvatno zadovoljila pogonske potrebe prosječnog kamiona, za smanjenje emisija nužna je upotreba prirodnog plina. Danas se UPP upotrebljava u vozilima za lokalnu upotrebu, do 450 km između punjenja (Drljača, 2018). Jedan od najvažnijih čimbenika kod odabira goriva za kamione je cijena goriva i cijena samog kamiona. Cijena kamiona pogonjenog UPP-om je 30-40% viša od cijene dizelskog kamiona, ali cijena UPP-a je u mnogim slučajevima niža od cijene dizela. Osim cijene kamiona, još jedna prepreka većoj upotrebi UPP-a u kamionima, nedovoljna je rasprostranjenost UPP punionica. Jedan od glavnih nedostataka u budućnosti je činjenica da će primjena UPP-a biti ograničena na vozila s radnim ciklusom od 950 do 1200 km između punjenja gorivom (Drljača, 2018). Sigurnost upotrebe UPP-a u cestovnom transportu

također je jedan od velikih izazova upotrebe UPP-a. Vozila koja koriste UPP kao gorivo izložena su kriogenim temperaturnim i tlačnim opterećenjima te zamoru materijala zbog čega se vijek trajanja UPP spremnika u vozilima procjenjuje na 15 do 20 godina (Banaszkiewicz i drugi, 2020). Ako neke države, kao što je najavljeno, u potpunosti zabrane vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem, upitno je kakva je budućnost UPP-a u cestovnom transportu. Njemačka, Francuska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Španjolska i Kanda namjeravaju zabraniti ovakva vozila do 2040. godine, Indija do 2030. godine, a Nizozemska do 2025. godine (Wu i drugi, 2019). 2020. godine na svijetu je bilo 29,5 milijuna vozila koja koriste prirodni plin za pogon. Najviše vozila nalazi se u regiji Azija i Azija Pacifik. U Europi se čak 55% vozila na prirodni plina nalazi u Italiji. Broj novoregistriranih UPP vozila u 2019. godini je porastao gotovo tri puta u odnosu na 2018. godinu. Kina je postala 2010. globalni lider u broju UPP vozila. Azijske i Europske vlade ulažu brojne napore za uvođenje UPP vozila, osobito u sektoru teškog transporta. Krajem 2020. godine na globalnoj razini postojalo je 31700 kopnenih stanica za punjenje vozila prirodnim plinom, a gotovo 85% čine stanice za stlačeni prirodni plin (SPP). Broj stanica za punjenje cestovnih vozila UPP-om doživio je veliki rast od 2013. godine. Najviše stanica, njih 63%, nalazi se u regiji Azija i Azija Pacifik. Europa ima oko 4200 stanica za punjenje cestovnih vozila prirodnim plinom, a više od 90% čine stanice za SPP, dok se u budućnosti očekuje veliki rast broja UPP punionica (IGU, 2021).

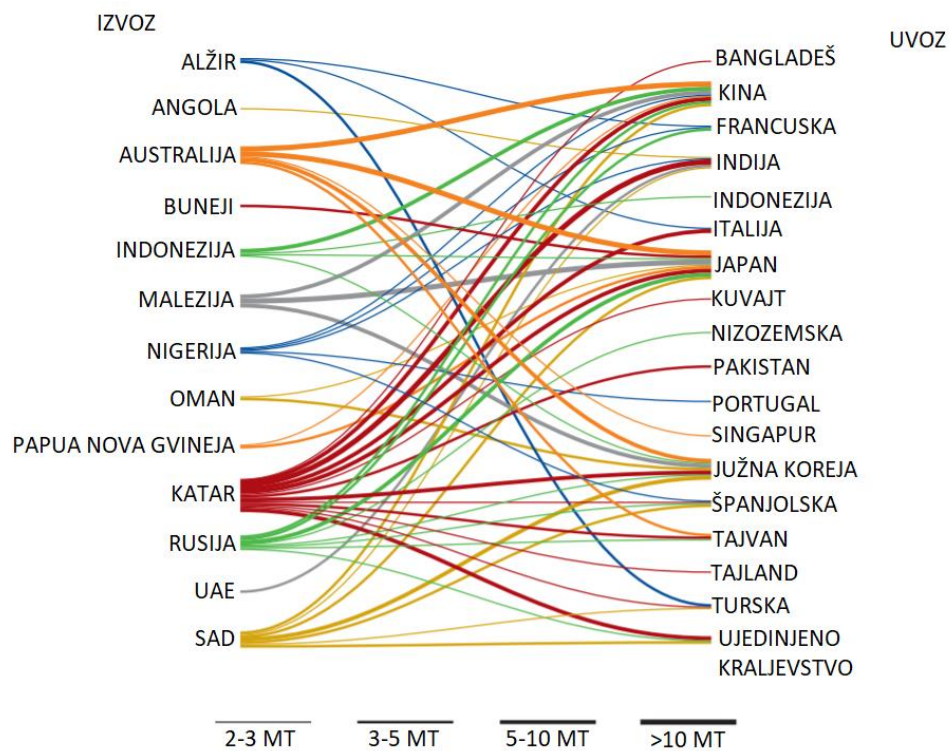
3.2. Transport ukapljenog prirodnog plina

Većina UPP-a transportira se brodovima za prijevoz UPP-a u kriogenim spremnicima dok se manja količina transportira manjim kontejnerima koji se postavljaju na brodove i kamione (EIA, 2022). UPP se može transportirati i plinovodima, a ovaj se način transporta uglavnom primjenjuje na kratkim udaljenostima. Kako bi UPP ostao u tekućem obliku, temperaturu unutar plinovoda potrebno je održavati ispod temperature vrelišta plina što zahtjeva kombinacije mehaničkih izolacija plinovoda, primjerice staklene pjene i vakuumske slojeve. UPP plinovodi predstavljaju veliku investiciju te su kompliciraniji za izgradnju od standardnih plinovoda koji se koriste za transport prirodnog plina (Energy Education, 2015). Većina UPP-a danas se transportira na velike udaljenosti, uglavnom na interkontinentalnoj razini. Za ovakav transport koriste se UPP brodovi. Glavna značajka UPP broda su izolirani spremnici koji omogućavaju transport UPP-a u tekućem stanju. Prvi UPP brodovi pojavili su se 1950-ih godina, a od ranih 2000-ih rast broja UPP brodova drastično se ubrzao (Eikens, 2020). Flota za transporta UPP-a se 2020. godine sastojala od

642 plovila, a isporučeno je 47 novih plovila te ih je još 40 naručeno (GIIGNL, 2021). Cijena transporta UPP-a ovisi o brojnim čimbenicima, kao što su cijena goriva koje se koristi za pogon broda, cijena broda, brzina plovidbe, meteorološki uvjeti za vrijeme plovidbe, cijena UPP-a i ruta plovidbe.

3.3. Tržište ukapljenog prirodnog plina danas

Tržište prirodnim plinom počelo se u većem obujmu razvijati 2000-ih godina. 2000. godine obujam trgovine UPP u svijetu iznosio je 137 milijardi m³ (Statista, 2021). Obujam UPP-a kojim se trguje na globalnoj razini kontinuirano raste. U 2020. godini trgovina UPP-om porasla je za 0,4% u odnosu na 2019. godinu, dosegnuvši 356,1 MT. Iako je 2020. godina, osobito njena prva polovica, obilježena utjecajem pandemije Covid-19 te se može okarakterizirati kao godina tržišne volatilnosti, tržište UPP-a u ovoj je godini pokazalo otpornost i fleksibilnost. U 2020. godini 8 novih UPP terminala počelo je s radom, u Bahreinu, Brazilu (2), Hrvatskoj, Indiji, Indoneziji, Mianmaru i Portoriku. Ukupno je bilo 20 zemalja izvoznica te 43 zemlje uvoznice UPP-a. Ukupni kapacitet ukapljivanja iznosio je 947 MTPA, a ukupni kapacitet uplinjavanja 454 MTPA. U 2020. godini Australija je prvi puta izvezla više UPP-a nego Katar te time postala najveća izvoznica UPP-a u svijetu. Azija je i dalje vodeća uvozna regija sa 71% udjela u globalnom uvozu UPP-a. Uvoz je porastao u svim azijskim zemljama osim Japana, Pakistana, Indonezije, Malezije i Singapura. Europsko je tržište u 2020. godini doživjelo pad uvoza od 5%. Najveća uvoznica ostala je Španjolska s 15,4 MT dok je Ujedinjeno Kraljevstvo s 13,4 MT prestiglo Francusku koja je uvezla 13,1 MT (GIIGNL, 2021).



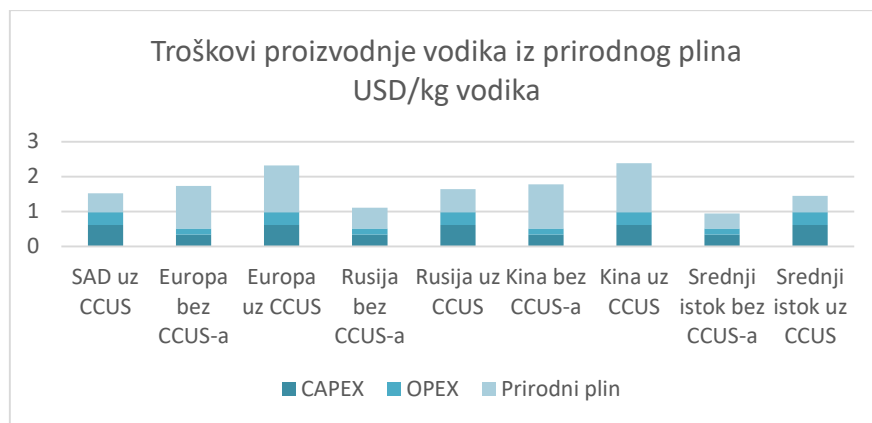
Slika 3-4. Glavni tokovi ukapljenog prirodnog plina u 2020. godini (GIIGNL, 2021)

4. VODIK

Vodik (H) je najlakši kemijski element u periodnom sustavu elemenata, bezbojna, zapaljiva, plinovita tvar bez boje, mirisa i okusa. Pri normalnim uvjetima, plinoviti vodik je agregacija molekula vodika od kojih se svaka sastoji od para atoma vodika (Jolly, 1999). Korištenje vodika ima brojne prednosti, a on se, kao gorivo, koristi već više od 200 godina. Može se skladištiti, lagan je, energetski gust te nema izravnih emisija stakleničkih plinova. Zbog svojih karakteristika, smatra se da bi vodik mogao značajno doprinijeti energetskej tranziciji kao čisto gorivo. Danas se najviše vodika koristi u industriji i to pretežito u preradi nafte, proizvodnji amonijaka, proizvodnji metanola i proizvodnji čelika. Kako bi njegov utjecaj bio što veći, potrebno ga je implementirati u sektore u kojima je njegov udio danas malen, poput prometa, zgradarstva i proizvodnje električne energije (International Energy Agency, 2019). Iako se danas većina vodika koristi u industriji, njegov tržišni potencijal je ogroman. Trenutna godišnja prodaja vodika predstavlja tržišnu vrijednost od približno 174 milijarde USD što već premašuje vrijednost godišnje trgovine UPP-om (IRENA, 2022).

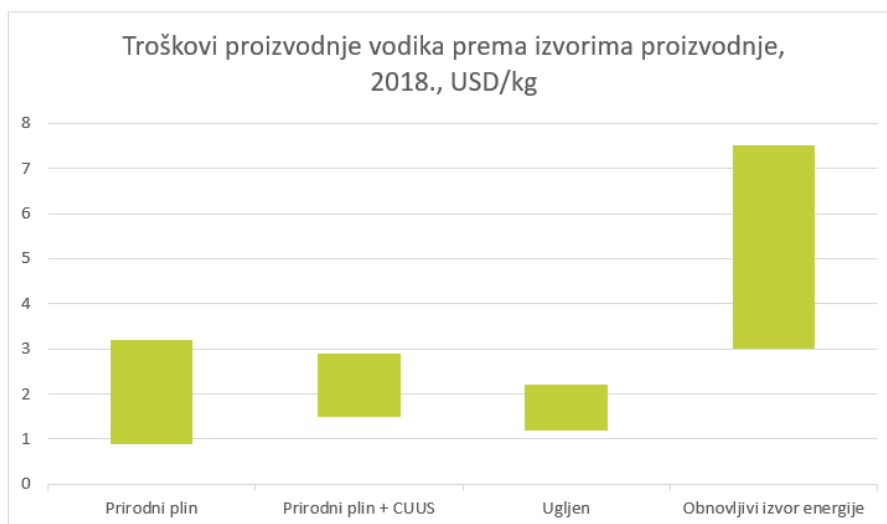
4.1. Proizvodnja vodika

Vodik se može proizvoditi iz fosilnih goriva, biomase, vode ili iz njihovih mješavina. Prirodni plin trenutno je primarna sirovina za proizvodnju vodika, a iz njega se proizvodi oko tri četvrtine godišnje globalne proizvodnje vodika od oko 70 milijuna tona. Na trošak proizvodnje vodika iz prirodnog plina utječe niz tehničkih i ekonomskih čimbenika, pri čemu je važno istaknuti cijene plina i kapitalne troškove. Troškovi goriva koje se koristi najveća je komponenta troškova i čini između 45% i 75% troškova proizvodnje vodika (IEA, 2019). Troškovi proizvodnje vodika iz prirodnog plina u odabranim regijama, uz i bez CCUS-a (engl. *Carbon Capture, Usage and Storage*) prikazani su na slici 4-1.



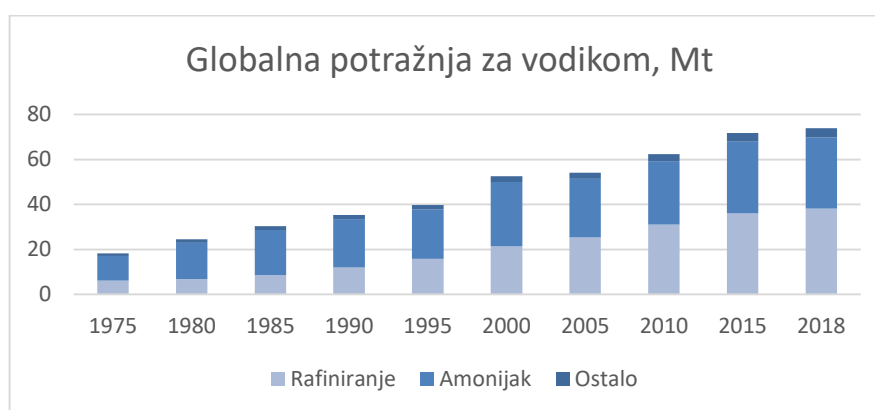
Slika 4-1. Troškovi proizvodnje vodika iz prirodnog plina u odabranim regijama, 2018., USD/kg vodika (IEA 2019)

Kao što je vidljivo na slici 4-1., trošak proizvodnje vodika iz prirodnog plina u 2018. godini bio je u rasponu od 0,9 do 3,2 USD/kg vodika, dok uz upotrebu CCUS-a prilikom proizvodnje taj trošak iznosi od 1,5 do 2,9 USD/kg vodika. U 2018. godini najjeftinije je bilo proizvesti vodik iz ugljena pri čemu trošak iznosi od 1,2 do 2,2 USD/kg vodika. Vodik je najskuplje bilo proizvesti iz obnovljivih izvora energije pri čemu trošak iznosi od 3,0 do 7,5 USD/kg vodika. S obzirom na trend smanjenja troškova obnovljivih izvora energije, sve više raste interes za vodik koji se proizvodi elektrolizom iz električne energije dobivene iz obnovljivih izvora energije, osobito PV (engl. *Photovoltaic*) panela i vjetra. Uz smanjenje troškova za proizvodnju energije iz PV panela i vjetra, izgradnja elektrolizera za proizvodnju vodika na lokacijama s povoljnim uvjetima za obnovljive izvore energije mogla bi postati jeftina opcija opskrbe vodikom, čak i nakon što se uzmu u obzir troškovi distribucije i transporta vodika s tih lokacija do krajnjih korisnika (IEA, 2019).



Slika 4-2. Troškovi proizvodnje vodika prema izvorima proizvodnje, 2018., USD/kg (IEA, 2019)

Do kraja ovog desetljeća predviđa se da će zeleni vodik postati konkurentan plavom vodikom, osobito u zemljama poput Kine, Brazila i Indije u kojima se proizvode jeftini elektrolizeri ili koje imaju relativno jeftinu energiju iz obnovljivih izvora energije i relativno visoke cijene prirodnog plina. Zbog iznimno visokih cijena prirodnog plina u Europi u 2021. i 2022. godini, zeleni vodik je bio jeftiniji od sivog vodika (IRENA, 2022). Daljnjim rastom cijena prirodnog plina očekuje se nastavak ovog trenda. Danas se proizvodi oko 120 milijuna tona vodika godišnje. Od ukupne proizvedene količine, dvije trećine čini čisti vodik, a jednu trećinu čini mješavina s drugim plinovima (Šarčević, 2020). Globalni kapacitet elektrolizera danas iznosi nešto više od 0,3 GW (IRENA, 2022). Potražnja za vodikom, koja je narasla više od tri puta od 1975. godine do 2018. godine, i dalje raste. Globalna potražnja za vodikom od 1975. godine do 2018. godine prikazana je na slici 4-3. (IEA, 2019).



Slika 4-3. Globalna potražnja za vodikom, 1975.-2018., Mt (IEA, 2019)

Vodik se danas u velikoj mjeri proizvodi iz fosilnih goriva zbog čega je proizvodnja vodika odgovorna je za emisije CO₂ od oko 830 milijuna tona godišnje. 6% svjetskog prirodnog plina i 2% ugljena iskoristi se za proizvodnju vodika. Trenutno, primarni izvor za proizvodnju vodika je prirodni plin s oko tri četvrtine udjela. Nakon prirodnog plina slijedi ugljen, dok se nafta i električna energija koriste u manjoj mjeri (Energy Agency, 2019). Afrika, Amerika, Bliski istok i Oceanija imaju najveći tehnički potencijal za proizvodnju vodika iz obnovljivih izvora energije. (IRENA, 2022).



Slika 4-4. Globalna proizvodnja vodika, po izvorima, % (Molloy i Baronett, 2019)

4.2. Vrste vodika

Simbolična podjela vodika na različite boje koristi se kako bi se prikazalo na koji je način vodik proizveden. Najviše vodika se proizvodi iz fosilnih goriva, točnije prirodnog plina, oko 48% (Molloy i Baronett, 2019).

- Ako se kao sirovina za proizvodnju vodika koristi ugljen, takav vodik se naziva **crni** i **smeđi vodik**. Crni se vodik dobiva iz crnog ugljena dok se smeđi dobiva iz lignita. Ove dvije vrste vodika imaju najveći ugljični otisak i smatraju se neprihvatljivima (National Grid, 2022).
- Vodik koji se proizvodi iz fosilnih goriva, uz ispuštanje CO₂ u atmosferu naziva se **sivi vodik**. Sivi vodik nastaje parnim reformiranjem fosilnih goriva ili elektrolizom vode, ako se za elektrolizu koristi električna energija dobivena iz fosilnih goriva. On

nije klimatski neutralan te se ne smatra prihvatljivom alternativom za energetske tranzicije s obzirom na to da na jednu tonu proizvedenog vodika nastaje deset tona CO₂ (EWE, 2021).

- Vodik koji se proizvodi iz prirodnog plina parnim reformiranjem uz korištenje tehnologije izdvajanja i skladištenja CO₂ (CCS) naziva se **plavi vodik**. Kod proizvodnje plavog vodika parnim reformiranjem i dalje su moguće emisije CO₂ s obzirom na to da se očekuje da će učinkovitost izdvajanja CO₂ dosegnuti maksimalnu učinkovitost od oko 85 do 95% (Šarčević, 2020). Također, dugoročni učinci skladištenja CO₂ u podzemlju još uvijek nisu dovoljno istraženi te postoji mogućnost oslobađanja određenih količina CO₂ iz podzemlja i njihov povratak u okoliš. Plavi vodik predstavlja prijelazno rješenje prema vodiku iz obnovljivih izvora energije (EWE, 2021).
- **Ružičasti vodik** nastaje elektrolizom vode koju pokreće nuklearna energija (National Grid, 2022).
- **Tirkizni vodik** nastaje toplinskim procesom pirolize prirodnog plina. U ovom procesu se metan razgrađuje na vodik i čvrsti ugljik. Kako bi proces bio CO₂ neutralan, potrebno je da ugljik ostane trajno vezan i da ne dolazi do njegovog izgaranja kao i da su reaktori u kojima se proces odvija pogonjeni obnovljivim izvorima energije. Ovi zahtjevi često nisu ispunjeni te se pri proizvodnji vodika pirolizom pojavljuju određene emisije CO₂ (EWE, 2021).
- **Žuti vodik** nastaje elektrolizom vode koju pokreće solarna energija (National Grid, 2022).
- Vodik koji se smatra CO₂ neutralan je **zeleni vodik**. Zeleni vodik dobiva se elektrolizom vode uz korištenje električne energije dobivene iz obnovljivih izvora energije. Kako bi ovaj vodik imao sve važnije mjesto u energetske miks, potrebna je prihvatljiva cijena električne energije iz obnovljivih izvora energije te dostupni veliki kapaciteti obnovljivih izvora energije (EWE, 2021). Različite regije imaju različiti potencijal za proizvodnju zelenog vodika, kao i cijene njegove proizvodnje.

4.3. Transport vodika

Transport vodika predstavlja jedan od najvećih izazova u industriji vodika. Proizvodnja vodika često se nalazi na udaljenim područjima bogatim obnovljivim izvorima energije te ga je potrebno transportirati do industrijaliziranih i gusto naseljenih područja u

kojima postoji potražnja za vodikom. Visoki troškovi transporta vodika znatno povećavaju njegove ukupne troškove što predstavlja izazov za njegovu komercijalnu održivost. Danas postoje 3 učestalo korištene tehnologije transporta vodika – transport ukapljenog vodika, transport amonijaka i korištenje tekućih organskih nosača vodika (engl. *Liquid organic hydrogen carriers*, LOHC) (Weichenhain, 2021). Danas je vodik još uvijek lokalizirana industrija - oko 85% vodika koristi se na mjestu gdje se on i proizvede (Van de Graaf i drugi, 2020).

4.3.1. Transport vodika cjevovodima

Vodik se cjevovodima može transportirati u plinovitom obliku. Prije utiskivanja vodika u cjevovod, vodik se mehanički komprimira na vrijednost otpremnog tlaka cjevovoda koji je obično viši nego izlazni tlak elektrolizera. Tijekom transporta, moguća je potreba za ponovnom kompresijom vodika na određenim udaljenostima duž cjevovoda. Sustav transporta vodika cjevovodima sličan je kao sustav transporta prirodnog plina plinovodima zbog čega postoji mogućnost prenamjene plinovoda kako bi se njima mogao transportirati vodik. Transport vodika cjevovodima ima brojne prednosti, kao što su niski operativni troškovi i dugi vijek trajanja cjevovoda. Cjevovodi mogu služiti kao međuspremnik za pohranu vodika s obzirom na to da se njihov tlak može prilagoditi kako bi se osigurala kontinuirana opskrba energijom. Smatra se da ovakav način transporta ima vrlo mali ekološki otisak u usporedbi s drugim oblicima transportiranja energije. Najveći nedostaci ovakvog transporta vodika su visoki kapitalni troškovi te dugi vremenski period i složenost međunarodnih projekata izgradnje novih cjevovoda (Weichenhain, 2021). Danas postoji oko 4600 km cjevovoda za transport vodika u Rusiji, Sjedinjenim Američkim Državama, (SAD) i Sjeverozapadnoj Europi (IRENA, 2022). European Hydrogen Backbone predložila je vodikovu mrežu koja uključuje 29 operatora energetske mreže, a do 2040. povezivala bi 27 europskih zemalja (The European Hydrogen Backbone, 2022), a daljnji rast se očekuje nakon 2040. godine. 69% predložene mreže činili bi prenamijenjeni dijelovi postojećih mreža prirodnog plina, a 31% činili bi novoizgrađeni cjevovodi. Predviđena mreža zahtijeva procijenjeno ukupno ulaganje od 43 do 81 milijardu eura (Pekic, 2021). European Hydrogen Backbone prikazana je na slici 4-5.



Slika 4-5. Postojeći i novi članovi „European Hydrogen Backbone“ (European Hydrogen Backbone, 2022)

4.3.2. Transport vodika u obliku amonijaka

Amonijak (NH_3) dobiva se sintezom iz vodika i dušika dobivenog iz zraka u procesu koji se naziva Haber-Bosch proces. Transportira se u tekućem stanju u hlađenim spremnicima ili cjevovodima. Spremnici se prevoze kamionima, željeznicom ili brodovima (Thomas i Parks, 2006). Nakon transporta, amonijak je potrebno ponovo razdvojiti na njegove komponente kroz endotermni proces. Iz smjese dobivene endotermnim procesom izdvaja se dušik koji se potom pušta u atmosferu. Sinteza amonijaka dugo je korišten proces, ali većina dobivenog amonijaka koristi se izravno na mjestu gdje se i proizvodi, a manje količine se transportiraju. Amonijak danas ima široku upotrebu, a godišnje ga se proizvede oko 180 Mt (ACS Energy Letters, 2021). S obzirom na široku upotrebu i uhodane procese, standardi za amonijak već postoje što je velika prednost. Pored ovoga, prednosti ovakvog oblika transporta vodika je što tekući amonijak sadrži više vodika po jedinici volumena od bilo kojeg drugog načina transportiranja vodika. Glavni nedostatak je činjenica da je amonijak otrovna tekućina koja može onečistiti zrak jer stvara čestice aerosola (Weichenhain, 2021).

4.3.3. Transport ukapljenog vodika

Kako bi se vodik mogao transportirati u tekućem stanju, hladi se ispod temperature vrelišta koja iznosi 253°C . Nakon ukapljivanja vodika hlađenjem, potrebno ga je prebaciti u

izolirane spremnike kako bi se zadržala željena temperatura. Tekući vodik najčešće se prevozi posebno dizajniranim kamionima. Kamioni koji prevoze tekući vodik koriste kriogene spremnike. Kada vodik stigne na odredište, potrebno ga je upliniti. Prednosti ovakvog procesa su dobra uhodanost s obzirom na njegovu dugogodišnju primjenu te osiguravanje vodika visoke čistoće za korisnike. Kao i kod transporta vodika u obliku amonijaka, ovaj proces je također vrlo energetski intenzivan te se smatra najsloženijim oblikom transporta vodika. Pored toga, jedan od glavnih nedostataka su gubitci, osobito na dugim relacijama, koji se događaju zbog isparavanja vodika prilikom zagrijavanja (Weichenhain, 2021).

4.3.4. Transport vodika korištenjem tekućih organskih nosača vodika



















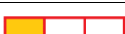


LOHC vrlo su laki kemijski spojevi koji se mogu reverzibilno hidrogenizirati i dehidrogenizirati. Hidrogenacija je proces kemijskog vezanja vodika na tekući spoj uz korištenje katalizatora hidrogenacije. Smjesa koja se dobiva nalikuje na ulje. Nakon transporta smjesa treba proći endotermni proces dehidrogenacije. Nekoliko je tvari koje se mogu koristiti kao tekući organski nosači vodika, primjerice toluen, dibenziltoluen i benzintoluen (Weichenhain, 2021). Kod korištenja LOHC-a, vodik se transportira na atmosferskom tlaku i sobnoj temperaturi što predstavlja veliku prednost s obzirom na sigurnost i isplativost primjene ove tehnologije. Postojeća infrastruktura koja se koristi za benzinska i dizelska goriva mogla bi se nadograditi te nastaviti koristiti za LOHC tehnologiju (Umicore, 2021). Najveći nedostaci ovog načina transporta vodika su veliki troškovi zbog visokih temperatura koje su potrebne u procesu, a za čije postizanje se koriste velike veličine energije te emisije CO₂ koje nastaju u ovom procesu (Weichenhain, 2021).

4.4. Troškovi u lancu opskrbe vodikom

2020. godine cijena kilograma vodika dobivenog elektrolizom iz obnovljivih izvora energije bila je prosječno oko 6 USD po kilogramu. Cijenu vodika nije moguće jednoznačno odrediti, obzirom da ona, među ostalim, ovisi o lokaciji na kojoj se vodik proizvodi i na kojoj se on koristi. Cijena varira ovisno o cijenama i dostupnosti energenata u pojedinoj regiji. Povećanjem kapaciteta za proizvodnju vodika te smanjenjem cijene energije dobivene iz obnovljivih izvora, očekuje se značajan pad cijene proizvodnje zelenog vodika. Putanja pada troškova za obnovljive izvore energije očekuje se da će se nastaviti u idućim desetljećima. Glavni pokretači smanjenja cijene vodika su industrijalizacija proizvodnje elektrolizera, poboljšanje učinkovitosti rada i održavanja elektrolizera i korištenje jeftine obnovljive

energije. Na smanjenje cijena utjecaj će imati i daljnja tehnološka poboljšanja i povećanje veličine sustava. Očekuje se povećanje kapaciteta elektrolize vodika što bi trebalo dovesti do najmanje 55 puta većeg kapaciteta u 2025. godini u usporedbi s 2015. godinom što će rezultirati padom kapitalnih troškova za elektrolizu. Ova poboljšanja trebala bi smanjiti kapitalne troškove s današnja 2 USD/kg vodika proizvedenog elektrolizom do 0,50 USD/kg proizvedenog vodika do 2030. godine. Brojna velika svjetska gospodarstva razvila su i razvijaju strategije za implementaciju vodika u svoje energetske mikseve. Sve više grana industrije prepoznaje vodik kao mogući izvor energije. Sve ovo dovesti će do veće konkurentnosti vodika kao energenta. U razdoblju od 2020. godine do 2030. godine najveće smanjenje troškova očekuje se kod primjene vodika kao goriva za teške kamione, čak 50%. Do ovog će smanjenja doći povećanjem cijelog lanca opskrbe vodikom te industrijalizacijom proizvodnje spremnika vodika i gorivnih ćelija. U primjeni vodika za pogon velikih putničkih vozila očekuje se pad troškova od 45% uzorkovan industrijalizacijom proizvodnje spremnika vodika i gorivnih ćelija. Isti pad očekuje se i kod primjene vodika u bojlerima, a on će biti uzorkovan nižom cijenom vodika dobivenog iz obnovljivih izvora te većom utilizacijom cjevovoda za vodik. Pad troškova od 35% očekuje se kod korištenja vodika za plinske turbine gdje će pad biti uzrokovan većom proizvodnjom elektrolizera za dobivanje zelenog vodika. U narednih 10 do 15 godina cijena vodika proizvedenog korištenjem obnovljivih izvora energije prosječno bi mogla iznositi 2 do 3 USD/kg vodika te 1 do 1,5 USD/kg vodika na optimalnim lokacijama (Hydrogen Council, 2020).

Tablica 4-1. Glavne karakteristike amonijaka, ukapljenog vodika i LOHC-a (Weichenhain, 2021)

Glavne karakteristike		Amonijak	Ukapljeni vodik	LOHC (benziltoluen)
Gustoća pri skladištenju	Volumna [kg H ₂ /m ³ nosača]	121,2	70,8	55,2
	Gravimetrijska [kg H ₂ /m ³ nosača]	177,5	1000	62,7
Potrebna energija	Pretvorba [MWh/t H ₂]	5,75	12	0,5
	Ponovna pretvorba [MWh/t H ₂]	11,2	0,6	15
Tehnološka i procesna zrelost	Pretvorba – mali razmjeri			
	Pretvorba – veliki razmjeri			
	Skladištenje			
	Transport brodom			
	Transport željeznicom			
	Transport kamionima			
	Ponovna pretvorba			



Provjereno i komercijalno



Prototip demonstriran

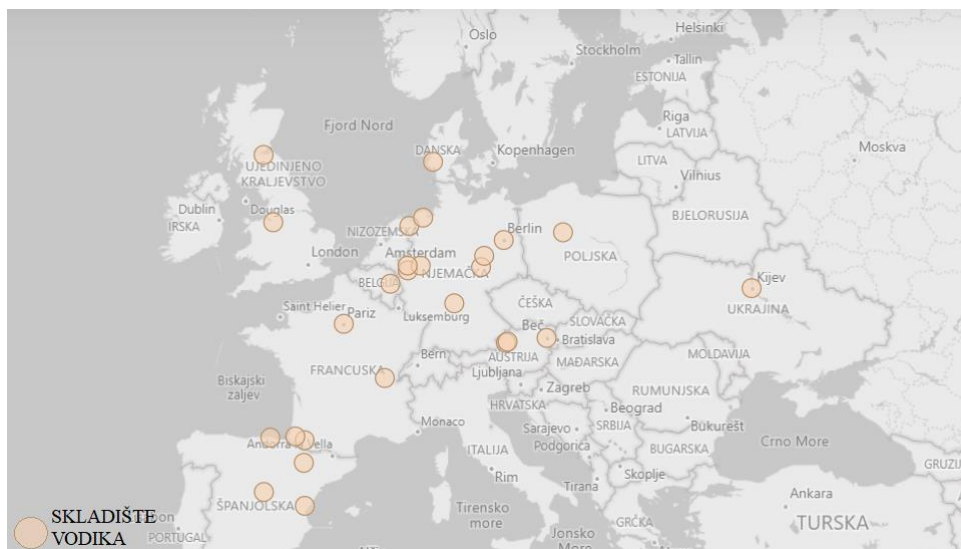


Tehnologija je potvrđena ili je u razvoju

Trošak transporta vodika ovisi o brojnim čimbenicima, kao što su način transporta, ruta i udaljenost. Očekuje se značajno smanjenje troškova transporta vodika u narednim desetljećima uzrokovano rastom količine transportiranog vodika i razvojem tehnologija. Najveća smanjenja troškova očekuju se u transportu vodika primjenom tekućih organskih nosača vodika (Weichenhain, 2021).

4.5. Skladištenje vodika

Vodik se može skladištiti u tekućem stanju, u plinovitom stanju, na površinama krutih tvari (adsorpcijom) ili unutar krutih tvari (apsorpcijom). Danas ne postoji veliki broj skladišta vodika, a lokacije skladišta vodika u solnim kavernama, akviferima i iscrpljenim plinskim ležištima u Europi prikazane su na slici 4-6.



Slika 4-6. Lokacije skladišta vodika u solnim kavernama, akviferima i iscrpljenim plinskim ležištima u Europi (ENTSOG, 2022)

Najčešći način skladištenja vodika je njegovo skladištenje u visokotlačnim cilindrima u kojima se vodik skladišti u plinovitom stanju. Problem kod ovakvog skladištenja vodika su veliki tlakovi što predstavlja osobit problem u naseljenim područjima. Vodik se može skladištiti i u tekućem stanju u kriogenim spremnicima na temperaturi -61.15°C i pri atmosferskom tlaku. Glavni problem ovakvog skladištenja vodika je to što je za proces ukapljivanja potrebna velika količina energije (Züttel, 2003). Kako bi se vodik mogao skladištiti u podzemnim formacijama, na sličan način kao i prirodni plin, potrebno je osigurati nepropusnost skladišta, nezagađenost skladištenog vodika bakterijama, organskim i anorganskim materijalom te razvoj i mogućnost proširivanja skladišta po ekonomski opravdanoj cijeni. Postoje tri mogućnosti podzemnog skladištenja vodika. Vodik se može skladištiti u podzemnom skladištu čistog vodika za koje su najprikladnije solne kaverne koje su gotovo potpuno hermetične te imaju vrlo nisku mogućnost onečišćenja skladištenog plina. Drugi način skladištenja vodika je skladištenje u podzemnom skladištu u smjesi plinova gdje se vodik može skladištiti u smjesi s metanom, ugljikovim monoksidom ili ugljikovim dioksidom. Smjesa plinova može se skladištiti u solnim kavernama, akviferima i iscrpljenim

plinskim ležištima. U skladištu dolazi do djelovanja metanogenih bakterija koje svojim djelovanjem proizvode metan Sabatierovom reakcijom metanacije (Šarčević, 2020).

4.6. Područje primjene vodika

Vodik je nositelj energije koji ima široku upotrebu. Može se koristiti u industriji – za rafiniranje, proizvodnju amonijaka, u proizvodnji čelika; u energetske sektoru – za proizvodnju i pohranu energije; u proizvodnji goriva - obnovljivog plina, sintetičkih goriva i amonijaka; za grijanje industrije i kućanstava; u transportu – cestovnom, željezničkom, avionskom i pomorskom (IRENA, 2022).

4.6.1. Vodik u cestovnom transportu

Vodik se u cestovnom transportu može koristiti u automobilima, kamionima i autobusima na gorivne ćelije, a posebno je pogodan za dekarbonizaciju sektora teških vozila, kao što su velika putnička vozila i kamioni, kao i za dekarbonizaciju transporta na velike udaljenosti. Smatra se da će u ove dvije kategorije vodik biti ekonomski isplativija opcija od električnih vozila na baterije, zbog težine i cijene baterija koja bi za njih bila potrebna. Baterije za teške kamione trebale bi biti vrlo velike, kapaciteta 600 do 960 kWh te bi one značajno smanjivale nosivost kamiona. To nije slučaj kod malih vozila i transporta na malim udaljenostima. Kod malih vozila i malih udaljenosti, vodik će biti skuplja opcija od električnih vozila na baterije s obzirom da je za takav transport potrebna mala baterija koja zahtjeva kraće vrijeme punjenja. Kod putničkih vozila, vodik bi trebao biti konkurentnija opcija u segmentima s većom upotrebom goriva, poput velikih osobnih automobila, SUV-a (engl. *Sports Utility Vehicle*) i taksi flota, kao i na udaljenostima većim od 500 km (Hydrogen Council, 2020). U budućnosti cestovnog transporta očekuje se značajna uloga električnih vozila na gorivne ćelije (engl. *Fuel Cell Vehicle*, FCEV) koja koriste vodik kao gorivo, što je vidljivo u izvješću Međunarodne energetske agencije koje predviđa da će do 25% cestovnog prometa biti pokriveno FCEV-ovima do 2050. godine (Ehrenstein i drugi, 2020). U FCEV-ovim se kemijska energija pretvara u električnu energiju u gorivnim ćelijama, a vodik se pohranjuje u spremniku. Spremnici u kojima se vodik pohranjuje veći su od spremnika u benzinskim vozilima za ekvivalentnu prijeđenu udaljenost zbog volumetrijske gustoće energije koja je manja kod vodika nego kod benzina (Offer i drugi, 2010). Vodik ima specifičnu energiju značajno veću od učestalo korištenih goriva u cestovnom transportu, 141,9 kJ/kg, dok benzin ima 46,5 kJ/kg, dizel 45,8 kJ/kg, a biodizel 39,6 kJ/kg (Suleman, 2014). FCEV-ovi bi mogli imati najznačajniju upotrebu u velikim vozilima te u transportu

na velike udaljenosti. Neke vodeće svjetske kompanije u proizvodnji cestovnih vozila, poput Honde, Hyundaija, Mercedesa i Toyote, imaju dostupne FCEV-ove u maloprodaji i iznajmljivanju, a većina velikih automobilskih tvrtki predstavila je koncepte osobnih automobila na vodik. U svijetu još nema značajnije razvijene infrastrukture za ova vozila, ali neke zemlje i kompanije imaju u planu razvoj takve infrastrukture. Japan nastoji povećati broj FCEV-ova na svojim cestama na 800 000 do 2030. godine i doseći 320 benzinskih postaja do 2025. godine. Kina planira imati milijun FCEV-ova do 2030. godine uz potporu subvencijama za kupce i poticaje za gradnju postaja za njihovo punjenje. Južna Koreja planira imati 100 000 FCEV-ova do 2025. godine i 630 000 do 2030. godine (Ehrenstein i drugi, 2020).



Slika 4-7. Prikaz funkcionalnih stanica i stanica u nastajanju za punjenje vodikom u Europi (H2, 2022)

4.6.2. Vodik u željezničkom transportu

Prototipi vlakova koji koriste vodik testirani su na nekoliko tržišta u razdoblju 10 do 15 godina (Velazquez i drugi, 2017). Vlakovi s gorivnim ćelijama koji kao gorivo koriste vodik alternativa su prvenstveno za regionalne vlakove, osobito za dulje, relativno niskofrekventne rute, s kratkim zastojećima. Poput kamiona i autobusa, vlakovi će imati namjensku infrastrukturu koja doprinosi visokoj stopi iskorištenosti. Danas trošak goriva za vlak iznosi 40% do 50% ukupnog troška posjedovanja vlaka, a taj udio mogao bi se smanjiti na oko 20% do 30% u 2030. godini (Hydogen Council, 2020).

4.6.3. Vodik u avionskom transportu

Sektor avionskog prometa jedan je od najvećih emitera CO₂ s otprilike 3% svjetskih emisija. Najviše emisija CO₂ u avionskom prometu proizlazi iz dugih letova. Danas avioni najčešće koriste kerozin kao gorivo. Jedna od niskougljičnih alternativa ovom gorivu je upotreba vodika kao goriva, ali uglavnom na kratkim letovima. Na dugim letovima, izglednija alternativa je korištenje sintetičkog kerozina proizvedenog iz vodika. Sintetički kerozin je tekuće gorivo dobiveno iz mješavine vodika i ugljičnog monoksida. Najveći nedostatak upotrebe sintetičkog kerozina je njegova cijena. Cijenu kerozina je oko 0,50 USD po litri, dok je cijena sintetičkog kerozina 2 do 2,30 USD po litri. Kako bi sintetički kerozin na bazi vodika postao konkurentan, potrebno je smanjenje njegove cijene (Hydrogen Council, 2020).

4.6.4. Vodik u pomorskom transportu

Pomorski sektor danas emitira približno 2,5% globalnih emisija ugljika, što je ekvivalent 940 Mt godišnje. S obzirom na zadane ciljeve Međunarodne pomorske organizacije vezane za smanjenje emisija, potrebno je uvesti niskougljično gorivo u sektor pomorskog transporta. Kao jedna od opcija nameće se primjena sintetičkog goriva na bazi vodika u većim brodovima te primjena vodikovih gorivnih ćelija u manjim brodovima čija je snaga motora ispod 2 MW. Brojni čimbenici utječu na konkurentnost primjene vodika u pomorskom transportu, poput postojeće infrastrukture, troškova električne energije i vodikovog goriva te udaljenosti i raspored plovidbe (Hydrogen Council, 2020). Vodik se, kao brodsko gorivo, može koristiti u tekućem ili u komprimiranom stanju. Najveća prednost vodika je što prilikom njegovog korištenja ne nastaju emisije stakleničkih plinova. Brodovi koji koriste vodik mogu biti brodovi s motorima s unutarnjim izgaranjem ili brodovi s gorivnim ćelijama. Njegova energetska učinkovitost u gorivnim ćelijama je između 50% i 60%, dok je u motorima s unutarnjim izgaranjem to 40% do 50% (IRENA, 2021). Primjena vodika u pomorskom transportu danas ima vrlo male razmjere zbog čega nema razvijene infrastrukture za vodik u ovom sektoru. Prvi brod koji je koristio vodik kao gorivo bio je Hydra 2000. godine, a nakon njega je uslijedio Zemships 2008. godine. Oba broda koristila su komprimirani vodik. Norveška razvija vodik kao brodsko gorivo te je najavila u sezoni 2021/22. početak korištenja trajekta koji koristi tekući vodik u kombinaciji s gorivnim ćelijama i baterijama što bi bila prva takva primjena tekućeg vodika u pomorskom transportu (Nerheim i drugi, 2021). Troškovi povezani s prenamjenom postojećih brodova u brodove

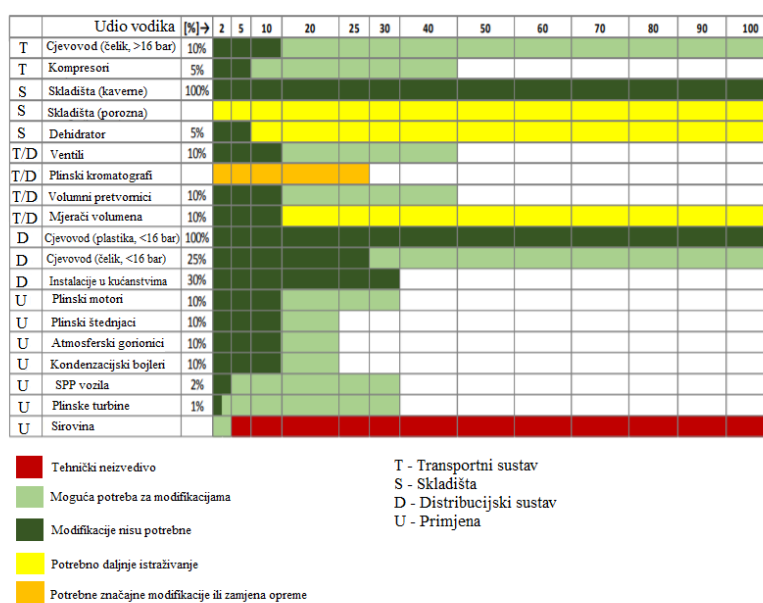
koji koriste vodik, trošak skladištenja i trošak bunkeringa jedna su od najvećih prepreka široj upotrebi vodika u brodovima. Proizvodnja vodika s niskim ugljičnim otiskom, kao i njegovo skladištenje na brodovima danas je skupa tehnologija te nema razvijene infrastrukture za punjenje brodskih spremnika vodikom. Vodik bi u budućnosti mogao imati ulogu u pomorskom transportu, ali uglavnom na kraćim rutama, primjerice na trajektima i manjim putničkim brodovima. Kako bi vodik postao konkurentno gorivo u pomorskom transportu, potrebno je smanjiti troškove cijelog lanca korištenja vodika u ovom sektoru.

4.7. Umješavanje vodika u prirodni plin

Jedan od mogućih načina transporta i primjene vodika je njegovo umješavanje u prirodni plin, odnosno njegovo integriranje u postojeće plinovode. Umješavanje vodika nastalog elektrolizom koja koristi energiju iz obnovljivih izvora energije smatra se mogućim privremenim prvim korakom prema dekarbonizaciji industrije prirodnog plina i jamči veću dostupnost obnovljivih i niskougljičnih plinova za krajnje korisnike. Dugoročno gledano, ovo predstavlja način skladištenja obnovljive energije. S obzirom na vrlo velike kapacitete plinske mreže u Europi, čak i niski udjeli miješanja vodika značili bi apsorbciju značajne količine varijabilne obnovljive energije. Umješavanje vodika u prirodni plin dio je strategije za vodik Europske komisije iz 2020. godine. Mnoge zemlje EU-a razmatraju umješavanje vodika u svoju mrežu prirodnog plina, a neke od njih definiraju ciljeve umješavanja koje treba postići do 2030. godine (Kanellopoulos i drugi, 2022). Umješavanjem vodika može se značajno dekarbonizirati sektor prirodnog plina koji trenutno čini 22% emisija stakleničkih plinova u EU. Smatra se da je emisije iz plinskog sektora moguće smanjiti za 6-7% dodavanjem 20% zelenog vodika u prirodni plin. Europska komisija je revizijom Direktive i regulative tržišta plina (engl. *Gas Market Regulation and Directive*) u prijedloge uključila mjeru za potporu integracije vodika u postojeće plinske mreže. Europska komisija predlaže postavljanje ograničenje od 5% vodika u plinskim mrežama za cijelu EU do 2030. godine. Operatori europskog transportnog sustava plina pružaju snažnu potporu ovakvoj inicijativi. Umješavanje vodika prepoznato je kao način olakšavanja uvođenja međunarodnih tokova vodika i jednostavan način za brzo povećanje tržišta vodika.

Umješavanje vodika u prirodni plin može se provoditi u različitim omjerima, a uobičajen udio vodika u prirodnom plinu je do 20% vodika. Smatra se da se vodik dodati u prirodni plin do koncentracije 5-10% bez modifikacija prijenosnog sustava i instalacija krajnjih potrošača (Kanellopoulos i drugi, 2022). Prisutnost neusklađenih pragova umješavanja

vodika u susjednim zemljama, gdje trgovina plinom ima važnu ulogu, može izazvati značajne trgovinske prepreke ili ograničenja umješavanja vodika u plinske sustave. Praktična preporuka je maksimalno smanjiti razlike u pravilima pragova umješavanja vodika u plinskim mrežama, posebno za susjedne zemlje s velikim volumenom trgovine plina (Kanellopoulos i drugi, 2022). Utjecaj vodika uvelike ovisi o vrsti materijala i mora se procijeniti od slučaja do slučaja. Vodik je pokretljiviji od metana u mnogim polimernim materijalima, uključujući plastične cijevi i elastomerne brtve koje se koriste u sustavima distribucije prirodnog plina. Plin u plinskim mrežama mora zadovoljavati određene kriterije svojim sastavom i energetskim parametrima zbog čega je potrebno u obzir uzeti utjecaj vodika na parametre kvalitete plina. Plin transportiran postojećim plinskim mrežama koristi se u brojnim trošilima čije karakteristike, odnosno toleranciju na vodik, treba uzeti u obzir pri određivanju granica umješavanja vodika. Ograničenja udjela vodika u prirodnom plinu za odabrane komponente plinske infrastrukture i primjene prikazana su na slici 4-8.



Slika 4-8. Ograničenja udjela vodika u prirodnom plinu za odabrane komponente plinske infrastrukture i primjene (Bard i drugi, 2022)

4.8. Vodik u Europskoj uniji

Gotovo sve zemlje EU spominju zeleni vodik u svojim Nacionalnim energetskim i klimatskim planovima (engl. *National Energy and Climate Plans*, NECP) za 2030. godinu koji su obavezani za države članice kako bi ocrtale svoje energetske i klimatske politike. 11 zemalja postavilo je eksplicitne ciljeve za razvoj kapaciteta za proizvodnju vodika ili razine

potrošnje vodika. Francuska je postavila najambiciozniji cilj za proizvodnju vodika 2030. godine s kapacitetom od 6,5 GW. Sedam zemalja je deklariralo eksplicitne ciljeve za potrošnju vodika koji su u tri zemlje (Bugarska, Hrvatska, Slovenija) ograničene na prometni sektor. Nacionalne strategije do 2020. godine imalo je manje od polovice članica EU, ali brojne članice su najavile svoje nacionalne politike u bliskoj budućnosti. Postojeći nacionalni planovi razlikuju se po sektorskim prioritetima. Gotovo sve zemlje zelenom vodikom daju važnu ulogu u dekarbonizaciji upotrebe goriva, pretežito vezano za upotrebu gorivnih ćelija. Najčešće se naglasak stavlja na upotrebu u sektoru teškog transporta kamionima te sektor putničkih automobila, dok je naglasak rjeđe na sektorima željezničkog, avionskog i pomorskog transporta. Većina zemalja namjerava promicati korištenje zelenog vodika u industrijskoj proizvodnji kao zamjenu za smeđi vodik u postojećim primjenama i kao zamjenu za prirodni plin kao nositelj energije. Samo je manji dio zemalja u nacionalne planove uključio korištenje vodika u sektoru zgradarstva. Sva područja primjene vodika navedena u nacionalnim planovima politika država članica EU vidljiva su u tablici 4-5. (Wolf i Zander, 2021). EU planira 300 milijuna eura za financiranje istraživanja tehnologija povezanih s vodikom, a većina će se koristiti za projekte povezane s proizvodnjom i skladištenjem vodika. Europska komisija procjenjuje da bi do 2050. godine 24% globalne potražnje za energijom moglo biti pokriveno čistim vodikom, dok se za EU procjene kreću od 9 do 14%. EU-ovo Partnerstvo za čisti vodik (engl. *EU's Clean Hydrogen Partnership*) objavilo je svoj prvi poziv za podnošenje prijedloga koji su dio strateškog istraživačkog programa koji pokriva 41 istraživačku temu u rasponu od proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora do skladištenja, distribucije i transporta, a koje će biti financirani ovim sredstvima (Hydrogen Central, 2022).

Tablica 4-2. Područja primjene vodika navedena u nacionalnim planovima politika država članica EU (Wolf i Zander, 2021)

	Grijanje	Energija	Industrija	Transport				
				Općenito	Putnički	Kamionski	Zračni	Pomorski
Austrija	x	x	x	x	x	x		
Belgija		x	x	x	x	x		
Bugarska		x		x				
Hrvatska		x		x				
Cipar								
Češka	x	x		x	x	x		
Danska		x		x				
Estonija	x	x		x				
Finska			x	x				
Francuska		x	x	x	x	x		
Njemačka	x	x	x	x	x	x	x	x
Grčka		x		x				x
Mađarska	x	x	x	x				
Irski		x	x	x				
Italija			x	x	x	x		x
Latvija				x				
Litva		x	x	x				
Luksemburg		x	x	x	x	x		
Malta	x	x		x	x	x		
Nizozemska	x	x	x	x		x		
Poljska	x	x		x	x	x	x	x
Portugal		x	x	x	x	x	x	x
Rumunjska		x	x	x				
Slovačka			x	x				
Slovenija		x		x		x		
Španjolska		x		x				
Švedska			x	x		x		

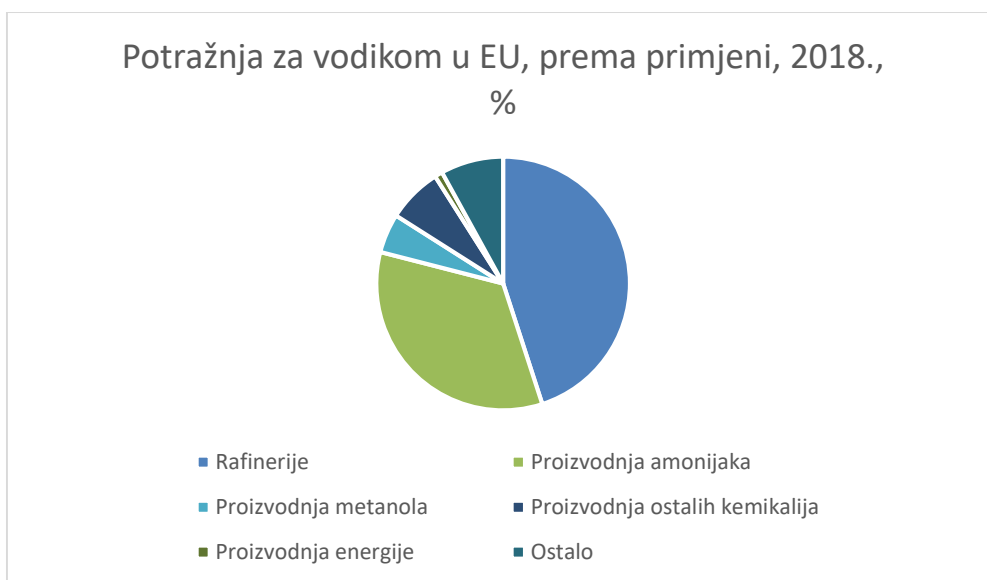
4.8.1. Proizvodnja vodika u Europskoj uniji

U EU je 2018. godine postojalo ukupno 457 lokacija za proizvodnju vodika s ukupnim kapacitetom proizvodnje 11,5 Mt godišnje. Ako se u ovu brojku ne uračunava vodik koji se proizvodi kao nusproizvod koksnog plina, kapacitet proizvodnje je 9,9 Mt godišnje. Proizvodnja vodika na licu mjesta daleko je najčešći način opskrbe vodikom s gotovo dvije trećine cjelokupne proizvodnje vodika. Najčešće korištena tehnologija u EU za proizvodnju vodika je parno reformiranje metana (engl. *Steam Methane Reforming*, SMR),

a preko 92% svih postrojenja za proizvodnju vodika koristiti fosilna goriva kao sirovinu. S gotovo 2,5 Mt vodika godišnje (21% ukupne proizvodnje), Njemačka ima daleko najveći proizvodni kapacitet u EU. Slijede ju Nizozemska s 1,5 Mt godišnje, Poljska 1,3 Mt godišnje i Italija s 0,8 Mt godišnje (Hydrogen Europe, 2020).

4.8.2. Potrošnja vodika u Europskoj uniji

Ukupna potražnja za vodikom u 2018. procijenjena je na 8,3 Mt. Najveći udio potražnje za vodikom dolazi iz rafinerija (45%), a slijedi industrija amonijaka (34%). Ova dva sektora zajedno su činila gotovo 4/5 ukupne potrošnje vodika što je vidljivo na slici 4-9. (Hydrogen Europe, 2020).



Slika 4-9. Potražnja za vodikom u EU, prema primjeni, 2018., % (Hydrogen Europe, 2020)

Potrošnja vodika vrlo je neravnomjerna, više od polovice ukupne potrošnje vodika odvija se u samo četiri zemlje, Njemačkoj (22%), Nizozemskoj (14%), Poljskoj (9%) i Belgiji (7%) (Hydrogen Europe, 2020).

4.8.3. Proizvodnja vodika korištenjem električne energije iz mreže u Europskoj uniji

Razlike u troškovima proizvodnje vodika korištenjem električne energije iz mreže u različitim zemljama proizlaze prvenstveno iz razlika između veleprodaje cijene električne energije. Troškovi proizvodnje vodika korištenjem električne energije iz mreže u EU (zajedno s Norveškom i Ujedinjenim Kraljevstvom (UK)) u 2019. godini procijenjeni su na rasponu od 2,6 €/kg do 9,5/kg, a u prosjeku su iznosili 4,7 €/kg. Troškovi proizvodnje vodika

5. GEOPOLITIČKI ODNOSI

5.1. Geopolitika i ukapljeni prirodni plin

Za razliku od brojnih drugih tržišta energenata, poput tržišta nafte koje je globalno, tržište prirodnog plina je fragmentirano i u velikoj mjeri regionalno. Tržišta prirodnog plina tradicionalno su organizirana kao tri segmentirana regionalna tržišta: sjevernoameričko tržište, azijsko-pacifičko tržište i europsko tržište (Energy Data, 2020). S obzirom na tu činjenicu, samo određivanje cijena plina ima regionalni karakter. Cijene UPP-a pod velikim su utjecajem geopolitike te ovise o tržištu na kojem se UPP-om trguje. Tržište prirodnog plina, osobito UPP-a doživjelo je velike promjene nakon što je SAD od zemlje uvoznice UPP-a postao zemlja izvoznica, zahvaljujući takozvanoj „shale revoluciji“. Ovaj pojam odnosi se na kombinaciju hidrauličkog frakturiranja i horizontalnog bušenja koja je omogućila SAD-u da značajno poveća proizvodnju nafte i prirodnog plina proizvodnjom iz škriljavaca (Robert Strauss Center, 2015). Nakon ovog događaja, došlo je do pojave velikih količina prirodnog plina na tržištu te do pada njegovih cijena. Za UPP su se otvorila nova tržišta u Kini, Indiji, jugoistočnoj Aziji, Latinskoj Americi i Zapadnoj Aziji. Japan je, nakon nesreće u nuklearnoj elektrani Fukushima koja je izazvala zaokret prema korištenju prirodnog plina u japanskoj energetskej politici, postao najveće uvozno tržište za UPP (Energy Data, 2020). Najveće uvoznice ukapljenog prirodnog plina u 2020. godini prikazane su na slici 5-2. Trgovina UPP-om bilježi konstantan rast na globalnoj razini te je u 2020. godini iznosila 488 milijardi m³ plina (Statista, 2021). Predviđa se da će se ovaj rast nastaviti i sljedećih godina. U 2020. godini najveći uvoznik UPP-a bio je Japan sa 102 milijarde m³ uvezenog UPP-a, a slijede ga Kina s 94 milijarde m³ te Južna Koreja s 55,3 milijarde m³ (Statista, 2021b). Zemlje koje izvoze najviše UPP-a danas su Australija, Katar, SAD, Malezija i Alžir (Energy data, 2020). Prirodni plin geografski je ograničen resurs što omogućava nekim zemljama da koriste svoju poziciju izvoznice kao alat vanjske politike. Jedna od zemalja čija politika uvelike počiva na zalihama, proizvodnji i izvozu plina je Ruska Federacija. Nakon ruske invazije na Ukrajinu 2022. godine došlo je do velikog zaokreta u energetskej politici zemalja članica EU kojima je cilj odmaknuti se od ruskog tržišta energenata, a samim time i prirodnog plina. Zbog ovakve energetske politike, UPP terminali diljem Europe dobivaju na svom značaju, s obzirom na nedostatak plinovoda koji povezuju Europu s drugim državama. Europska komisija je u šestom paketu sankcija Rusiji koji uključuje plan za postupno ukidanje uvoza nafte i naftnih derivata do kraja 2022. godine, ali uvoz prirodnog plina iz Rusije još nije podložan sankcijama.

To bi bio puno veći izazov za Europu koja je prošle godine dobila 45% svog uvoza prirodnog plina iz Rusije što je znatno veći udio od udjela ruske nafte u uvozu (Cooban, 2022). Katar je 2006. godine postao najveći izvoznik UPP-a zahvaljujući proizvodnji iz najvećeg plinskog polja na svijetu, North Dome (Qatar)/South Pars (Iran), koje dijeli s Iranom. EU predstavlja veliko tržište UPP-a kao zajednica koja troši velike količine plina, a čija je proizvodnja prirodnog plina u konstantnom padu. Prirodni plin pokriva 23% potrošnje primarne energije u EU. Prirodni plin bi trebao nastaviti igrati važnu ulogu u europskoj energetskej bilanci u srednjoročnom razdoblju prije nego što doživi nagli pad nakon 2040. godine. Jedan od najvećih izazova energetske politike EU je osigurati dobavu prirodnog plina. EU velike količine plina uvozi iz Rusije, Norveške i Alžira o čijem plinu ovisi. Nastoji se osigurati sigurnost dobave prirodnog plina i diverzificirati opskrba, djelomično kroz nove plinovode, ali u velikoj mjeri korištenjem terminala za uplinjavanje UPP-a.

5.2. Geopolitika i vodik, međunarodno upravljanje vodikom

Geopolitika je jedan od važnijih čimbenika u energetskej industriji. U usporedbi s fosilnim gorivima, geopolitika će imati manji utjecaj na tržište vodika s obzirom na to da njegova proizvodnja nije ograničena samo na određene regije svijeta. Kod vodika opasnost od kartelizirane trgovine manja je nego kod ostalih energenata obzirom da se vodik može proizvesti iz brojnih primarnih izvora energije i na raznim mjestima diljem svijeta. Ako se međunarodno tržište vodika nastavi razvijati, njegovi početci mogli bi biti slični početcima međunarodnog tržišta UPP-a, a ako se donese međunarodni okvir za usklađivanje certifikiranja i propisa, to bi mogla biti jedna od ključnih prednosti tržišta vodika u odnosu na tržište UPP-a. Uspjeh tržišta vodika u velikoj mjeri ovisi o postavljanju koherentnih i transparentnih pravila, standarda i normi kako bi se olakšala njegova primjena u cijelom svijetu i u svim sektorima. Različiti standardi mogli bi usporiti napredak i voditi odvajanju tržišta pojedinih država ili regija. Vodik je postao tema i na međunarodnim forumima G20, IEA, IRENA (engl. *International Renewable Energy Agency*) i drugim što pokazuje njegovu važnost na globalnoj razini. Za razvoj globalnog tržišta vodika potrebno je prevladati nekoliko prepreka. Troškovi se moraju dodatno smanjiti, infrastruktura se mora proširiti, a vodik se mora proizvoditi uz manji ugljični otisak. Kako bi se ovo ostvarilo, potrebno je poticati razvoj tržišta vodika nacionalnim strategijama i međunarodnom suradnjom u čemu veliku ulogu ima geopolitika. Kako bi se razvilo tržište vodika, ključno je ulaganje u infrastrukturu kako bi se smanjili ukupni troškova, ali ulaganje je rizično zbog nedostatka osigurane ponude i potražnje. Kod

razvoja infrastrukture, ključno je da države procijene isplativost domaće proizvodnje vodika u odnosu na njegov uvoz. Za velika gospodarstva poput EU-a ili Japana, uvoz zelenog vodika iz regija s relativno jeftinim i obilnim obnovljivim izvorima energije može pomoći u smanjenju troškova energetske tranzicije kao i u smanjenju pritiska na domaće resurse. Zemlje poput Japana i Južne Koreje očekuju veliki uvoz vodika. Nasuprot tome, strategije za vodik zemalja poput Australije, Čilea i Novog Zelanda fokusiraju se na potencijal za izvoz. Razvojem globalnog tržišta vodika postoji veliki potencijal za stvaranje novih trgovinskih odnosa i puteva. Neke države već su potpisale međusobne ugovore o suradnji povezane s industrijom vodika (Van de Graaf i drugi, 2020).

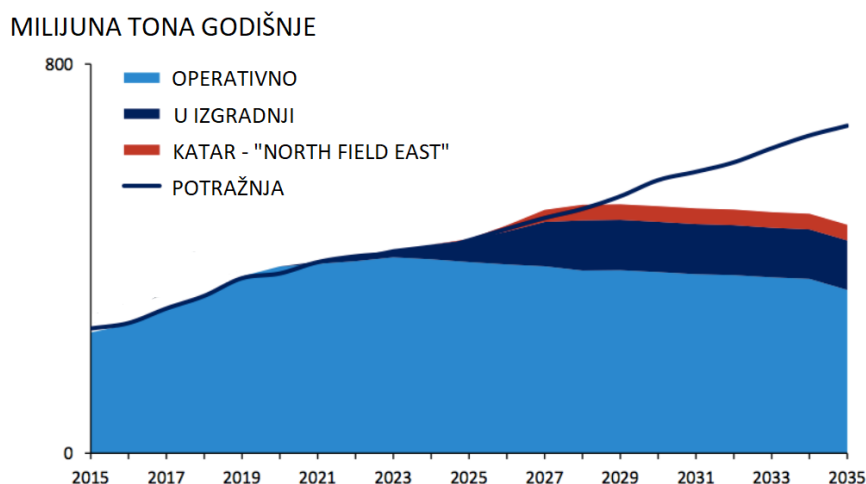
- **Japan** je prva država koja je donijela nacionalnu strategiju za vodik, 2017. godine. U strategiji se navodi cilj da Japan postane prvo „vodikovo društvo“ koje široko koristi vodik u svim sektorima. Postavljeni su ciljevi mobilnosti za 800 000 FCEV-ova i 900 stanica za gorivo na vodik do 2030. godine. U 2020. u industriju vodika uloženo je oko 670 milijuna USD (IRENA, 2022).
- **Europska unija** objavila je svoju strategiju za vodik u srpnju 2020. godine. U njoj je vodik identificiran kao ključni prioritet za postizanje ciljeva Europskog zelenog plana te se strategija fokusira na obnovljivi vodik. Jedna od ključnih stavki ove strategije je instalacija 40 GW elektrolizera za proizvodnju obnovljivog vodika u Europskoj uniji do 2030. godine (IRENA, 2022).
- S godišnjom potrošnjom od više od 24 milijuna tona, **Kina** je najveći svjetski potrošač i proizvođač vodika. Iako se većina vodika u Kini proizvodi iz ugljena, od 2019. godine do 2022. godine Kina je pokrenula više od 30 projekata vezanih uz zeleni vodik. U Kini ima oko 8400 FCEV-ova što čini njihovu treću najveću svjetsku flotu. Iako Kina još nema nacionalnu strategiju za vodik, 16 pokrajina i gradova pokrenulo je petogodišnje planove koji u sebi sadrže vodik (IRENA, 2022).
- Plan **Republike Koreje** za vodik donesen je 2019. godine i identificirao je vodik kao „motor gospodarskog rasta i otvaranja novih radnih mjesta“. Koreja nastoji postati svjetski lider u proizvodnji FCEV-ova i velikih stacionarnih gorivnih ćelija za proizvodnju energije, a već sada ima najveću svjetsku flotu FCEV-ova, njih oko 10000. Cilj je povećati taj broj na 200000 do 2025. godine. Planira se koristiti vodik za napajanje 10% gradova, okruga i mjesta do 2030. godine i 30% do 2040. godine. Koreja istražuje uvoz vodika od raznih dobavljača, uključujući Australiju i Saudijsku Arabiju (IRENA, 2022).

- **SAD** je drugi po veličini potrošač i proizvođač vodika u svijetu s 13% globalne potražnje za vodikom. Do 2020. bio je najveće svjetsko tržište FCEV-ova, na čelu s Kalifornijom. SAD ima u planu ulaganja od 9,5 milijardi USD u ubrzanje razvoja vodikove tehnologije (IRENA, 2022).

6. PROJEKCIJE ZA BUDUĆNOST

6.1. Budućnost ukapljenog prirodnog plina

Tržište UPP-a sve se više razvija, postaje dinamičnije i vrlo raznoliko. Unatoč tome što je UPP fosilno gorivo, za razliku od goriva na bazi nafte, njegovu daljnju upotrebu mnogi smatraju prihvatljivom, osobito u fazi energetske tranzicije. Do 2040. godine IEA očekuje rast tržišta UPP-a po stopi 5% godišnje, u velikoj mjeri zahvaljujući rastu azijskog tržišta. Unatoč tendenciji povećanja udjela obnovljivih izvora energije (OIE) u energetskom miksu, postojat će potreba za gorivom koje nadopunjuje OIE, a upravo prirodni plin u tome ima budućnost. UPP nudi veću fleksibilnost u smislu upravljanja opskrbom od transporta plinovodima, što će u budućnosti biti iznimno važno. Važna uloga prirodnog plina mogla bi u procesu postupnog izbacivanja drugih fosilnih goriva, osobito ugljena. UPP mnogi vide kao tranzitno gorivo – gorivo koje će doprinijeti postupnom izbacivanju fosilnih goriva. Zbog nedostatnih kapaciteta OIE, direktni prijelaz na s fosilnih goriva na OIE neće biti moguć uz trenutnu i buduću predviđenu potrošnju energije. Kako bi prirodni plin općenito, kao i UPP, bili konkurenti, njihov je životni ciklus potrebno dekarbonizirati.



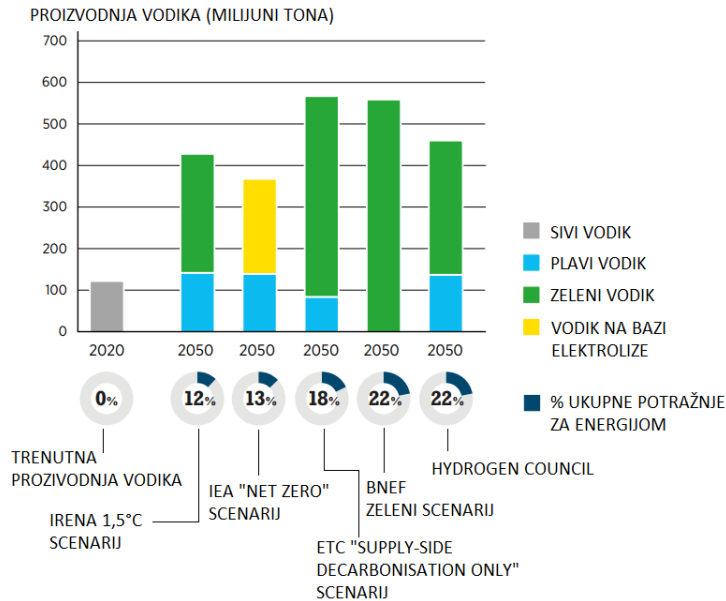
Slika 6-1. Globalna potražnja i opskrba ukapljenim prirodnim plinom, 2015.-2035. (Global LNG Hub, 2021)

U budućnosti se očekuje nastavak snažnog razvoja UPP infrastrukture u svijetu, osobito nakon invazije na Ukrajinu i sankcija koje se sve više nameću Ruskoj Federaciji iz koja je najveći uvoznik prirodnog plina u Europu, a većina plina transportira se plinovodima. Trenutna geopolitička situacija i nesigurnost opskrbe plinom ukazuju na važnost UPP

terminala u Europi. Ekspanzija „North Field LNG“ polja u Kataru najveći je svjetski UPP projekt u budućnosti. Proširenje infrastrukture od 32 milijuna tona godišnje povećat će trenutnu proizvodnju sa 77 milijuna tona godišnje na 110 milijuna tona godišnje do 2025. godine što bi trebalo pozicionirati Katar na mjesto vodećeg izvoznika UPP-a u svijetu. Postoji niz drugih važnih projekata u Rusiji koje je pokrenuo Gazprom s namjerom da do 2030. godine opskrbljuje oko 15% globalnog UPP tržišta. Ipak, uloga Rusije na tržištu UPP-a u budućnosti upitna je zbog geopolitičkih napetosti između Rusije i Europe (LNG Industry, 2021).

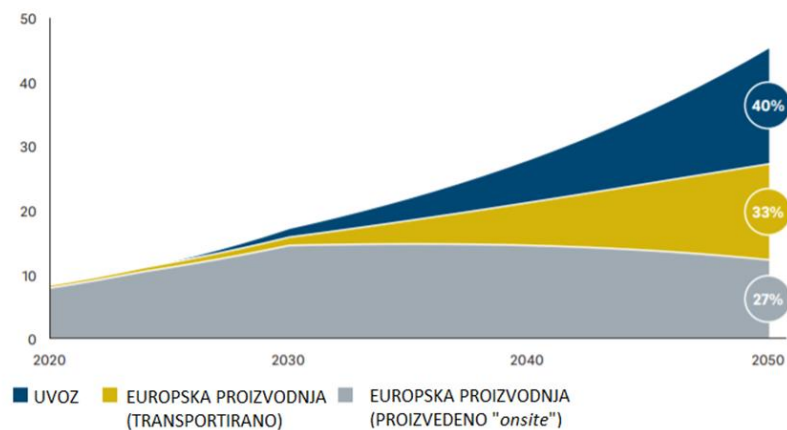
6.2. Budućnost vodika

Prema predviđanjima IRENA-e (IRENA, 2022), prekogranična trgovina vodikom će se povećati u 2030-ima u skladu s troškovnom konkurentnošću zelenog vodika koji bi u narednim godinama mogao postati konkurentan plavom vodikom. U mnogim scenarijima dekarbonizacije potražnja za vodikom značajno počinje rasti od 2035. godine. Korištenje vodika i dalje će u većoj mjeri biti lokalno. U 2050. godini za dvije trećine proizvedenog vodika predviđa se lokalna upotreba, a za jednu trećinu prekogranična trgovina. Dugoročno gledano, zemlje s velikim potencijalom obnovljivih izvora energije mogle bi postati mjesta zelene industrijalizacije, koristeći svoj potencijal za privlačenje industrije proizvodnje vodika. Kako bi proizvodnja vodika dosegla značajnije razine, bit će potrebna velika ulaganja. Do 2050. godine previđaju se ulaganja od 50 do 60 milijardi USD za elektrolizere te 21 do 25 milijardi USD za vodikove gorivne ćelije. Do 2050. godine globalna trgovina vodikom mogla bi biti iznositi 600 milijardi USD, a ciklus zelenog vodika mogao bi postati prilika za investicije od 11,7 bilijuna USD u idućih 30 godina. U 2050. godini polovica vodika kojim se trguje mogla bi se transportirati cjevovodima. Prema „Global Renewables Outlook-u“ (IRENA, 2020), vodik ima potencijal za opskrbu 29 EJ globalne potražnje za energijom 2050. godine, a dvije trećine bi činio vodik iz obnovljivih izvora energije. Ova količina zelenog vodika zahtijevala bi oko 7500 TWh obnovljive električne energije što je ekvivalentno 30% globalne proizvodnje električne energije danas. U industriji, do 2050. godine, moglo bi se koristiti nešto manje od 14 EJ energije iz zelenog vodika, uglavnom u industrijama čelika, željeza, proizvodnje kemikalija i proizvodnje amonijaka. Prometni sektor bio bi drugi najveći korisnik obnovljivog vodika s 4 EJ energije godišnje. U sektoru zgradarstva vodik može biti pomiješan s prirodnim plinom ili korišten za proizvodnju sintetičkog metana, ali ova primjena obnovljivog vodika je ograničena na oko 1 EJ.



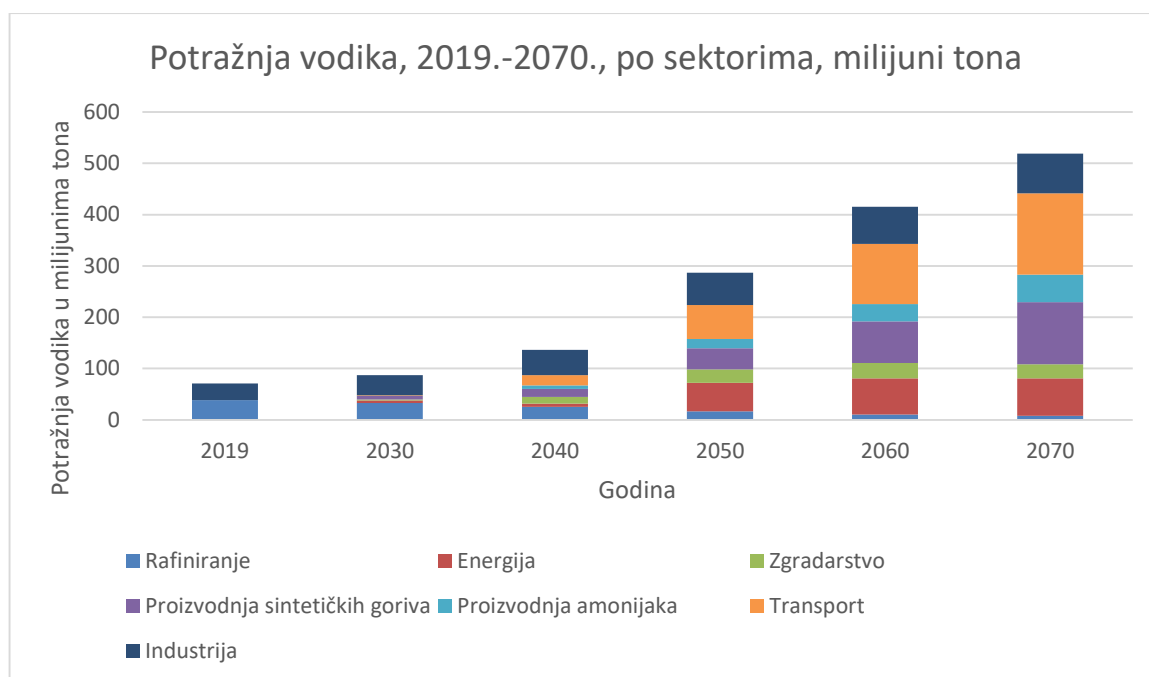
Slika 6-2. Procjene globalne potražnje vodika u 2050. godini (IRENA, 2022)

Izgledno je da će se u budućnosti razviti tri skupine zemalja. Prva skupina uključuje zemlje koje imaju potencijal za proizvodnju jeftinog zelenog vodika zbog obilja obnovljivih izvora energije, poput Australije, Čilea, Maroka i Španjolske. Kako bi ove zemlje u budućnosti postale izvoznice vodika, potrebno je da privuku ulaganja u industriju proizvodnje zelenog vodika. Druga skupina uključuje zemlje koje mogu postati samodostatne zelenim vodikom. Ove zemlje imaju dovoljan proizvodni potencijal za zadovoljavanje vlastitih potreba bez potrebe uvoza, poput SAD-a i Kine. Treća skupina uključuje zemlje koje će trebati uvoziti vodik kako bi zadovoljile domaće potrebe, poput Japana, Republike Koreje, dijelova Europe i dijelova Latinske Amerike. Ova se slika može značajno promijeniti s velikim ulaganjem u razvoj novih tržišta obnovljivih izvora energije i u vodikovu infrastrukturu (IRENA, 2022).



Slika 6-3. Vodik u Europi do 2050. godine (Weichenhain, 2021)

Do 2050. godine očekuje se značajan rast važnosti vodika u svijetu i Europi što je vidljivo na slici 6-3. U 2050. godini „onsite“ europska proizvodnja vodika očekuje se da će iznositi 27%, ostatak europske proizvodnje 33%, dok će uvoz vodika imati najveći udio, 40% (Weichenhain, 2021). Potražnja za vodikom doživjet će snažan rast po 2070. godine, osobito u sektoru transporta, proizvodnje sintetičkih goriva i energije, što je vidljivo na slici 6-4. (Statista, 2020).



Slika 6-4. Predviđanje potražnje za vodikom u svijetu u scenariju održivog razvoja, 2019. - 2070., po sektorima, milijuni tona (Statista, 2020)

6.2.1. Budući projekti infrastrukture za transport i distribuciju vodika u Europi

Kako bi se u većoj mjeri potaknuo razvoj industrije vodika, diljem Europe morat će postojati osnovna infrastruktura za transport i distribuciju vodika. Ekonomija vodika zahtijevat će sustav transporta i distribucije sličan sustavu prirodnog plina, dopunjen kamionima i brodovima. Također, važna će biti nadogradnja postojećih plinskih sustava kako bi se vodik mogao miješati s prirodnim plinom i koristiti na taj način. Važnu će ulogu imati „European Hydrogen Backbone“ kao trenutno najopsežnija inicijativa za infrastrukturu vodika. Trebala bi se sastojati od 6800 km mreže vodika do 2030. godine te 22 900 km mreže do 2040. godine od čega bi 75% činile naknadno opremljene infrastrukture prirodnog plina. Većina infrastrukturnih projekata najprije će se razvijati u industrijskim klasterima, lukama i gradovima na sjeveru Europe (Belgija, Nizozemska, Sjeverozapadna

Njemačka) do 2030. godine. Do 2035. godine vodikova mreža će prerasti iz regionalnih mreža u (trans)nacionalne razmjere uz dodatak interkonekcije između Danske i Njemačke te će se protezati do Marseillea. 2040. godine mreža će postati paneuropska te će na kraju uključiti uvoz zelenog vodika iz sjeverne Afrike, Sjevernog mora i, moguće, iz Ukrajine. Kapitalni trošak ove mreže procjenjuje se na 27 do 62 milijarde eura do 2040. godine sa 60% ukupne investicije namijenjene cjevovodima i 40% kompresijskoj opremi (Hydrogen Europe, 2020). Drugi važan projekt je „Dutch hydrogen backbone“ u Nizozemskoj. Nizozemska je jedna od zemlja s najvećim ambicijama za razvoj vodikove industrije te planira proširiti svoju postojeću vodikovu mrežu. Proširenje će početi s povezivanjem pet regionalnih industrijskih klastera, a potom će izgraditi nacionalnu vodikovu mrežu do oko 2025. godine. Budući koraci uključuju povezivanje vodikove mreže s Belgijom i Njemačkom. Sličnu strategiju ima i Njemačka koja planira izgraditi 5900 km vodikove mreže koja bi povezivala mjesta proizvodnje vodika, mjesta potrošnje vodika i skladišta vodika. Većina Njemačke mreže planira se napraviti prenamjenom postojeće mreže prirodnog plina (Hydrogen Europe, 2020).

6.2.2. Važni europski projekti od zajedničkog interesa

Važni europski projekti od zajedničkog interesa (engl. *Important Projects of Common European Interest*, IPCEI) predstavljeni su 2019. godine na Konferenciji o klimatskim akcijama vodika. 8 skupina projekata pokriva 17 država članica EU i uključuje 43 GW primjene obnovljive energije za proizvodnju zelenog vodika koja bi omogućila smanjenje CO₂ emisija od 37 Mt godišnje. Projekt „Green Flamingo’s“ predstavlja skup 15 projekata Portugala, Nizozemske, Njemačke i Danske kojima je cilj razviti iberijsko čvorište za izvoz zelenog vodika pomorskim putem. Namjeravaju iskoristiti postojeću infrastrukturu, lokalne solarne resurse i lokalnu potražnju za vodikom luci Sines. Planira se instalirati kapacitet elektrolizera od 5 GW koji bi koristili energiju sunca i vjetra. Projekt „Green Octopus“ povezuje Francusku, Belgiju, Nizozemsku, Njemačku i Dansku. Cilj projekta je instaliranje nekoliko GW elektrolizera, 20 postaja za punjenje vodikom te izgradnja 25 brodova za prijevoz vodika koji bi opskrbljivali industrijske klastere. Projekt „Green Spider“ povezuje Španjolsku, Francusku i Njemačku, a njegov je cilj proizvodnja zelenog vodika u Španjolskoj i njegov transport u industrijska središta. Planirani kapacitet elektrolizera je 1 GW uz dodatnu izgradnju skladišta vodika, 20 stanica za punjenje vodikom i 800 km infrastrukture za transport vodika. Projekt „Blue Danube“ važan je za srednju i južnu Europu, a planira instaliranje elektrolizera kapaciteta 2 GW te transport vodika u zemljama

smještenima uz Dunav. Projekt „Silver Frog“ projekt je šest tvrtki iz Belgije, Njemačke, Italije, Mađarske i Danske kojima je cilj proizvesti velike količine obnovljivog vodika instaliranjem 10 GW kapaciteta elektrolizera te transportirati vodik korištenjem postojeće plinske infrastrukture. Projekt „Blue Dolphin“ projekt je sedam tvrtki iz Italije, Španjolske, Nizozemske, Belgije i Njemačke kojima je cilj prilagoditi četiri luke i dva brodogradilišta za korištenje vodika u pomorskom transportu. Planiraju instalirati 0,6 GW kapaciteta elektrolizera i izgraditi šest tankera, 10 putničkih brodova i 30 teglenica pogonjenih vodikom. Projekt „Black Horse“ fokusira se na nultu emisiju mobilnost i uključuje 20 tvrtki iz Slovačke, Češke, Poljske i Mađarske. Cilj je instalirati kapacitet elektrolizera od 16,5 GW, izgraditi 270 stanica za punjenje vodikom te 10000 dizelskih teških vozila na europskim cestama zamijeniti FCEV-ima. Projekt „White Dragon“ ima cilj zamijeniti dosadašnju upotrebu lignita u Grčkoj instalacijom elektrolizera kapaciteta 1,5 GW korištenjem solarne energije. Proizvedena energija koristila bi se za grijanje integracijom u postojeće sustave daljinskog grijanja, a višak vodika transportirao bi se kroz postojeću međunarodnu infrastrukturu prirodnog plina (Hydrogen Europe, 2020).

6.3. Barijere uvođenju i poticanje uvođenja zelenog vodika

Kako bi se najveća vodikova prednost mogla uzeti u obzir, nužno je da najveći udio proizvedenog vodika u budućnosti bude zeleni vodik. Osim smanjenja emisija, dodatne prednosti zelenog vodika su potencijal za dodatnu fleksibilnost sustava, pohranu energije proizvedene iz OIE, doprinos energetske sigurnosti, doprinos gospodarskom rastu, otvaranje novih radnih mjesta i industrijska konkurentnost. Ipak, postoje brojne barijere uvođenju zelenog vodika, a najveća je njegov trošak. Vodik je često nedovoljno priznata tehnologija za koju nema međunarodno usklađenih zakonskih regulativa što može značajno usporiti njegov razvoj. Kako bi zeleni vodik bio konkurentno gorivo u budućnosti, potrebno je riješiti barijere uvođenju zelenog vodika te razviti integrirani politički pristup temeljen na četiri osnovna stupa – nacionalne politike vodika, određivanje prioriteta, jamstva podrijetla i politike omogućavanja koje se odnose na uključenost civilnog društva i industrije u sektor vodika.

6.3.1. Troškovi

Zeleni vodik ima visoke troškove proizvodnje te je u 2019. godini njegov trošak proizvodnje bio dva do tri puta skuplji od sivog vodika što objašnjava količinu vodika koji se još uvijek proizvodi iz fosilnih goriva. Cijena troška proizvodnje zelenog vodika ovisi o

početnom trošku elektrolizera, faktoru kapaciteta elektrolizera te trošku proizvodnje električne energije iz OIE. Troškovi proizvodnje zelenog vodika iznose 5-6 USD/kg ili više, dok kod sivog vodika iznose 1-2 USD/kg. Osim samog troška proizvodnje, tehnologije koje koriste vodik također su skupe u odnosu na neke druge alternative. Vozila na gorivne ćelije i spremnici vodika koštaju barem 1,5 do 2 puta više nego njihovi ekvivalenti koji se koriste kod fosilnih goriva. Sintetička goriva za zrakoplovstvo su danas, čak i na mjestima s najnižim troškovima, i do osam puta skuplja od fosilnih mlaznih goriva. Dodatan trošak predstavlja i trošak transporta vodika koji je funkcija transportirane količine, udaljenosti i vrste transporta (IRENA, 2020a).

6.3.2. Nedostatak namjenske infrastrukture

Iduća barijera vezana je uz nedostatak namjenske infrastrukture za vodik zbog čega je upotreba vodika često ograničena na mjesta gdje se on proizvodi. Na svijetu ima oko 3 milijuna km plinovoda, dok vodikovih cjevovoda ima manje od 5 000 km. Infrastruktura za korištenje vodika u prometu također je slabo razvijena. Danas postoji 470 stanica za punjenje vodikom na svijetu, dok stanica za punjenje benzinom i dizelom ima više od 200 000 samo u SAD-u i EU. Jedno od mogućih rješenja za ovu barijeru je korištenje postojeće mreže prirodnog plina umješavanjem određenog udjela vodika u prirodni plin (IRENA, 2020a).

6.3.3. Gubitci energije

Zeleni vodik ima značajne gubitke energije u svom lancu. 30-35% energije zelenog vodika otpada na gubitke. Mogu se pojaviti i dodatni gubitci energije pretvorbom vodika (primjerice u amonijak) što može rezultirati s 13-25% gubitka energije. Transport vodika zahtijeva dodatnu energiju koja je tipično ekvivalentna 10-12% energije samog vodika. Korištenje vodika u gorivnim ćelijama može dovesti do dodatnih gubitaka od 40-50% energije vodika. Ukupni gubitak ovisi o načinu proizvodnje, transporta i krajnje upotrebe. Veliki gubitci energije zahtijevaju dodatne kapacitete elektrolizera što generira dodatne troškove (IRENA, 2020a).

6.3.4. Osiguravanje održivosti

Kako bi se osiguralo da je vodik koji se proizvodi na određenoj lokaciji u potpunosti zelen, potrebno je osigurati stalan izvor OIE što bi moglo zahtijevati više od jednog izvora energije za elektrolizu. Na većini lokacija korištenje električne energije iz nacionalne mreže

ne može osigurati da vodik bude zelen zbog određenog udjela fosilnih goriva u proizvodnji električne energije (IRENA, 2020a).

6.3.5. Nacionalne strategije

Vodikove strategije predstavljaju novi val u energetske politikama i strategijama i imaju važnu ulogu u poticanju razvoja vodikovih tehnologija kao i u razvoju baze znanja koja će biti od koristi u daljnjem istraživanju i razvoju novih tehnologija. U strategijama je važno identificirati kratkoročne i dugoročne radnje za implementaciju vodika te definirati područja istraživanja i primjene vodika s najvišim prioritetom. Osnovni koraci u donošenju strategija su programi istraživanja i razvoja (engl. *R&D programmes*), vizijski dokumenti (engl. *vision document*) i planovi (engl. *roadmap*). Javnu potporu za programe istraživanja i razvoja na vodik je potaknula naftna kriza 1970-ih, uz vodstvo SAD-a i Europe. U to vrijeme osnovane su prve međunarodne platforme za suradnju na ovom području. Ovakvi programi i danas su vrlo aktualni što dovodi do donošenja sve većeg broja nacionalnih strategija za vodik (IRENA, 2020a).

6.3.6. Određivanje prioriteta

S obzirom na specifične uvjete u državama, vrlo je važno ispravno definiranje prioriteta vezanih za vodik u energetske politikama. U obzir je potrebno uzeti količinu OIE, zrelost energetskega sektora, trenutnu razinu ekonomske konkurentnosti i potencijalne socio-ekonomske učinke. Potrebno je odrediti koje primjene su prioritet i koliko je brzo moguće prijeći s fosilnih goriva na zeleni vodik. Prioritete je potrebno odrediti kako bi se napori i izvori financiranja usmjerili na njih. Kod kreiranja politika, mora se pažljivo odvagati i ekonomski jaz u usporedbi s postojećim opcijama fosilnih goriva i hitnost potrebe za smanjenjem emisija (IRENA, 2020a).

6.3.7. Jamstvo podrijetla

Potrebno je uvesti sustav certifikiranja koji omogućuje poznavanje podrijetla i kvalitete vodika, obzirom da su molekule vodika identične bez obzira na način na koji su proizvedene. Sheme koje se koriste za praćenje porijekla obično se nazivaju jamstva podrijetla. Takve sheme treba koristiti za praćenje emisije CO₂ iz proizvodnje vodika kako bi se znao njegov ugljični otisak čime bi se lako odredilo kada je vodik učinkovitiji za dekarbonizaciju nego izravna elektrifikacija ili korištenje bioenergije. Sheme bi se trebale temeljiti na emisijama stakleničkih plinova životnog ciklusa vodika. Jedan od pilot projekata

i primjer jamstva podrijetla je CertifHy projekt koji je pokrивao 0,05% tržišta vodika u EU i u kojem je manje od 4% certifikata bilo izdano za zeleni vodik. Programi certificiranja koristit će se za dobivanje poticaja. U budućnosti će biti važno uskladiti programe certificiranja vodika kako bi se osigurala kompatibilnost sa shemama certificiranja emisija stakleničkih plinova za druge proizvode, kao što su električna energija ili fosilna goriva te kako bi podržali međunarodnu trgovinu zelenim vodikom (IRENA, 2020a).

7. EMISIJE STAKLENIČKIH PLINOVA

Energetski se sustav danas u velikoj mjeri temelji na fosilnim gorivima. Prekomjerna upotreba fosilnih goriva ima negativan utjecaj na porast koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi, a samim time i na porast prosječne globalne temperature. Postoji snažna potreba za pronalaskom i implementacijom alternativnih goriva čije su emisije stakleničkih plinova manje, a koja mogu zadovoljiti trenutne i buduće energetske potrebe. Za potpuno razumijevanje emisija, odnosno točno bilježenje emisija, potrebno je promatrati životni ciklus, odnosno provesti LCA. Pojam životni ciklus odnosi se na aktivnosti tijekom životnog vijeka proizvoda, od njegove proizvodnje do konačnog zbrinjavanja (Bhandari i drugi, 2012). Potencijal globalnog zatopljenja (engl. *Global Warming Potential*, GWP) je pojam koji se odnosi na ukupan doprinos globalnom zatopljenju koji proizlazi iz emisije jedne jedinice određenog plina u odnosu na jednu jedinicu referentnog plina, ugljičnog dioksida, kojoj je dodijeljena vrijednost 1 (Greenfacts, 2022). Emisije se najčešće izražavaju u CO₂ ekvivalentu koji bilježi kombinirani učinak svih antropogenih emisija stakleničkih plinova, poput CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC i SF₆ (Blanton i Mosis, 2021).

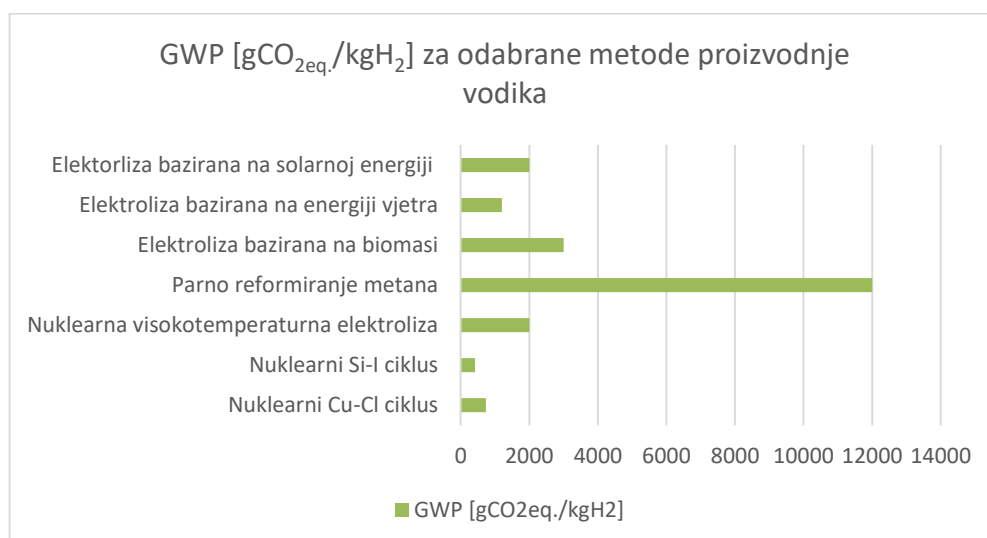
7.1. Emisije stakleničkih plinova kod ukapljenog prirodnog plina

Jedan od najvećih nedostataka fosilnih goriva koja se učestalo koriste su velike emisije stakleničkih plinova. Emisije CO₂ postaju sve važniji faktor, posebno u ekološkom aspektu. Prirodni plin je fosilno gorivo s najnižim emisijama stakleničkih plinova, ali postavlja se pitanje može li se korištenjem prirodnog plina smanjiti emisije na razinu koja je potrebna kako bi se ostvarili zadani klimatski ciljevi. Emisije CO₂ koje nastaju korištenjem UPP-a manje su za 30% nego kod korištenja nafte i za 45% nego kod korištenja ugljena (Petroplan). Izvore emisija stakleničkih plinova koji su povezane s UPP-om možemo podijeliti po segmentima operativnog lanca UPP-a. Prvi segment odnosi se na ukapljivanje prirodnog plina. Drugi segment odnosi se na emisije iz skladištenja UPP-a do kojih dolazi zbog spaljivanja i odzračivanja otparka plina (engl. *Boil-off gas*, BOG) iz spremnika te fugitivne emisije iz kompresora. Treći segment odnosi se na emisije prilikom utovara i istovara UPP-a kada emisije dolaze od pumpi koje se koriste u procesu, odzračivanja na brodu, odzračivanje pri povezivanju s drugim transportnim sredstvima te fugitivne emisije iz prirubnica cjevovoda i ventila. Četvrti segment odnosi se na emisije koje nastaju prilikom transporta prilikom kojeg nastaju emisije zbog ispuštanja viška BOG, emisije izgaranja iz proizvodnje električne energije, odzračivanje iz kompresora, fugitivne emisije iz

kompresora i emisije iz sagorijevanja goriva koje se koristi za pogon vozila kojim se UPP transportira. Peti segment odnosi se na emisije iz procesa uplinjavanja. Prilikom proces uplinjavanja emisije nastaju iz goriva koje se koristi za proces. Također, dolazi i do fugitivnih emisije iz prirubnica, ventila i spojnica cjevovoda koji se koristi unutar terminala, emisije kod odzračivanja i kod spaljivanja BOG (API, 2015). Najviše emisija nastaje u „downstream“ djelatnostima koje obuhvaćaju sve procese nakon proizvodne faze. Emisije koje nastaju izgaranjem UPP-a najjednostavnije su za određivanje s obzirom na to da se izračunavaju na temelju sadržaja ugljika u gorivu kao faktora udjela topline. WTT (engl. *Well-to-Tank*) emisije u lancu UPP-a teže je odrediti te one ovise o tehnologiji koja se koristi, a koja može jako varirati. Studije Odjel za poslovanje, energetiku i industrijsku strategiju Ujedinjenog Kraljevstva, koje se temelje na studiji koja slijedi protokol ISO 15050, pokazuju da WTT emisije za UPP iznose u prosjeku 0,88 tona CO_{2eq.} po toni UPP-a u Ujedinjenom Kraljevstvu. Standardne pretpostavke emisija za „downstream“ izgaranje UPP-a iznose 2,76 tona CO_{2eq.} po toni UPP-a. Prema tome, ukupne emisije UPP-a iznose 3,64 tona CO_{2eq.} po toni UPP-a (Blanton i Mosis, 2021).

7.2. Emisije stakleničkih plinova kod vodika

Iako se vodik smatra čistim gorivom u fazi korištenja, važno je promatrati njegov životni ciklus, odnosno provesti LCA. Emisije povezane s vodikom nastaju u fazi njegove proizvodnje. Emisije stakleničkih plinova kod proizvodnje vodika razlikuju se ovisno o metodi kojom se vodik proizvodi.



Slika 7-1. Vrijednosti GWP-a za odabrane metode proizvodnje vodika (Bhandari i drugi, 2012)

- U radu (Koroneos i drugi, 2008) uspoređene su emisije iz dva procesa proizvodnje vodika iz biomase, rasplinjavanja biomase reformacijom sintetičkog plina i rasplinjavanje biomase nakon čega slijedi proizvodnja električne energije i elektroliza. Uspoređivane su emisije CO₂, SO₂ i PO₄ te su sve emisije veće u procesu rasplinjavanja biomase reformacijom sintetičkog plina.
- Parno reformiranje metana, parno reformiranje nafte i parno reformiranje bioulja (ulje repice, sojino ulje i palmino ulje) proučavani su u radu (Marquevich i drugi, 2002.). GWP vodika proizvedenog iz ulja repice iznosi 6,42 kgCO_{2eq}/kgH₂, palminog ulja 4,32 kgCO_{2eq}/kgH₂, a iz sojinog ulja iznosi 3,30 kgCO_{2eq}/kgH₂. Emisije vodika kod parnog reformiranja metana iznosi 9,71 kgCO_{2eq}/kgH₂, a kod nafte 9,46 kgCO_{2eq}/kgH₂.
- Proizvodnja vodika iz SMR procesom iz UPP-a i iz podzemno iskopanog ugljena u SAD-u, s i bez CCS-a odnosno s i bez smanjenja metana iz rudnika ugljena (CMM), uspoređivane su u radu (NETL, 2006.). U slučaju proizvodnje iz UPP-a bez CCS-a, emisije iznose 12,4 kgCO_{2eq}/kgH₂, a u slučaju proizvodnje iz ugljena, bez smanjenja CMM-a iznose 8,9 kgCO_{2eq}/kgH₂ za ugljen. Uz primjenu CCS-a i CMM-a, emisije se smanjuju na 1,9 kgCO_{2eq}/kgH₂ odnosno 4,7 kgCO_{2eq}/kgH₂.
- Proizvodnja vodika reformiranjem metana proučavana je i u radu (Spath i drugi, 2001). Utvrđeno je kako težinski 99% nastalih emisija čini CO₂ te on čini 89,3% GWP-a. Ukupni GWP sustava je 11.888 gCO_{2eq}/kgH₂.
- Proizvodnja vodika elektrolizom koristeći energiju vjetra proučavana je i u radu (Spath i drugi, 2004). Ukupni GWP sustava je 970 gCO_{2eq}/kgH₂, a udio CO₂ u GWP-u je 97,9%.

Emisije koje nastaju različitim metodama kojima se vodik proizvodi ovise o samom načinu na koji se vodik proizvodi, sirovini odnosno načinu na koji je dobivena električna energija se koristi i samom dizajnu sustava koji se koristi te se uvelike razlikuju od metode do metode. Kod korištenja fosilnih goriva GWP je najveći, a on se u tom slučaju može umanjiti CCS (engl. *Carbon Capture and Storage*) metodama i metodama smanjenja CMM-a (engl. *Coal Mine Methane*). S obzirom na to da samo korištenje vodika ne generira emisije stakleničkih plinova, vrlo je važno promatrati cijeli ciklus vodika kako bi se utvrdile točne emisije.

8. USPOREDBA UKAPLJENOG PRIRODNOG PLINA I VODIKA

Prirodni plin dugo je smatran vrlo perspektivnim tranzitnim gorivom koje će značajno doprinjeti smanjenju emisija stakleničkih plinova i postupnom prelasku na OIE. S obzirom na sve ambicioznije ciljeve smanjenja emisija, koji uključuju i „*net-zero*“ cilj, ali i s obzirom na geopolitičku situaciju na istoku Europe, alternativne prirodnom plinu ubrzano se traže. Osim emisija stakleničkih plinova, velikim problemom smatra se ovisnost brojnih zemalja o uvozu prirodnog plina iz Rusije. Korištenje električne energije direktno iz OIE neće biti dovoljno za postizanje „*net-zero*“ cilja te će biti potrebno gorivo koje može preuzeti ulogu prirodnog plina. Jedna od alternativa prirodnom plinu, koja se sve više nameće, je vodik, osobito u sektoru prometa. Zeleni vodik privlači sve veću pozornost jer se smatra najčišćim oblikom proizvodnje vodika. Plavi vodik mnogi vide kao neprihvatljivo rješenje zbog visoke cijene i neučinkovitosti CCS-a. Kako bi zeleni vodik mogao preuzeti ulogu prirodnog plina, cijena njegove proizvodnje mora se značajno smanjiti.

U 2020. godini trgovina UPP-om iznosila je oko 488 milijardi m³ (Statista, 2021), dok godišnja prodaja vodika predstavlja tržišnu vrijednost od približno 174 milijarde USD, što premašuje vrijednost godišnje trgovine UPP-om (IRENA, 2022). Godišnje proizvodnja vodika globalno iznosi oko 120 milijuna tona (IRENA, 2020), a od toga se približno 85% ne transportira već se koristi na mjestu proizvodnje (Van de Graaf i drugi, 2020). Infrastruktura i tehnologije za transport prirodnog plina, pa tako i UPP, danas su daleko razvijenije nego za vodik. Na svijetu ima oko 3 milijuna km plinovoda, dok vodikovih cjevovoda ima manje od 5000 km (European Parliament, 2021). Infrastruktura za korištenje UPP-a u prometu također je razvijenija od infrastrukture za vodik, a sukladno tome, veći je broj UPP vozila i plovila od onih pogonjenih vodikom. Postoji 141 lokacija za UPP bunkering te se očekuje da će ove godine biti ukupno 170 UPP bunkering lokacija (Sea LNG).

8.1. Usporedba ukapljenog prirodnog plina i vodika u pomorskog transportu

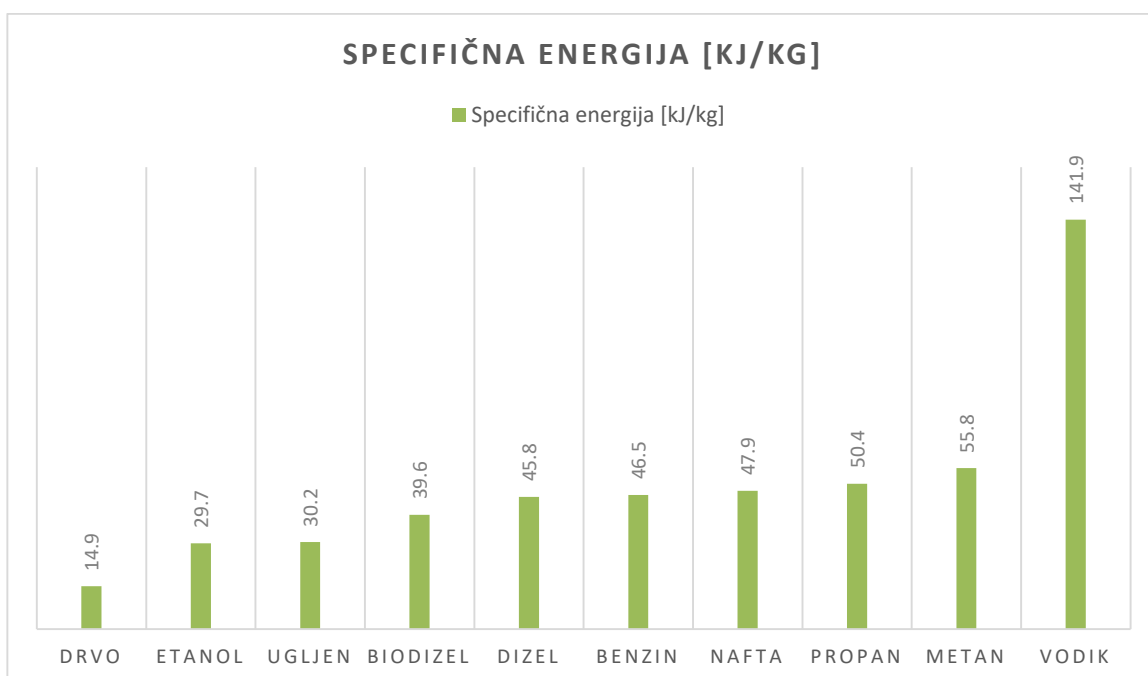
Primjena UPP-a u pomorskom transportu ima veće razmjere nego primjena vodika te je infrastruktura za UPP razvijenija. Danas je u upotrebi 198 UPP brodova te još 277 naručenih. Infrastruktura i brodovi na vodik danas su razvijeni u vrlo maloj mjeri, a budućnosti će očekuje korištenje vodika na kraćim rutama, primjerice za trajekte i putničke brodove, dok se UPP može koristiti i na dužim rutama, kao i za prijevoz tereta. UPP, kao i tekući vodik, nisu toksični te su lakši od zraka.

- S obzirom na ograničen prostor na brodovima, volumetrijska energetska gustoća goriva koje se koristi važan je čimbenik pri odabiru brodskog goriva. Vodik ima 2,5 puta manju volumetrijsku gustoću energije od UPP-a, pa ovo predstavlja velik nedostatak kod korištenja vodika kao brodskog goriva, osobito u transportu na velike udaljenosti.
- Još jedan nedostatak vodika, u usporedbi s UPP-om je veličina molekule. Molekula vodika mnogo je manja zbog čega postoji veća mogućnost od njegovog prolaska kroz ventile i brtvene spojeve. Do curenja vodika može doći i zbog njegove reaktivnosti koja može uzrokovati djelomičnu razgradnju materijala, ali i zbog temperaturnih fluktuacija, kontrakcije i širenja materijala koji dovode do zamora materijala, a do kojima je oprema izložena. Temperatura razlika kojoj je oprema izložena kod korištenja tekućeg vodika iznosi 270°C, dok kod korištenja UPP-a ona iznosi 180°C. Iz ovoga proizlazi zaključak da će u sustavima u kojima se koristi vodik curenje biti vjerojatnije nego u sustavima u kojima se koristi UPP.
- Kada se priča o zapaljivosti goriva, metan kao supstanca pokazuje prednost u odnosu na vodik. Metan ima raspon zapaljivosti u mješavini sa zrakom od 5 % do 15 % volumnog udjela metana u smjesi, dok je za vodik taj raspon od 4 % do 74 %. Vodik ima i nižu energiju paljenja od 0,02 mJ u usporedbi s 0,28 mJ za metan. Laboratorijski pokusi pokazuju da je brzina širenja plamena vodika veća nego za brzina širenja plamena metana te da bi eksplozija vodika bila intenzivnija s obzirom na tlak eksplozije i na fluktuaciju tlaka od eksplozije metana.
- Iako se i UPP i vodik skladište u kriogenim brodskim spremnicima, postoje velike razlike u njihovom skladištenju. Obzirom na manju volumetrijsku energetska gustoću tekućeg vodika, potrebni spremnici za dobivanje iste količine energije iz goriva značajno su veći kod korištenja vodika. Spremnici tekućeg vodika hlade se ispod -253°C, za razliku od spremnika UPP-a kojima je potrebna znatno viša temperatura, ispod -162°C. U oba slučaja spremnici su hlađeni te će u njima doći do povećanja temperature, a potom i tlaka, s vremenom. Ispuštanje vodika u atmosferu ako se tlak spremnika približi kritičnom tlaku, kao i ispuštanje UPP-a, ne smatraju se prihvatljivom opcijom zbog njihovog utjecaja na atmosferu. Ipak, ako do ispuštanja dođe, vodik je neizravan staklenički plin s manjim utjecajem na atmosferu, odnosno manjim GWP-om, od prirodnog plina. Prilikom ispuštanja vodika na ovaj

način postoji veći rizik od zapaljenja i požara nego prilikom ispuštanja UPP-A (Nerheim i drugi, 2021).

8.2. Usporedba ukapljenog prirodnog plina i vodika u cestovnom transportu

I vodik i UPP svoju primjenu u budućnosti ponajviše bi mogli imati u cestovnom transportu teških vozila i u transportu na velike udaljenosti. Očekivani domet u budućnosti za vozila koja koriste UPP je od 950 do 1200 km između punjenja gorivom dok danas ovakva vozila uglavnom imaju domet do 450 km (Drljača, 2018). Iako za UPP postoji razvijenija infrastruktura za punjenje vozila, prednost punjenja FCEV-ova vodikom je činjenica da FCEV-ovi koriste sličnu infrastrukturu za punjenje kao konvencionalni dizelskih kamioni što znači da bi se postojeće punionice mogle koristiti, uz manje preinake. Vrijeme punjenja kamiona vodikom prosječno je manje od 15 minuta (Molloy, 2019). Jedna od prednosti vodika, kao i kod primjene u pomorskom transportu, očituje se u njegovoj specifičnoj energiji koja iznosi 141,9 kJ/kg, dok ona za metan iznosi 55,8 kJ/kg (Suleman, 2014). . Oba goriva su kriogene supstance i skladište se na vrlo niskim temperaturama i pri niskom tlaku. Također, oba goriva mogu izgarati u motoru s izravnim izgaranjem ili korištenjem gorive ćelije. Prosječna energetska učinkovitost za gorive ćelije je 50% i kada se u njima koristi UPP-a i kada se koristi vodik.



Slika 8-1. Specifična energija odabranih goriva, kJ/kg (Suleman, 2014)

9. ZAKLJUČAK

Usljed globalne energetske krize, sve ambicioznijih ciljeva smanjenja ugljičnog otiska i rekordnih cijena energenata, posebice prirodnog plina, važnost vodika postaje sve veća. Vodik i ukapljeni prirodni plin imaju veliki potencijal u sektoru transporta, osobito u sektoru teškog transporta i transporta na velike udaljenosti. Danas UPP ima veću ulogu u ovom sektoru, veću upotrebu te razvijenije tehnologije, ali vodik pokazuje veliki potencijal u budućnosti. Brojne države ubrzano razvijaju vodikove tehnologije te vodik vide kao rješenje za prijenos i skladištenje energije dobivene iz obnovljivih izvora energije. Osim smanjenja troškova i komercijalizacije vodikove tehnologije, važnu ulogu imat će ograničenost dostupnosti prirodnog plina te njegove cijene u budućnosti. Izgledno je da će se proizvodnja i potrošnja vodika s godinama povećavati, a važnu ulogu imat će troškovna konkurentnost vodika. Razvoj UPP infrastrukture nastavio se te je doživio ubrzani rast nakon zaoštavanja odnosa europskih zemalja i Rusije. Daljnji rast važnosti UPP-a previđa se do, najmanje, 2040. godine. U budućnosti će i UPP i vodik imati važnu ulogu u zadovoljavanju potreba za energijom, posebice u dekarboniziranju transporta. Iako zeleni vodik predstavlja najučinkovitije rješenje za dekarbonizaciju, postoje brojne prepreke njegovom bržem uvođenju na tržište koje je potrebno savladati kako bi vodik postao u potpunosti konkurentan UPP-u.

LITERATURA

1. BANASZKIEWICZ, T., CHOROWSKI, M., GIZICKI, W., JEDRUSYNA, A., KIELAR, J., MALECHA, Z., PIOTROWSKA, A., POLINSKI, J., ROGALA, Z., SIERPOWSKI, K., SKRZYPACZ, J., STANCLIK, M., TOMCZUK, K., DOWZENKO, P., 2020, Liquefied Natural Gas in Mobile Applications— Opportunities and Challenges, *Energies*, str. 9,11
2. BARD, J., GERHARDT, N., SELAM, P., BEIL, M., WIEMER, M., BUDDENSIEK, M., 2022, The Limitations of Hydrogen Blending in the European Gas Grid, *Fraunhofer*, Berlin, str. 7
3. BUDANKO, A., 2018, Punjenje brodskih spremnika goriva ukapljenim prirodnim plinom - UPP bunkering, diplomski rad, RGN Repozitorij, Zagreb, str. 1-4
4. DRLJAČA, B., 2018, Primjena ukapljenog prirodnog plina u cestovnom prometu, diplomski rad, RGN Repozitorij, Zagreb, str. 14,15
5. KANELLOPOULOS, K., BUSCH, S., DE FELICE, M., GIACCARIA, S., COSTESCU, A., 2022, Blending hydrogen from electrolysis into the European gas grid, *JRC Publications Repository*, str. 3,5
6. MARQUEVICH, M., SONNEMANN, G., CASTELLS, F., MONTANE, D., 2002, Life cycle inventory analysis of hydrogen production by the steam-reforming process: comparison between vegetable oils and fossil fuels as feedstock, *Green Chemistry*, str. 1
7. NERHEIM, A., ÆSØY, V., HOLMESET, F., 2021, Hydrogen as a Maritime Fuel— Can Experiences with LNG Be Transferred to Hydrogen Systems?, *Journal of Marine Science and Engineering*, str. 1-3
8. SPATH, P., MANN, M., 2001, Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming, *National Renewable Energy Laboratory Milestone Report*, Golden, str. 6
9. SPATH, P., MANN, M., 2004, Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen Production via Wind/Electrolysis, *National Renewable Energy Laboratory Milestone Report*, Golden, str. 7
10. SULEMAN, F., 2014, Comparative Study of Various Hydrogen Production Methods for Vehicles, diplomski rad, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, str. 22

11. ŠARČEVIĆ, F., 2020, Mogućnosti iskorištavanja vodika kao goriva, diplomski rad, RGN Repozitorij, Zagreb, str. 3,16,52
12. THOMAS, G., PARKS, G., 2006, Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy, str. 17-23
13. 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, str. 3-5
14. WEICHENHAIN, U., 2021, Hydrogen transportation The key to unlocking the clean hydrogen economy, Roland Berger GMBH, Munich, str. 8-12

Web izvori:

1. ACS ENERGY LETTERS, 2021, Limitations of Ammonia as a Hydrogen Energy Carrier for the Transportation Sector, URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsenergylett.1c02189> (16.12.2021.)
2. API, 2015, Liquefied Natural Gas (LNG) Operations Consistent Methodology for Estimating Greenhouse Gas Emissions, URL: <https://www.api.org/oil-and-natural-gas/wells-to-consumer/exploration-and-production/natural-gas/methodology-for-estimating-ghgs-from-lng> (2.12.2021.)
3. BHANDARI, R., TRUDEWIND, C., ZAPP, P., 2012, Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Methods – A Review, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261300509X> (28.01.2022.)
4. BLANTON, E., MOSIS, S., 2021, The Carbon-Neutral LNG Market: Creating a Framework for Real Emissions Reductions, URL: [https://www.energypolicy.columbia.edu/research/commentary/carbon-neutral-lng-market-creating-framework-real-emissions-reductions#:~:text=%5B27%5D%20Under%20the%20assumption%20of,million%20metric%20tons\)%20of%20CO2e](https://www.energypolicy.columbia.edu/research/commentary/carbon-neutral-lng-market-creating-framework-real-emissions-reductions#:~:text=%5B27%5D%20Under%20the%20assumption%20of,million%20metric%20tons)%20of%20CO2e) (02.02.2022.)
5. BP, 2021, Statistical Review of World Energy 2021 70th edition, URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (2.12.2021.)

6. BRAND, C., 2021, 7 reasons why global transport is so hard to decarbonize, URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/11/global-transport-carbon-emissions-decarbonise/> (12.02.2022.)
7. COOBAN, A., Europe is planning to ditch Russia's oil. Will it go after its gas?, 2022, URL: <https://edition.cnn.com/2022/05/05/energy/europe-russia-gas-sanctions/index.html> (16.05.2022.)
8. EHRENSTEIN, M., GALAN-MARTIN, A., TULUS, V., GUILLEN-GOSALBEZ, G., 2020, Optimising fuel supply chains within planetary boundaries: A case study of hydrogen for road transport in the UK, URL: https://www.researchgate.net/publication/343034540_Optimising_fuel_supply_chains_within_planetary_boundaries_A_case_study_of_hydrogen_for_road_transport_in_the_UK (21.01.2022.)
9. EIA, 2019, EIA projects nearly 50% increase in world energy usage by 2050, led by growth in Asia. URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433> (2.12.2021.)
10. EIA, 2022, Natural gas explained Liquefied natural gas URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/liquefied-natural-gas.php> (10.12.2021.)
11. EIKSEN, M., 2020, How do LNG Ships Work?, <https://www.econnectenergy.com/articles/how-do-lng-ships-work> (10.12.2021.)
12. ENERGY DATA, 2020, The rise of LNG, URL: <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/lng-rise.html> (26.01.2022.)
13. ENERGY EDUCATION, 2015, Transportation of liquefied natural gas, URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Transportation_of_liquefied_natural_gas (10.12.2021.)
14. ENTSOG, 2022, Hydrogen project visualisation platform, URL: <https://h2-project-visualisation-platform.entsog.eu/> (03.02.2022.)
15. EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE, 2022, European Hydrogen Backbone initiative adds six new members and sets its agenda for 2022, URL: https://gasforclimate2050.eu/news-item/european-hydrogen-backbone-initiative-adds-six-new-members-and-sets-its-agenda-for-2022/?fbclid=IwAR3Hfkfl2k_VuLEZbyChL7sNyugduOULBvoohfasTBCUb0Q_XeM0SpnCPWY (21.01.2022.)

16. EUROPEAN PARLAMENT, 2021, EU hydrogen policy Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy, URL: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)689332#:~:text=climate%2Dneutral%20economy-.EU%20hydrogen%20policy%3A%20Hydrogen%20as%20an%20energy,for%20a%20climate%2Dneutral%20economy&text=Hydrogen%20is%20expected%20to%20play,as%20inter%2Dseasonal%20energy%20storage](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)689332#:~:text=climate%2Dneutral%20economy-.EU%20hydrogen%20policy%3A%20Hydrogen%20as%20an%20energy,for%20a%20climate%2Dneutral%20economy&text=Hydrogen%20is%20expected%20to%20play,as%20inter%2Dseasonal%20energy%20storage) (09.02.2022.)
17. EUROPSKA KOMISIJA, 2019, Komunikacija Komisije Europskom parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i Odboru regija, Europski zeleni plan, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/ALL/?uri=CELEX:52019DC0640> (12.02.2022.)
18. EWE, 2021, The colours of hydrogen, URL: <https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen> (10.12.2021.)
19. GLOBAL LNG HUB, 2021, LNG demand growth 4% CAGR forecast to 2035, URL: <https://globallnghub.com/lng-demand-growth-4-cagr-forecast-to-2035.html> (27.01.2022.)
20. GREENFACTS, 2022, Global warming potential, URL: <https://www.greenfacts.org/glossary/ghi/global-warming-potential.htm> (28.01.2022.)
21. H2, 2022, Filling up with H2, URL: <https://h2.live/en/tankstellen/> (24.01.2022.)
22. HYDROGEN CENTRAL, 2022, European Union Unveils €300 Million Plan to Fund Hydrogen Research, URL: <https://hydrogen-central.com/european-union-e300-million-fund-hydrogen-research/?fbclid=IwAR1zIRyIcHvffaW0M2c5GQ94V1IaRNpkp1JfV9cvX-BvJYX6cc9R3xvewsw> (09.04.2022.)
23. GIIGNL, 2021, GIIGNL Annual Report, URL: https://giignl.org/wp-content/uploads/2021/11/GIIGNL_Annual_Report_November2021.pdf (31.01.2022.)
24. HYDROGEN COUNCIL, 2020, Path to hydrogen competitiveness A cost perspective, URL: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf (20.12.2021.)
25. HYDROGEN EUROPE, 2020, Clean Hydrogen Monitor 2020, URL: <https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Clean-Hydrogen-Monitor-2020.pdf> (14.02.2022.)

26. IGU, 2021, 2021 World LNG Report, URL: <https://www.igu.org/resources/world-lng-report-2021/> (10.02.2022.)
27. IRENA, 2021, A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050, URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Oct/A-Pathway-to-Decarbonise-the-Shipping-Sector-by-2050#:~:text=Urgent%20action%20is%20needed%20to,transacted%20via%20ocean%20going%20vessels> (19.01.2022.)
28. IRENA, 2022, Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor, URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen> (24.01.2022.)
29. IRENA, 2020, Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050, URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020> (03.02.2022.)
30. IRENA, 2020a, Green Hydrogen, A Guide to Policy Making, URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen> (20.02.2022.)
31. IMO, 2019, Prevention of Air Pollution from Ships, URL: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx#:~:text=MARPOL%20Annex%20VI%2C%20first%20adopted,ozon e%20depleting%20substances%20\(ODS\)](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx#:~:text=MARPOL%20Annex%20VI%2C%20first%20adopted,ozon e%20depleting%20substances%20(ODS)) (12.02.2022.)
32. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019, The Future of Hydrogen, URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (10.12.2021.)
33. JOLLY, W. L., 1999, Hydrogen, URL: <https://www.britannica.com/science/hydrogen> (2.2.2022.)
34. KORONEOS, C., DOMPROS, A., ROUMBAS, G., 2008, Hydrogen production via biomass gasification - A life cycle assessment approach, URL: https://www.researchgate.net/publication/228090129_Hydrogen_production_via_biomass_gasification-A_life_cycle_assessment_approach (28.01.2022.)
35. LNG INDUSTRY, 2021, Nine noteworthy LNG projects by 2027, URL: <https://www.lngindustry.com/liquid-natural-gas/23122021/nine-noteworthy-lng-projects-by-2027/> (12.02.2022.)
36. MOLLOY, P., BARONETT, L., 2019, URL: <https://www.greenbiz.com/article/truth-about-hydrogen-latest-trendiest-low-carbon-solution> (10.12.2021.)

37. MOLLOY, P., 2019, Run on Less with Hydrogen Fuel Cells, URL: <https://rmi.org/run-on-less-with-hydrogen-fuel-cells/#:~:text=By%20contrast%2C%20hydrogen%20has%20an,12%E2%80%9314%20kWh%20per%20kg> (29.01.2022.)
38. NATIONAL GRID, 2022, The hydrogen colour spectrum, URL: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum> (12.01.2022.)
39. NETL, 2006, Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions for hydrogen fuel production in the United States from LNG and coal, URL: <https://corpora.tika.apache.org/base/docs/govdocs1/830/830990.pdf> (28.01.2022.)
40. OFFER, G., HOWEY, D., CONTESTABILE, M., CLAGUE, R., BRANDON, N., 2010., Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system, URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/297158.pdf> (22.01.2022.)
41. PEKIC, S., 2021, EHB updates vision of Europe hydrogen infrastructure, URL: <https://www.offshore-energy.biz/ehb-updates-vision-of-europe-hydrogen-infrastructure/> (02.01.2022.)
42. ROBERT STRAUSS CENTER, 2015, The U.S. Shale Revolution, URL: <https://www.strausscenter.org/energy-and-security-project/the-u-s-shale-revolution/#:~:text=The%20E2%80%93Shale%20Revolution%E2%80%93D%20refers%20to,total%20U.S.%20crude%20oil%20production> (26.01.2022.)
43. SEALNG, 2021, Bunkering, URL: <https://sea-lng.org/why-lng/bunkering/> (22.01.2022.)
44. SLUŽBENI LIST EUROPSKE UNIJE, 2014, Direktiva 2014/94/EU Europskog parlamenta i Vijeća o uspostavi infrastrukture za alternativna goriva, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=celex%3A32014L0094>
45. SLUŽBENI LIST EUROPSKE UNIJE, 2018, Direktiva (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=LV> (12.02.2022.)
46. SLOCAT, 2021, Global Transport and Climate Change, URL: <https://tcc-gsr.com/global-overview/global-transport-and-climate-change/> (12.02.2022.)
47. STATISTA, 2020, Forecast hydrogen demand worldwide in a sustainable development scenario from 2019 to 2070, by sector, URL:

- <https://www.statista.com/statistics/760001/global-hydrogen-demand-by-sector-sustainable-scenario/> (30.01.2022.)
48. STATISTA, 2021, Liquefied natural gas trade volume worldwide from 1970 to 2020*. URL: <https://www.statista.com/statistics/264000/global-lng-trade-volume-since-1970/> (2.12.2021.)
 49. STATISTA, 2021b, Major importing countries of liquefied natural gas worldwide in 2020, URL: <https://www.statista.com/statistics/274529/major-lng-importing-countries/> (26.01.2022.)
 50. THINKSTEP, 2019, Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel, URL: <https://sphaera.com/research/life-cycle-ghg-emission-study-on-the-use-of-lng-as-marine-fuel/> (2.12.2021.)
 51. UMICORE, 2021, LOHC technology: accelerating the deployment of hydrogen storage and fuel cell electric vehicles, URL: <https://www.unicore.com/en/newsroom/news/lohc-technology/> (20.12.2021.)
 52. UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE, 2015, The Paris Agreement, URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (12.02.2022.)
 53. WOLF, A., ZANDER, N., 2021, Green Hydrogen in Europe: Do Strategies Meet Expectations?, URL: <https://www.intereconomics.eu/contents/year/2021/number/6/article/green-hydrogen-in-europe-do-strategies-meet-expectations.html> (16.02.2022)
 54. ZÜTTEL, 2003, Materials for hydrogen storage, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702103009222> (23.01.2022.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



Ivana Verčević

Datum: 05.10.2022.



KLASA: 602-01/22-01/187
URBROJ: 251-70-12-22-2
U Zagrebu, 03.10.2022.

Ivana Verčević, studentica


RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/187, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 03.10.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

UKAPLJENI PRIRODNI PLIN I VODIK KAO ALTERNATIVNA GORIVA U TRANSPORTU

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica




(potpis)

Prof.dr.sc. Daria Karasalihović
Sedlar

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

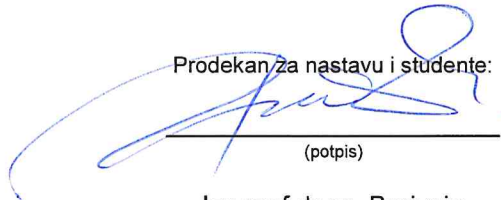


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)