

Dekarbonizacija plinskog transportnog sustava

Tomić, Margarita

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:164282>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**



Repository / Repozitorij:

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



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

DEKARBONIZACIJA PLINSKOG TRANSPORTNOG SUSTAVA

Diplomski rad

Margarita Tomić

N 312

Zagreb, 2022.

Sveučilište u Zagreb

Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

DEKARBONIZACIJA PLINSKOG TRANSPORTNOG SUSTAVA

MARGARITA TOMIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku

Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Negativan učinak klimatskih promjena, odnosno njihove posljedice predmet su rasprava već dugi niz godina. Budući da je energetska sektor zaslužan za većinu emisija stakleničkih plinova, neophodna je energetska tranzicija. Izravan prelazak s fosilnih goriva na obnovljivu električnu energiju je nepraktična i skupa opcija, stoga se javlja potreba dekarbonizacije plinskog sustava korištenjem niskougljičnih i obnovljivih plinova, odnosno biometana i vodika. Europska unija uvodi razne mjere kojima se potiče dekarbonizacija, počevši od *Europskog zelenog plana* preko *Strategije EU-a za integraciju energetskog sustava* i *Strategije za vodik za klimatski neutralnu Europu* do okvira *Spremni za 55%* i *REPowerEU*. Kako bi se željeni klimatski i energetska ciljevi doista ostvarili, Europska unija zakonodavnim okvirom ističe važnost korištenja novih plinova te prenamjene i/ili izgradnje infrastrukture za vodik. Europska unija vidi vodik kao važan energent budućeg energetskog miksa te je suradnjom nekoliko europskih operatera transportnog sustava započela izrada *Smjernica za izgradnju vodikove infrastrukture*. Iako utiskivanje biometana u postojeću plinsku mrežu ne predstavlja problem, utiskivanje vodika nije u potpunosti istraženo. Međutim, ulaganjem u znanost i istraživanje te inovacije i razvoj, proširuje se znanje o mogućnostima umješavanja vodika u tok prirodnog plina te o prenamjeni plinovoda za transport vodika. Smanjenje troškova proizvodnje zelenog vodika iz obnovljivih izvora energije u Europi potaknut će daljnji razvoj tržišta vodika i infrastrukture za njegovu primjenu.

Ključne riječi: dekarbonizacija, biometan, vodik, plinski transportni sustav

Diplomski rad sadrži: 80 stranica, 14 tablica, 20 slika i 86 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6. Zagreb

Voditeljica: 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. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNf

Datum obrane: 21. rujan 2022. godine, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

DECARBONIZATION OF THE GAS TRANSPORT SYSTEM

MARGARITA TOMIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Abstract

The negative effects of climate change and their consequences have been the subject of debate for many years. Since the energy sector is responsible for most of the greenhouse gas emissions, an energy transition is necessary. Switching from fossil fuels to renewable energy is an impractical and expensive option, so there is a need to decarbonize the gas system using low-carbon and renewable gases, ie biomethane and hydrogen. The European Union is introducing a variety of measures to encourage decarbonisation, ranging from the *European Green Deal* through the *EU Strategy for energy system integration* and the *Hydrogen Strategy for climate neutral Europe* to the *Fit for 55%* and *REPowerEU*. In order to achieve the desired climate and energy goals, the European Union emphasizes in the legislative framework the importance of using new gases and repurposing and/or building new hydrogen infrastructure. The European Union sees hydrogen as an important energy source for the future energy mix, so several European transport system operators have participated in the development of *European Hydrogen Backbone*. Although the injection of biomethane into the existing gas network is not a problem, the injection of hydrogen has not been fully researched. However, by investing in science, research, innovation and development, the knowledge about the possibilities of hydrogen injection in the natural gas grid and repurposing of gas pipelines for hydrogen transport is expanded. Reducing the cost of producing green hydrogen from renewable energy sources in Europe will encourage further development of the hydrogen market and its infrastructure.

Keywords: decarbonisation, biomethane, hydrogen, gas transmission system

Thesis contains: 80 pages, 14 tables, 20 figures i 86 references.

Original in: croatian

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

Supervisor: Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Reviewers: Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD
Associate Professor Luka Perković, PhD
Full Professor Domagoj Vulin, PhD

Defence date: September 21, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA	II
POPIS KRATICA	III
83. UVOD.....	1
2. NISKOUGLJIČNI PLIN I PLIN IZ OBNOVLJIVIH IZVORA	2
2.1. Biometan	4
2.2. Vodik.....	5
2.2.1. Cijena biometana i vodika	8
3. EU OKVIR ZA DEKARBONIZACIJU PLINSKE INRASTRUKTURE.....	9
3.1. Direktive i uredbe Europske unije koje se odnose na plinski sektor	10
3.2. Europske strategije koje potiču dekarbonizaciju.....	14
3.3. Prijedlozi Europskog parlamenta i Vijeća	17
3.4. Desetogodišnji plan razvoja mreže	18
3.5. Jamstvo o podrijetlu.....	19
4. PRIRODNI PLIN I PLINSKI TRANSPORTNI SUSTAV EUROPSKE UNIJE	22
4.1. Kvaliteta plina	22
4.1.1. Utjecaj utiskivanja vodika na kvalitetu plina.....	23
4.1.2. Čistoća biometana i vodika.....	26
4.2. Ključne komponente plinskog transportnog sustava	27
4.2.1. Transportni cjevovodi i ventili.....	28
4.2.2. Kompresorske stanice.....	29
4.2.3. Mjerne i ulazne regulacijske stanice	29
4.3. Buduća uloga plinske infrastrukture.....	30
4.3.1. Tehnička problematika transporta vodika cjevovodima.....	33
4.4. Smjernice za izgradnju vodikove infrastrukture	37
4.4.1. Vodikova infrastruktura do 2030. godine.....	38
4.4.2. Vodikova infrastruktura do 2040. godine.....	40
4.4.3. Procjena troškova izgradnje vodikove infrastrukture.....	42

5. DEKARBONIZACIJA PLINSKOG TRANSPORTNOG SUSTAVA U NJEMAČKOJ	44
5.1. Regulatorni okvir u Njemačkoj	45
5.2. Nacionalna strategija za vodik.....	47
5.3. Infrastruktura za transport prirodnog plina u Njemačkoj	48
5.3.1. Kvaliteta plina.....	49
5.4. Razvoj plinske mreže u Njemačkoj.....	49
5.4.1. Scenariji razvoja plinske mreže u Njemačkoj.....	50
5.4.2. Vodikova mreža u Njemačkoj	53
5.4.2.1. <i>Vodikova mreža do 2030. godine</i>	55
5.4.2.2. <i>Vodikova mreža do 2050. godine</i>	56
6. DEKARBONIZACIJA PLINSKOG TRANSPORTNOG SUSTAVA U HRVATSKOJ.....	58
6.1. Regulatorni okvir Republike Hrvatske	59
6.2. Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine.....	61
6.3. Infrastruktura za transport prirodnog plina u Hrvatskoj.....	64
6.3.1. Kvaliteta plina.....	64
6.4. Razvoj plinske mreže u Hrvatskoj.....	65
6.4.1. Scenariji razvoja plinske infrastrukture u Hrvatskoj.....	67
6.4.1.1. <i>Razvoj plinske mreže do 2030. i 2050. godine</i>	70
7. ZAKLJUČAK.....	73
8. LITERATURA	75

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Opskrba i potražnja za plinom do 2050. godine prema scenariju <i>Put ubrzane dekarbonizacije</i>	3
Slika 2-2. Raspodjela ukupne potražnje energije biometana i vodika na sektore zgradarstva, industrije, električne energije i teškog transporta	4
Slika 2-3. Cijena proizvodnje sivog, plavog i zelenog vodika te raspon cijene prirodnog plina i biometana od 2020. do 2050. godine	8
Slika 4-1. Vrijednosti Wobbe indeksa u različitim plinovima bez i sa 10 % vodika u smjesi plina	24
Slika 4-2. Vrijednosti metanskog broja u različitim plinovima bez i sa 10 % vodika u smjesi plina	25
Slika 4-3. Utjecaj dodavanja različitih količina vodika na gornju ogrjevnu vrijednost i Wobbe indeks za prirodni plin (lijevo) i ukapljeni prirodni plin (desno).....	26
Slika 4-4. Karta Europe na kojoj su označene države u kojima je dozvoljeno utiskivanje vodika (plava boja), biometana (zeleno boja) te biometana i vodika (ljubičasta boja) u plinski transportni sustav OTS-a	32
Slika 4-5. Usporedba cijene prenamijenjenih cjevovoda i novoizgrađenih cjevovoda za vodik	36
Slika 4-6. Vizija vodikove mreže do 2030. godine prema EHB-u	40
Slika 4-7. Zrela vodikova mreža do 2040. godine prema EHB-u	42
Slika 5-1. Potražnja za plinom u razmatranim scenarijima do 2050. godine	51
Slika 5-2. Grafički prikaz razvoja potražnje za plinom (metan i vodik) prema <i>scenariju dena – TM95/FNB i NECP – KSP 87,5</i>	52
Slika 5-3. Vodikova mreža u Njemačkoj do 2030. godine	56
Slika 5-4. Vodikova mreža u Njemačkoj do 2050. godine	57
Slika 6-1. Potrošnja, proizvodnja i uvoz prirodnog plina od 2011. do 2019. godine te projekcija za razdoblje od 2019. do 2030. godine.....	58
Slika 6-2. Povezivanje hrvatskog plinskog transportnog sustava s europskim dobavnim pravcima	59
Slika 6-3. Ukupna potrošnja energije prema <i>Scenariju S2</i>	69
Slika 6-4. Ukupna potrošnja energije prema <i>Scenariju S1</i>	70
Slika 6-5. Pretpostavljena proizvodnja određenih plinova prema <i>Nultom scenariju</i>	71

Slika 6-6. Procijenjena ulaganja u proizvodnju sintetičkih goriva i vodika te skladištenje vodika do 2050. godine prema <i>Nultom scenariju</i>	72
--	----

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Različite vrste vodika i metode proizvodnje vodika.....	6
Tablica 4-1. Parametri standardne kvalitete plina prema CEN-u.....	22
Tablica 4-2. Usporedba parametara kvalitete prirodnog plina, vodika i ukapljenog prirodnog plina.....	24
Tablica 4-3. Minimalni udio metana u toku biometana za pojedine europske države	26
Tablica 4-4. Prednosti i nedostaci metoda prenamjene postojećih cjevovoda za transport vodika	34
Tablica 4-5. Potrebna koncentracije inhibitora koji bi se spriječio negativan utjecaj krhkosti čelika.....	36
Tablica 4-6. Procjena troška pojedinih parametara za realizaciju vodikove infrastrukture do 2040. godine	43
Tablica 5-1. Tehničke karakteristike visokotlačnog cjevovoda.....	49
Tablica 5-2. Predviđeni kapaciteti i potražnja za vodikom prema najavljenim projektima do 2030. godine.....	54
Tablica 6-1. Strateški ciljevi i njihove ciljane vrijednosti do 2030. i 2050. godine (NN 40/22-492).....	63
Tablica 6-2. Pretpostavljena potrošnja energije te kapacitet elektrolizatora i količina potrebnog vodika u razdoblju od 2020. do 2050. godine (NN 40/22-492).....	63
Tablica 6-3. Standardna kvaliteta plina u RH prema <i>Izmjenama i dopunama Opih uvjetima opskrbe plinom</i> (NN 100/21-1815)	65
Tablica 6-4. Planirana ulaganja Plinacro-a u razvoj plinskog transportnog sustava do 2030. godine (HERA, 2020).....	67
Tablica 6-5. Pretpostavljeni ciljevi smanjenja emisija, udjela OIE prema scenarijima S0, S1 i S2 do 2030. i 2050. godine (NN 25/20-602)	68

POPIS KRATICA

- ACER – Agencija Europske unije za suradnju energetske regulatora (engl. *European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators*)
- AEL – alkalni elektrolizator (engl. *Alkaline Electrolyzer*)
- AIB – Udruga izdavateljskih tijela (engl. *Association of Issuing Bodies*)
- ATR – autotermalno reformiranje (engl. *Autothermal Reforming*)
- BMWi – Federalno ministarstvo gospodarstva i energetike (njem. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*)
- BNetzA – Federalna agencija za mreže (njem. *Bundesnetzagentur*)
- CCS – hvatanje i skladištenje ugljika (engl. *Carbon Capture and Storage*)
- CCU – hvatanje i korištenje ugljika (engl. *Carbon Capture and Utilisation*)
- CEF – Instrument za povezivanje Europe (engl. *Connecting Europe Facility*)
- CEN – Europski odbor za normizaciju (engl. *European Committee for Standardization*)
- CH₄ – metan
- CO – ugljični monoksid
- CO₂ – ugljični dioksid
- DIN – Njemački institut za standardizaciju (njem. *Das Deutsche Institut für Normung*)
- DVGW – Njemačko tehničko i znanstveno društvo za plin i vodu (njem. *Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches*)
- EASEE – Europska udruga za racionalizaciju razmjene energije (engl. *European Association for the Streamlining of Energy Exchange*)
- EECS – Europski sustav energetske certifikata (engl. *European Energy Certificate System*)
- EEG – Zakon o obnovljivim izvorima energije (njem. *Das Erneuerbare-Energien-Gesetz*)
- EHB – Smjernice za izgradnju vodikove infrastrukture (engl. *European Hydrogen Backbone*)
- ENTSO-E – Europska mreža operatora prijenosnog sustava za električnu energiju (engl. *European Network of Transmission System Operators for Electricity*)
- ENTSO-G – Europske mreže operatora transportnih sustava za plin (engl. *European Network of Transmission System Operators for Gas*)
- EnWG – Zakon o energetici (njem. *Energiewirtschaftsgesetz*)
- ERGA – Europski registar obnovljivog plina (engl. *European Renewable Gas Registry*)
- ETR – projekti energetske tranzicije (engl. *Energy Transition*)
- EU – Europska unija
- FCP – širenje zamorne pukotine (engl. *Fatigue crack propagation*)

FNB Gas – operatori plinskog transportnog sustava (njem. *Fernleitungsnetzbetreiber Gas*)
GasNEV – Pravilnik o naknadama za plinsku mreži (njem. *Gasnetzentgeltverordnung*)
GasNZV – Uredba o pristupu plinskoj mreži (njem. *Gasnetzzugangsverordnung*)
GO – Jamstvo o podrijetlu (engl. *Guarantee of Origin*)
HAZ – degradacija zona pod utjecajem topline (engl. *Heat-affected zones*)
Hd – donja ogrjevna vrijednost
HERA – Hrvatska energetska regulatorna agencija
Hg – gornja ogrjevna vrijednost
IPCC-a – Međuvladin panel o klimatskim promjenama (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change*)
KSP – program zaštite klime (njem. *Klimaschutzprogramm*)
MB – metanski broj
NECP – nacionalni energetske i klimatski plan (engl. *National Energy and Climate Plan*)
NGC – nevladini certifikati (engl. *Non-Governmental Certificates*)
NIP – Nacionalni inovacijski program za tehnologiju vodika i gorivih ćelija (engl. *National Innovation Programme (NIP) for Hydrogen and Fuel Cell Technology*)
NWR – Nacionalno vijeće za vodik (njem. *Nationaler Wasserstoffrat*)
O₂ – kisik
OIE – obnovljivi izvori energije
OTS – operator transportnog sustava
PEM – elektrolizator s polimernom elektrolitskom membranom (engl. *Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer*)
RH – Republika Hrvatska
S0 – Scenarij razvoja uz primjenu postojećih mjera
S1 – Scenarij ubrzane energetske tranzicije
S2 – Scenarij umjerene energetske tranzicije
SMR – parno reformiranje metana (engl. *Steam Methane Reforming*)
SO₂ – sumporov dioksid
SOECs – elektrolizator s elektrodama od krutih oksida (engl. *Solid Oxide Electrolyzer Cells*)
TEN-E – transeuropske energetske infrastrukture (engl. *Trans-European Energy Networks*)
THE – trgovačko čvorište Europe (engl. *Trading Hub Europe*)
TM – scenarij mješavine tehnologije (njem. *Technologiemixszenario*)
TYNDP – desetogodišnji plan razvoja mreže (engl. *Ten Year Network Development Plan*)
UK – Ujedinjeno Kraljevstvo

UNP – ukapljeni naftni plin

UPP – ukapljeni prirodni plin

WEB – istraživanje o proizvodnji i potražnji za vodikom (njem. *Wasserstoffabfrage Erzeugung und Bedarf*)

WI – Wobbe indeks

1. UVOD

Europska tranzicija prema niskougljičnom gospodarstvu je u tijeku. Zemlje članice Europske unije (engl. *European Union – EU*) su se Pariškim sporazumom obvezale održavati globalni porast temperature ispod 2 °C te uložiti znatne napore kako bi se taj porast ograničio na 1,5 °C. *Europski zeleni plan* usmjerava Europu prema značajnom smanjenju emisija stakleničkih plinova do 2030. godine i prema klimatskoj neutralnosti koja se želi postići do 2050. godine ističući važnost dekarbonizacije svih sektora gospodarstva.

Kako bi se postigli željeni ciljevi, ključna je transformacija energetskega sektora koji je odgovoran za 75 % emisija stakleničkih plinova u Europskoj uniji (COM, 2019). U godinama koje slijede, postoji mogućnost ubrzane transformacije energetskega sustava i njegove strukture zahvaljujući nižim troškovima u području obnovljivih izvora energije (OIE), digitalizaciji gospodarstva te novim tehnologijama (COM, 2020a). Nadalje, energija se mora temeljiti na većem udjelu geografski raspoređenih obnovljivih izvora energije, fleksibilnoj integraciji različitih nositelja energije, zadržavanju učinkovitosti resursa i izbjegavanju onečišćenja.

Metoda dekarbonizacije koja je obično najučinkovitija je izravna elektrifikacija i obnovljiva toplina, ali je preskupa i nepraktična u nekim slučajevima krajnje upotrebe (Gas for Climate, 2020a). Tada bi primjena goriva iz obnovljivih izvora energije ili niskougljičnog goriva bila puno bolja opcija. Očekuje se da će u budućem energetskega miks Europe, električna energija i novi plinovi (biometan, plavi vodik, zeleni vodik i dr.) ispunjavati komplementarne uloge. Razlog tome su potencijalne velike količine električne energije iz obnovljivih izvora te potražnja za obnovljivim plinovima i plinovima koji su proizvedeni iz fosilnih goriva uz hvatanje ugljika. Novi plinovi omogućit će dekarbonizaciju u sektorima koje je teško elektrificirati te se mogu lako transportirati primjenom postojeće plinske mreže. Njihova primjena će se značajno povećati u odnosu na danas, a očekuje se da će posebno važnu ulogu imati biometan i vodik. Međutim, potrebno je povezati različite gospodarske sektore i iskoristiti tehnološki napredak te je potrebno stvoriti uvjete za stvaranje i razvoj tržišta plinova koji potječu iz fosilnih goriva uz proces hvatanja ugljika, odnosno plinova iz obnovljivih izvora energije.

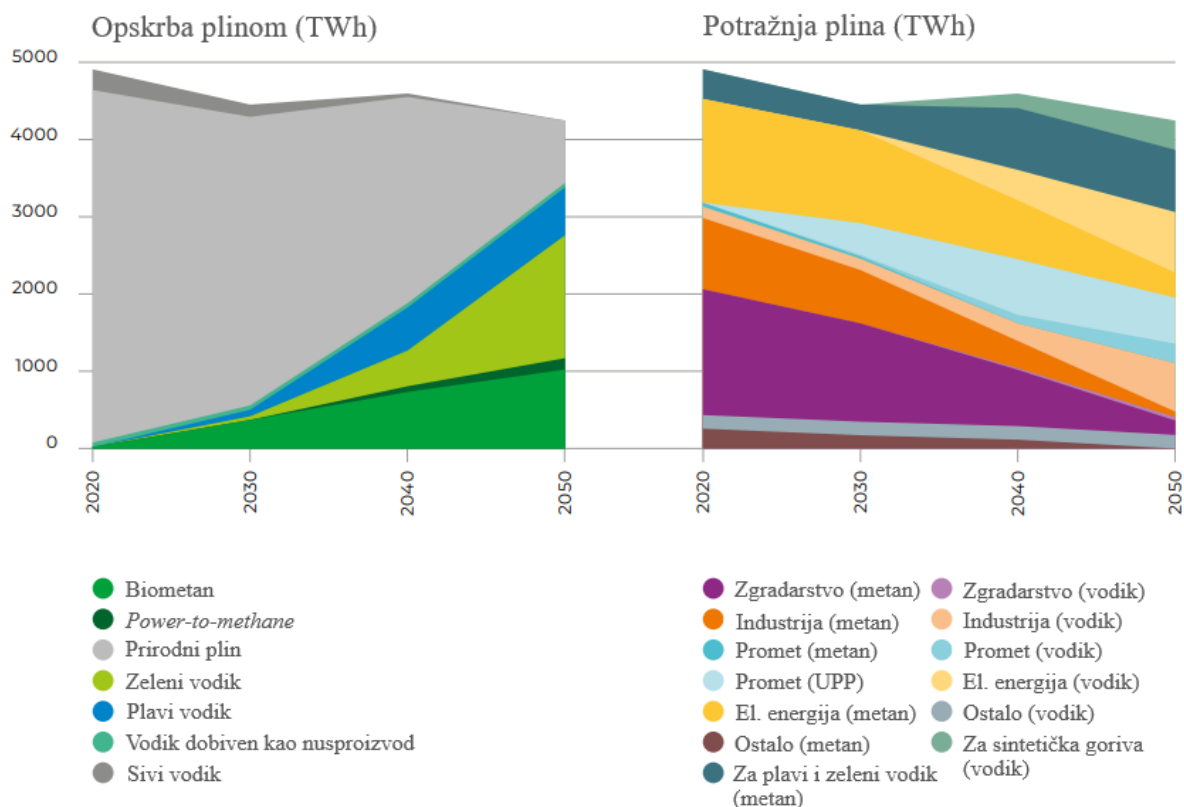
2. NISKOUGLJIČNI PLIN I PLIN IZ OBNOVLJIVIH IZVORA

Plinovi koji se koriste u energetsom sustavu EU-a ne smiju biti izvor emisija stakleničkih plinova, kako bi se lakše provodila dekarbonizacija energetskeg sektora. U tom slučaju potrebna je primjena novih plinova, odnosno plina iz obnovljivih izvora i niskougljičnih plinova.

Plinovi iz obnovljivih izvora su bioplin i drugi oblici plina proizvedeni iz goriva koji nisu biološkog podrijetla (COM, 2021a). U kategoriju obnovljivog plina ubrajaju se biometan i zeleni vodik te plin proizveden iz obnovljive električne energije – *Power-to-Gas* i *Power-to-Methane*. Niskougljičnim plinovima se smatraju plavi vodik i prirodni plin koji se usmjerava na postrojenje za hvatanje i skladištenje ugljika (engl. *Carbon Capture and Storage – CCS*) (Gas for Climate, 2019).

Udruženje *Gas for Climate*, nastalo 2017. godine, djeluje sukladno *Pariškom sporazumu* te se zalaže za postizanje neto nula emisija stakleničkih plinova do 2050. godine (Gas for Climate, 2021a). Grupaciju čini deset vodećih europskih kompanija za transport plina (*Enagás, Energinet, Fluxys, Gasunie, GRTgaz, ONTRAS, Open Grid Europe, Snam, Swedegas i Teréga*) i dva udruženja za obnovljivi plin (*Consortio Italiano Biogas* i *European Biogas Association*). Članovi udruženja ističu važnost postojeće plinske infrastrukture za transport, skladištenje i distribuciju obnovljivog i niskougljičnog plina uz povećanje udjela obnovljive električne energije u energetsom miksu.

Prema studiji koje je provelo udruženje *Gas for Climate* i scenariju nazvanom *Put ubrzane dekarbonizacije* koji teži ostvarenju ciljeva Pariškog sporazuma i klimatskoj neutralnosti izrađen je dijagram prikazan na slici 2-1. Očekuje se da će ukupna potražnja za plinom između 2020. i 2030. godine padati zbog napora koji se ulažu u elektrifikaciju i energetske učinkovitost. Nakon toga očekuje se lagano povećanje opskrbe i potražnje za plinom, a između 2040. i 2050. godine slijedi ponovni pad te se očekuje opskrba obnovljivim ili niskougljičnim plinom do 2050. godine.



Slika 2-1. Opisrba i potražnja za plinom do 2050. godine prema scenariju *Put ubrzane dekarbonizacije* (Gas for Climate, 2020a)

Udruženje *Gas for Climate* je 2019. godine predstavilo dva scenarija energetske tranzicije u Europi, a to su *Optimizirani plinski scenarij* i *Scenarij minimalnog korištenja plina* (Gas for Climate, 2019). *Scenarij minimalnog korištenja plina* podrazumijeva dekarbonizaciju s minimalnom ulogom plina i plinske infrastrukture, odnosno predviđa se ukidanje potražnje za plinom u europskom energetske sustavu (osim biometana koji bi se primjenjivao u industriji). *Optimizirani plinski scenarij* uključuje primjenu električne energije iz obnovljivih izvora i novih plinova – biometana i vodika. U tom slučaju, plinska infrastruktura bi se koristila za transport i distribuciju 1170 TWh biometana te oko 1700 TWh vodika (uglavnom zelenog). Sankeyev dijagram na slici 2-2. prikazuje raspodjelu očekivanih 2900 TWh biometana i vodika prema određenim sektorima gospodarstva.



Slika 2-2. Raspodjela ukupne potražnje energije biometana i vodika na sektore zgradarstva, industrije, električne energije i teškog transporta (Gas for Climate, 2020a)

2.1. Biometan

Biometan je plin koji se može proizvesti iz poljoprivrednih ostataka i usjeva te iz drvene biomase (Gas for Climate, 2020a). Razlikuju se dvije glavne tehnologije za proizvodnju biometana – anaerobna digestija i termičko rasplinjavanje. Anaerobna digestija je proces koji uključuje niz bioloških procesa pri čemu mikroorganizmi razgrađuju biorazgradivi materijal bez prisutnosti kisika (Gas for Climate, 2021b). Produkti procesa su bioplin i digestat koji se koristi kao organsko gnojivo. Proizvedeni bioplin sadrži oko 55 % metana, a ostatak čini biogeni ugljični dioksid (CO₂). Uklanjanjem CO₂ iz bioplina proizvodi se biometan koji se može utiskivati u mrežu prirodnog plina. Troškovi proizvodnje biometana anaerobnom digestijom se procjenjuju na 50·10⁶ – 90·10⁶ EUR/TWh, a najviše ovise o korištenoj sirovini.

Termičko rasplinjavanje je tehnologija proizvodnje biomase na visokoj temperaturi uz prisustvo kontrolirane količine kisika i pare, pri čemu dolazi do potpune razgradnje lignocelulozne biomase (drvena biomasa, poljoprivredni ostaci) i krutog komunalnog otpada (Gas for Climate, 2021b). Na ovaj način proizvede se sintetični plin koji je mješavina ugljičnog monoksida (CO), vodika i ugljičnog dioksida. Nakon hlađenja i pročišćavanja sintetskog plina, slijedi proces metanacije u katalitičkom reaktoru pri čemu se sintetski plin pretvara u biometan. Kao i kod anaerobne digestije, preostali CO₂ se može koristiti u industrijske svrhe. Ova tehnologija još nije komercijalno dostupna, ali se očekuje njezina

šira upotreba od 2030. godine. Trenutni troškovi proizvodnje biometana termičkim rasplinjavanjem su oko $85 \cdot 10^6$ EUR/TWh, a očekuje se pad cijene na $60 \cdot 10^6$ EUR/TWh.

Izgaranjem biometana za proizvodnju energije i topline dolazi do emisija stakleničkih plinova kao i kod prirodnog plina. Međutim, u procesu uzgoja biomase jednaka se količina CO₂ hvata iz atmosfere, što znači da emisije izgaranja imaju kratak ciklus ugljika te se prema smjernicama IPCC-a (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change* – Međuvladin panel o klimatskim promjenama) računaju kao nulte emisije. Potencijal smanjenja emisija je velik, a kada bi biometan zamijenio fosilna goriva postiglo bi se smanjenje emisija više od 80 % (Gas for Climate, 2021b). S obzirom na očekivanu veću primjenu biometana, tijekom životnog ciklusa mogle bi se stvarati negativne emisije. Izbjegavanje emisija iz alternativnog otpada, akumulacija ugljika u tlu, tehnologija hvatanja i skladištenja ugljika, neke su od tehnika kojima bi se ostvarile negativne emisije.

Sposobnost stvaranja negativnih emisija jedna je od najvažnijih prednosti biometana, a stručne analize o klimatskim promjenama pokazuju da su svijetu potrebne značajne negativne emisije kako bi rast globalne temperature bio znatno ispod 2 °C (Gas for Climate, 2020a). Negativne emisije potrebne su ne samo tijekom sljedećih desetljeća, već će biti potrebne i nakon 2050. godine. Druge prednosti biometana su što se može proizvesti iz lokalno proizvedenog bioplina, čime se isključuje potreba za transportom na velike udaljenosti, nusproizvodi nastali proizvodnjom iz bioplina se mogu koristiti ili prodavati, organski otpad s farmi se može preraditi u biometan umjesto da se odlaže i zagađuje okoliš, a povećani udio biometana povećava sigurnost opskrbe pojedine države (Koonaphapdeelert et al., 2020). Iako se u EU proizvodi oko 60 % svjetske proizvodnje bioplina te se biometan proizvodi u većini europskih država, tržište biometana je još mlado.

2.2. Vodik

Vodik je najlakši i najrasprostranjeniji element u svemiru. Nalazi se u plinovitom agregatnom stanju pri standardnom tlaku i temperaturi, bez boje, mirisa i okusa te je zapaljiv, ali nije otrovan. Vodik se spaja s raznim drugim elementima te čini oko tri četvrtine mase svemira, a kao slobodan element se pojavljuje u tragovima (Krsnik i Pavlović, 2020). Kao spoj, vodik se najviše nalazi u obliku vode, a može biti dio kiselina, otopina i mnogih organskih spojeva. Važna razlika između biometana i vodika jest činjenica da vodik pri izgaranju ne ispušta stakleničke plinove te ne onečišćuje zrak (Gas for Climate, 2020a). U sektorima koje je teško dekarbonizirati, vodik će biti vrlo važan za smanjenje emisija, a moći

će se koristiti kao gorivo u određenim vrstama prijevoza te kao sirovina u određenim industrijskim procesima.

Na Zemlji vodik postoji samo u kemijski vezanom obliku te se mora proizvoditi posebnim procesima. Može se proizvoditi iz različitih izvora, odnosno iz obnovljivih izvora energije ili fosilnih goriva. Razlikuju se tri glavne vrste vodika – sivi, plavi i zeleni vodik – ali postoje i druge vrste vodika koje su prikazane u tablici 2-1. Sivi vodik je vodik proizveden iz fosilnih goriva uz ispuštanje CO₂ u atmosferu te dovodi do značajnih emisija stakleničkih plinova. Danas se oko 95 % vodika dobiva iz ugljikovodika pri čemu nastaje i CO₂ kao štetan nusproizvod (Europski parlament, 2022). Drugi tip vodika je plavi vodik koji može biti proizveden termokemijskom pretvorbom iz fosilnih goriva uz CCS tehnologiju. Međutim, ekološki najprihvatljiviji je vodik proizveden iz obnovljivih izvora energije kao što su solarna energija, energija vjetra ili hidroenergija, odnosno procesom elektrolize vode uz pomoć dobivene obnovljive energije, tj. zeleni vodik.

Tablica 2-1. Različite vrste vodika i metode proizvodnje vodika (National Grid, 2022)

Vrsta/boja vodika	Proces proizvodnja
Zeleni	Elektroliza vode uz električnu energiju iz obnovljivih izvora (sunce i vjetar)
Plavi	Koristeći prirodni plin uz SMR proces i CCS tehnologiju
Sivi	Koristeći prirodni plin uz SMR proces
Crni	Primjena ugljena uz proces rasplinjavanja
Smeđi	Primjena lignita uz proces rasplinjavanja
Rozi/ljubičasti/crveni	Elektroliza uz nuklearnu energiju
Tirkizni	Proces metanske pirolize pri čemu nastaju vodik i čvrsti ugljik
Žuti	Elektroliza uz solarnu energiju
Bijeli	Prirodni geološki vodik, nalazi se u podzemnim naslagama

Budući da se sivi vodik proizvodi iz fosilnih goriva te tijekom proizvodnje dolazi do znatnih emisija stakleničkih plinova, njegova upotreba se ne očekuje u dekarboniziranom energetsom sustavu. Međutim, proizvodnja i upotreba plavog i zelenog vodika smatra se puno boljom opcijom u budućem plinskom sustavu. Plavi vodik može se proizvesti na dva načina – parnim reformiranjem metana (engl. *Steam Methane Reforming – SMR*) i autotermalnim reformiranjem (engl. *Autothermal Reforming – ATR*) (Gas for Climate, 2019). U procesu ATR-a može se uhvatiti veći dio CO₂ te nije potrebno dodatno sagorijevanje plina za toplinu jer je proces egzoterman. Međutim, ATR proces zahtjeva opskrbu kisikom, što dovodi do dodatnih emisija ako se kisik ne isporučuje kao nusproizvod ili kao obnovljiva energija te se na taj način djelomično poništava klimatska prednost ove

tehnologije. Plavi vodik može se dobiti iz prirodnog plina kroz SMR proces. U SMR procesu, prirodni plin se miješa s vrućom parom (uz prisutnost katalizatora) te dolazi do kemijske reakcije kojom se stvaraju vodik i ugljični monoksid. Ugljičnom monoksidu se dodaje voda, pri čemu nastaju ugljični dioksid i dodatni vodik. S obzirom na prisutne emisije ugljičnog dioksida, CO₂ se pomoću CCS tehnologije hvata i pohranjuje u tlo te preostaje gotovo čisti vodik. Zahvaljujući postojećoj infrastrukturi prirodnog plina i postojećim SMR postrojenjima, u kratkom vremenskom periodu može se proizvesti velika količina plavog vodika.

Zeleni vodik je plin koji se proizvodi na ekološki prihvatljiv i održiv način. Proces proizvodnje zelenog vodika je elektroliza vode pri čemu se koristi energija iz obnovljivih izvora te dolazi do razdvajanja molekule vode na vodik i kisik. Proces se odvija u elektrolizatorima, a postoji nekoliko vrsta elektrolizatora (Schmidt et al., 2017):

- alkalni elektrolizatori (engl. *Alkaline electrolyzer – AEL*),
- elektrolizatori s polimernom elektrolitskom membranom (engl. *Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer – PEM*) i
- elektrolizatori s elektrodama od krutih oksida (engl. *Solid Oxide Electrolyzer Cells – SOECs*).

AEL elektroliza je najstariji proces koji koristi vodenu otopinu alkana kao elektrolita, dok PEM sustavi koriste čvrsti polimerni elektrolit za elektrolizu vode. Najmanje razvijen proces elektrolize je SOECs elektrolizatorom koji pokazuje najveću učinkovitost, ali je tehnologija skuplja od prethodne dvije.

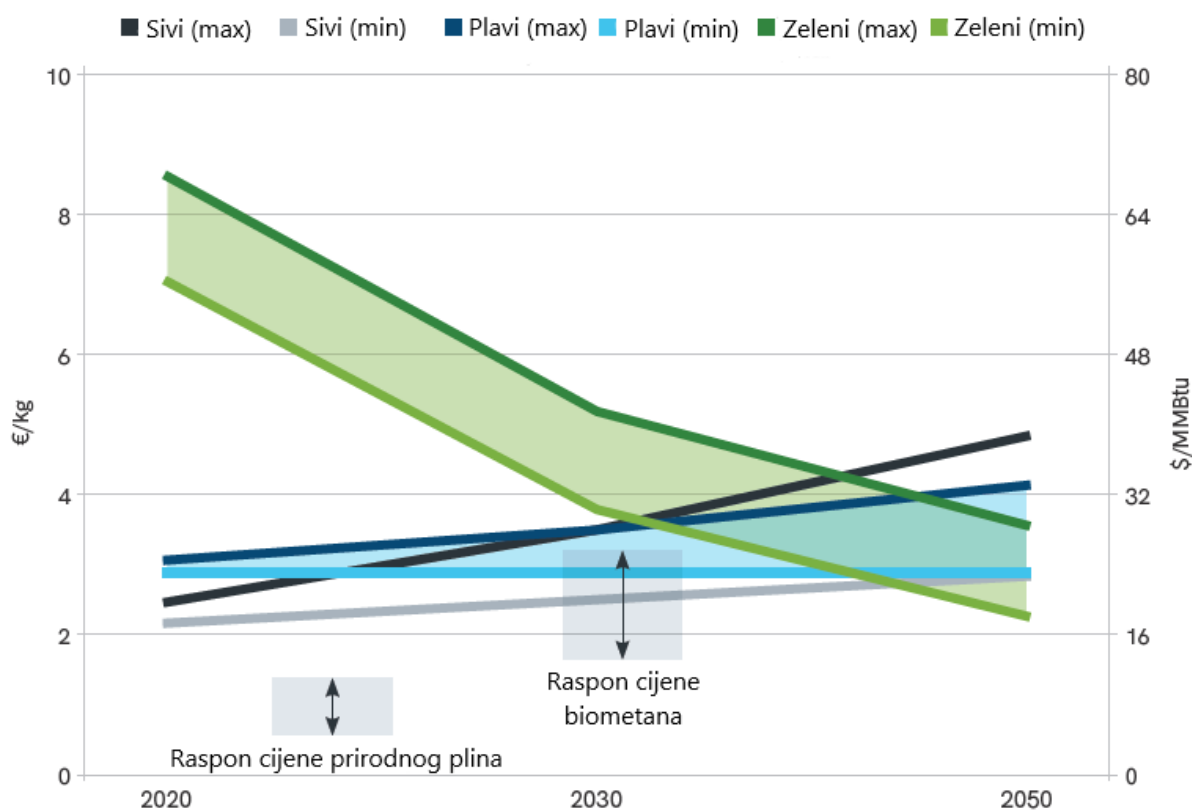
Udio vodika u potrošnji energije u Europi danas iznosi oko 2 % te se proizvodi isključivo iz fosilnih goriva bez smanjenja emisija (COM, 2020b). Za razvoj tržišta vodika u početnim godinama, plavi vodik proizveden SMR tehnologijom bi mogao biti rješenje, a s povećanjem potrebe za vodikom i cjenovnom konkurentnošću, počela bi proizvodnja zelenog vodika (Gas for Climate, 2020a). Stoga se vodik smatra energetskim nositeljem koji će biti ključan za spajanje sektora električne energije i plinskog sektora putem postojeće infrastrukture te će se na taj način isplatiti dekarbonizacija gospodarstva Europske unije.

Uz sve jeftiniju energiju iz obnovljivih izvora, proizvodnja zelenog vodika elektrolizom je obećavajuća opcija dekarbonizacije plinskog sustava. Osim prednosti vodika vezanih uz klimu, druge prednosti primjene vodika u energetskom sustavu su skladištenje u slanim kavernama, potencijalna velika dostupnost i širok raspon primjena (Gas for Climate, 2019).

2.2.1. Cijena biometana i vodika

Iako su brojne prednosti primjene niskougljičnih i obnovljivih plinova, trenutno je njihov udio vrlo mali u ukupnoj potrošnji energije. Razlog tome je cijena njihove proizvodnje koja je nerijetko veća od cijene prirodnog plina i drugih energenata na bazi fosilnih goriva. Međutim, kako bi se ostvarili željeni klimatski i energetske ciljevi potrebno je povećati proizvodnju ovih plinova, odnosno smanjiti troškove proizvodnje (IGU, 2021).

Cijene sivog, zelenog i plavog vodika su znatno veće u odnosu na cijenu proizvodnje prirodnog plina i biometana, što prikazuje slika 2-3. Prema dijagramu je primjetno da su cijene zelenog vodika više nego cijene drugih oblika vodika, ali očekuje se njihov pad zbog smanjenih troškova proizvodnje energije iz obnovljivih izvora i cijene elektrolizatora u budućim godinama.



Slika 2-3. Cijena proizvodnje sivog, plavog i zelenog vodika te raspon cijene prirodnog plina i biometana od 2020. do 2050. godine (IGU, 2021)

Cijena elektrolizatora je u razdoblju od 2010. do 2020. godine pala za 60 %, a očekuje se da će se cijena smanjiti upola do 2030. godine (COM, 2020b). Time će zeleni vodik postati konkurentan sivom vodikom već tijekom 2030-ih godina, što prikazuje prethodna slika, te će se time potaknuti potražnja za novim plinom.

3. EU OKVIR ZA DEKARBONIZACIJU PLINSKE INRASTRUKTURE

U usporedbi s ostatkom svijeta, Europska unija je područje u kojem se provodi najviše klimatskih politika, a one se temelje na *Kyotskom protokolu* koji je usvojen 1997. godine (EUR-Lex, 2016). Tijekom prvog obvezujućeg razdoblja *Kyotskog protokola* (2008. – 2012. godine), države članice su se obvezale smanjiti emisiju stakleničkih plinova za 5 % u usporedbi s razinama iz 1990. godine. U drugom obvezujućem razdoblju (2013. – 2020. godine) dogovorena je provedba energetske – klimatskog plana „20-20-20“, odnosno smanjenje emisija stakleničkih plinova za 20 %, poboljšanje energetske učinkovitosti za 20 % i udio od 20 % energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji energije do 2020. godine. Zatim je 2014. godine, Europsko vijeće podržalo okvir klimatske i energetske politike za 2030. godinu koje je uključivalo smanjenje emisija za 40 %, najmanje 27 % udjela obnovljive energije te povećanje energetske učinkovitosti za 27 % (Europsko vijeće, 2021).

Slijedila je *Konferencija o klimi* 2015. godine kada je donesen *Pariški sporazum* čiji je cilj ograničiti globalno zagrijavanje na razinu ispod 2 °C i nastojati ograničiti povećanje globalne temperature na 1,5 °C kako bi se izbjegle katastrofalne posljedice klimatskih promjena (*Pariški sporazum*, 2016).

U studenom 2019. godine, Europski parlament je proglasio „klimatsku krizu“ nakon čega je Europska komisija donijela *Europski zeleni plan* (COM, 2019). *Europski zeleni plan* predstavlja okvir postizanja održivog gospodarstva EU-a, zaustavljanja klimatskih promjena, smanjenje onečišćenja te osiguranja pravedne tranzicije. Glavni cilj koji se želi postići *Zelenim planom* je postizanje klimatske neutralnosti EU-a do 2050. godine. U *Europskom zelenom planu* opisana su potrebna ulaganja i dostupni alati za financiranje. Pri tome, EU želi promicati i provoditi politike u području klime, okoliša i energije diljem svijeta, odnosno biti globalni predvodnik u sprječavanju klimatskih promjena.

Europsko Vijeće podržalo je cilj ostvarenja klimatski neutralne Europske unije do 2050. godine, u skladu s ciljevima *Pariškog sporazuma* te je Komisija 2020. godine donijela prijedlog europskog zakona o klimi kao važnog dijela *Europskog zelenog plana* (Uredba (EU) 2021/1119). U lipnju 2021. godine *Europski zakon o klimi* je stupio na snagu kako bi se željeni cilj pretvorio u zakonsku obvezu. Dakle, ovim zakonom kao obvezujući cilj EU-a postavlja se smanjenje neto emisija stakleničkih plinova za najmanje 55 % do 2030. godine u odnosu na razine iz 1990. godine.

Europski zeleni plan, odnosno paket *Čista energija* ističe kako je za postizanje cilja klimatske neutralnosti neophodna dekarbonizacija energetske sektora. Ključna načela *Čiste energije* su energetska učinkovitost, razvoj energetske sektora koji se temelji na

obnovljivim izvorima energije, sigurna i pristupačna opskrba energijom te integrirano, međupovezano i digitalizirano tržište energije (Europska komisija, 2019). Potrebno je prilagoditi europsku energetske regulativu, a 2023. godine države članice će ažurirati svoje nacionalne energetske i klimatske planove (engl. *National Energy and Climate Plan – NECP*) kako bi bile u skladu s postavljenim ciljevima za 2030. godinu.

Budući da je energetske sektor izvor 75 % emisija stakleničkih plinova, nužna je transformacija kako bi se postigla klimatska neutralnost. Tijekom 2020. godine, EU je donijela nekoliko strategija kojima se nastoji potaknuti prestanak korištenja fosilnih goriva te započeti proces dekarbonizacije. Vrlo važnu ulogu će imati postojeća plinska infrastruktura, a za njen razvoj najvažnije strategije su donesene u srpnju 2020. godine: *Energija za klimatski neutralno gospodarstvo: strategija EU-a za integraciju energetske sustava* i *Strategija za vodik za klimatski neutralnu Europu*.

Nadalje, u srpnju 2021. godine, Europska komisija je predstavila paket *Spremni za 55 %* odnosno niz prijedloga kojima bi se izmijenilo zakonodavstvo EU-a u području klime, energetike i prometa (Europsko vijeće, 2022). Izazovima i teškoćama s kojima se susreo svijet, a koje su uzrokovane invazijom Rusije na Ukrajinu, Europska komisija donijela je plan *REPowerEU* (Europska komisija, 2022). Dakle, *REPowerEU* je plan kojim se želi ukloniti ovisnost o fosilnim gorivima iz Rusije prije 2030. godine, odnosno ubrzati tranzicija na čistu energiju. Predloženo je povećanje cilja za OIE sa 40 na 45 % do 2030. godine, domaća proizvodnja obnovljivog vodika od 10 milijuna tona (oko 333 TWh), uključenje biometana i povećanje njegove proizvodnje do 2030. godine te su predložene mjere financiranja i druge mjere smanjenja energetske ovisnosti i brze zelene tranzicije.

3.1. Direktive i uredbe Europske unije koje se odnose na plinski sektor

Europska unija ima dobro uspostavljen zakonodavni okvir o prirodnom plinu i plinske infrastrukturi, a u središtu je *Direktiva 2009/73/EZ* i povezani propisi (ACER, 2021). Na putu dekarbonizacije plinskog sektora potrebno je u energetske politiku uključiti biometan i vodik. Međutim, glavna prepreka utiskivanju vodika i biometana u plinsku mrežu je nedostatak okvira za zahtjeve utiskivanja niskougljičnih i obnovljivih plinova. Stoga je potrebno prilagoditi postojeće zakonodavstvo te ga dalje razvijati kako bi se riješilo pitanje obrade i primjene novih plinova. Zakonodavstvo Europske unije koje se odnosi na plinski sektor te stajalište o uvođenju novih plinova i dekarbonizaciji energetske sustava su izdvojeni u nastavku.

- ***Direktiva o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište prirodnog plina***

Direktiva 2009/73/EZ o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište prirodnog plina utvrđuje zajednička pravila za transport, distribuciju, opskrbu i skladištenje prirodnog plina (Direktiva 2009/73/EZ). Uspostavljena pravila se odnose na prirodni plin, ukapljeni prirodni plin, bioplin, plin iz biomase i druge vrste plinova koje je moguće na tehnički siguran način utisnuti i transportirati kroz mrežu prirodnog plina. Stoga se na temelju članka 1.2. ove Direktive može smatrati da se ona primjenjuje i na mješavine vodika i biometana u mreži prirodnog plin uz pridržavanje najviše dopuštenih koncentracija. Nadalje, Direktivom se potiče suradnja država članica radi promicanja regionalne i bilateralne sigurnosti te sigurnosti opskrbe. Kao što je navedeno i u Europskom zelenom planu, suradnja država članica je potrebna kako si se postigao cilj klimatske neutralnosti 2050. godine. Prema ovoj Direktivi, operatori transportnih sustava (OTS) moraju svake dvije godine podnositi desetogodišnji plan razvoja mreže regulatornom tijelu, a taj plan se mora temeljiti na postojećoj i pretpostavljenoj ponudi i potražnji.

- ***Uredba o uvjetima za pristup mrežama za transport prirodnog plina***

Uredba (EZ) br. 715/2009 utvrđuje nediskriminirajuća pravila za uvjete pristupa transportnim sustavima prirodnog plina, terminalima za UPP i skladištima plina pri čemu se vodi računa o nacionalnim i regionalnim značajkama tržišta (Uredba (EZ) br. 715/2009). Uredbom je utvrđeno da svi operatori transportnih sustava Europske unije surađuju putem Europske mreže operatora transportskih sustava za plin (engl. *European Network of Transmission System Operators for Gas – ENTSOG*). Na taj način teži se funkcioniranju unutarnjeg tržišta prirodnog plina i prekograničnoj suradnji te se osigurava upravljanje, rad i razvoj transportne mreže.

- ***Uredba o smjernicama za transeuropsku energetska infrastrukturu***

Uredbom br. 347/2013 utvrđene su smjernice za razvoj i interoperabilnost prioritetnih koridora i područja transeuropske energetske infrastrukture (engl. *Trans-European Energy Networks – TEN-E*) te se utvrđuju projekti od zajedničkog interesa i olakšava njihova provedba pojednostavnjenjem, bliskom koordinacijom i ubrzavanjem postupaka izdavanja dozvola te većim sudjelovanjem javnosti (Uredba (EU) br. 347/2013). Prioritetni plinski koridori su plinske interkonekcije između sjevera i juga zapadne Europe, interkonekcije između sjevera i juga srednjoistočne i jugoistočne Europe te južni plinski koridor, a planirano je međusobno povezivanje baltičkog energetskeg tržišta u području plina. Izrađene

su kategorije energetske infrastrukture za plin s ciljem provedbe prioriteta energetske infrastrukture, a to su: visokotlačni plinovodi za transport prirodnog plina i bioplina, podzemni skladišni objekti povezani s plinovodima, objekti za prihvata, skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina (UPP) i stlačenog prirodnog plina (SPP) te sva oprema ili instalacije potrebne za siguran rad sustava.

- ***Direktiva o uspostavi infrastrukture za alternativna goriva***

Kako bi se smanjila ovisnost o fosilnim gorivima i ublažili negativni utjecaji prometa na okoliš, 2014. godine je donesena *Direktiva o uvođenju infrastrukture za alternativna goriva* (Direktiva 2014/94/EU). Utvrđeni su osnovni zahtjevi za izgradnju punionica za električna vozila i mjesta za opskrbu UPP-om, SPP-om i vodikom. Stoga, svaka država članica Unije mora donijeti nacionalni okvir politika za razvoj tržišta alternativnih goriva u prometnom sektoru te za postavljanje potrebne infrastrukture. Države koje u svoje politike uključuju vodik, moraju do 31. prosinca 2025. godine osigurati raspoloživost odgovarajućeg broja mjesta za opskrbu vodikom. Izvješće o provedbi nacionalnih okvira države moraju podnositi svake 3 godine počevši od studenog 2019. godine.

- ***Uredba o uspostavi mrežnih pravila interoperabilnosti i razmjene podataka***

Uredbom (EU) 2015/703 uspostavljena su pravila interoperabilnosti i razmjene podataka te pravila rada transportnih sustava za plin, a primjenjuje se na točke spajanja plinovoda (Uredba Komisije (EU) 2015/703). Određene su obveze informiranja, pravila za nadzor protoka, mjerenje količine i kvalitete plina, pravila za postupak uparivanja i raspodjelu količina plina, kratkoročno i dugoročno praćenje kvalitete plina i druge odredbe.

- ***Uredba o uspostavljanju mrežnih pravila o usklađenim strukturama transportnih tarifa za plin***

Uredbom (EU) 2017/460 uspostavljen je mrežni kodeks kojim su utvrđena pravila o usklađenoj tarifi za transport plina, uključujući pravila o primjeni metodologije referentne cijene, pridružene zahtjeve za konzultacije i objave te izračun pričuvnih cijena za proizvode standardnih kapaciteta (Uredba Komisije (EU) 2017/460). Međutim, u Uredbi se ne predviđa primjenjivanje tarifne metodologije na vodikove mreže ili utiskivanje niskougličnih i obnovljivih plinova u postojeću plinsku mrežu.

- ***Direktiva o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora***

Sve veća uporaba energije iz obnovljivih izvora, važna je za postizanje energetske ciljeve EU-a, ali važna je i njihova uloga u promicanju sigurnosti opskrbe, održive energije po pristupačnim cijenama i tehnološkom razvoju. Važnost smanjenja emisija stakleničkih plinova i dekarbonizacija potaknuli su donošenje *Direktive (EU) 2018/2001 o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora*. Direktivom je postavljen obvezujući cilj da udio energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj konačnoj bruto potrošnji energije u 2030. godini bude najmanje 32 % (Direktiva (EU) 2018/2001). Istaknuto je da države članice mogu proširiti postojeću infrastrukturu plinske mreže radi uključivanja plina iz obnovljivih izvora.

- ***Direktiva o izmjeni Direktive 2009/73/EZ o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište prirodnog plina***

Direktiva (EU) 2019/692 donosi promjene u Direktivi 2009/73/EZ o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište prirodnog plina. Izmjene se odnose na prepreke dovršenju unutarnjeg tržišta prirodnog plina koje su posljedica izostanka primjene tržišnih pravila na transportnu mrežu prirodnog plina prema trećim zemljama i iz njih (Direktiva (EU) 2019/692). Međutim, u ovoj Direktivi donesene izmjene ne spominju dekarbonizirani ni niskougljični plin u mreži prirodnog plina.

- ***Uredba o osnivanju Agencije Europske unije za suradnju energetskih regulatora***

Uredbom (EU) 2019/942 osniva se Agencija Europske unije za suradnju energetskih regulatora (engl. *European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators – ACER*). Svrha Agencije je pomagati regulatornim tijelima na razini Europske unije u izvršavanju njihovih zadaća te koordinacija njihovog djelovanja (Uredba (EU) 2019/942). ACER osim sa regulatornim tijelima, surađuje sa operatorima transportnog i distribucijskog sustava, ENTSO-om za električnu energiju i za plin te Europskim parlamentom, Vijećem i Komisijom.

- ***Uredba o uspostavi Instrumenta za povezivanje Europe***

Uredbom br. 2021/1153 o uspostavi Instrumenta za povezivanje Europe (engl. *Connecting Europe Facility – CEF*) utvrđuju se ciljevi CEF-a, njegov proračun za razdoblje od 2021. do 2027. godine te oblici financiranja sredstvima EU-a i pravila pružanja tog financiranja (Uredba (EU) 2021/1153). Uzimajući u obzir dekarbonizaciju, opći cilj je izgradnja, razvoj, modernizacija i dovršetak transeuropskih mreža u energetskom, prometnom i digitalnom sektoru. Specifični ciljevi koji se odnose na energetske sektor

uključuju razvoj projekta od zajedničkog interesa te olakšavanje prekogranične suradnje uključujući i obnovljivu energiju. CEF ne isključuje suradnju trećih zemalja, ali one ne mogu dobiti financijsku pomoć temeljenu na ovoj Uredbi, osim ako je bitno za postizanje ciljeva određenog projekta od zajedničkog interesa.

3.2. Europske strategije koje potiču dekarbonizaciju

Europskim zelenim planom iz 2019. godine predstavljen je plan kojim će se Europska unija preobraziti u društvo s modernim, resursno učinkovitim, konkurentnim i održivim gospodarstvom s neto nula emisija stakleničkih plinova 2050. godine uz osiguravanje pravedne i uključive tranzicije. *Zelenim planom* se ističe da je integrirani energetska sustav ključan za postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine (COM, 2019). Način na koji bi se mogla provesti integracija sustava je uvođenje vodika iz obnovljivih izvora. Stoga su 8. srpnja 2020. godine donesene dvije strategije koje predstavljaju novi plan ulaganja u čistu energiju, a to su *Strategija Europske unije za integraciju energetske sustava* i *Strategija za vodik za klimatsku neutralnu Europu*.

- ***Strategija EU-a za integraciju energetske sustava***

Integracija energetske sustava odnosi se na koordinirano planiranje i rad energetske sustava u cjelini, uspostavljanjem snažnije veze između različitih nositelja energije, potrošačkih sektora i vrsta infrastrukture (COM, 2020b). Integracija je ključna za djelotvornu, troškovno učinkovitu i temeljnu dekarbonizaciju gospodarstva Europske unije, a obuhvaća 3 komplementarna koncepta.

Prvi koncept odnosi se na zaokruženi energetska sustav s energetska učinkovitošću u središtu. Na taj način će se smanjiti ukupni investicijski troškovi i potreba za proizvodnjom energije. Primjer ovog koncepta su koogeneracijska postrojenja za proizvodnju toplinske i električne energije te ponovna upotreba određenog otpada i ostataka.

Drugi koncept podrazumijeva povećanu izravnu elektrifikaciju sektora krajnje potrošnje. Budući da električna energija iz obnovljivih izvora postaje sve jeftinija, potrebno je povećavati upotrebu ovog oblika energije, osobito u sektorima koji su uvelike ovisni o fosilnim gorivima (promet, industrija, zgradarstvo) (Belamarić i Bošnjak, 2021).

Treći koncept uključuje sektore koje je teže dekarbonizirati (npr. teški prijevoz, industrija) te primjenu obnovljivih i niskougljičnih goriva (COM, 2020b). Plin iz obnovljivih izvora, tekuća goriva proizvedena iz biomase te vodik proizveden iz fosilnih goriva uz hvatanje ugljika i vodik proizveden korištenjem električne energije uz znatno smanjenje

emisija su rješenja za problem skladištenja energije iz varijabilnih obnovljivih izvora. Na taj bi način sektori električne energije, plina i krajnje potrošnje mogli međusobno surađivati.

Na putu ostvarenja klimatske neutralnosti, pretpostavlja se da će potrošnja električne energije znatno rasti. Prema ovoj Strategiji očekuje se da će se udio električne energije u finalnoj potrošnji povećati s trenutnih 23 % na oko 30 % u 2030. godini te na oko 50 % u 2050. godini. Potražnja će se morati zadovoljiti uglavnom električnom energijom iz obnovljivih izvora, a preostali dio energije bi trebao proizlaziti iz niskougljičnih rješenja. Do 2030. godine, udio obnovljive električne energije trebao bi iznositi 55 – 60 %, a do 2050. godine do 84 % (COM, 2020b).

Prema *Strategiji EU-a za integraciju energetske sustava*, cijena tehnologija za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora smanjuje se posljednjih nekoliko desetljeća, a predviđa se nastavak ovog trenda te se očekuju veća ulaganja tržišta. Potreba za sve većom potražnjom električne energije može se zadovoljiti postojećim tehnologijama proizvodnje električne energije iz solarne energije i energije vjetra, ali i odobalnom proizvodnjom iz energije vjetra čiji će potencijal do 2050. godine iznositi 0,3 – 0,45 TW, za razliku od današnjih 0,012 TW. Odobalna proizvodnja pruža mogućnost da se u njoj blizini postave elektrolizatori za proizvodnju vodika te postoji mogućnost korištenja postojeće infrastrukture iscrpljenih polja prirodnog plina što će olakšati razvoj solarne energije.

U Strategiji se navodi 38 mjera za ubrzan prelazak na čistu energiju pomoću integracije sustava. Mjere se odnose na bolju primjenu načela energetske učinkovitosti, izgradnju kružnijeg gospodarstva, osiguravanje rasta opskrbe električnom energijom iz obnovljivih izvora, predlaganje terminologije i certificiranja goriva iz obnovljivih izvora i niskougljičnih goriva, razmatranje mjera potpore za goriva iz obnovljivih izvora i niskougljičnih goriva te promicanje financiranja takvih projekata i razne druge mjere.

S obzirom na visoku cijenu i nepraktičnost dekarbonizacije izravnom elektrifikacijom i obnovljivom toplinom, bolje rješenje je primjena bioplina, biometana, sintetičkih goriva i vodika. Postojeća plinska mreža Europe dovoljnog je kapaciteta za integraciju plinova iz obnovljivih izvora i niskougljičnih plinova, dok bi prenamjena postojeće plinske infrastrukture za prijenos vodika iz obnovljivih izvora mogla biti povoljna u nekim slučajevima.

- ***Strategija za vodik za klimatski neutralnu Europu***

Kako je već pretpostavljeno u mnogim izvješćima i studijama, električna energija iz obnovljivih izvora bit će zaslužna za dekarbonizaciju velikog dijela potrošnje energije, međutim preostali dio bi mogao pokriti vodik. Prema *Europskom planu za zeleni vodik* (engl. *Hydrogen Roadmap Europe*) iz 2018. godine, predviđa se da će se udio vodika u europskom miks izvora energije povećati s oko 2 % na 13 – 14 % do 2050. godine (COM, 2020b).

Vodik koji će se proizvoditi korištenjem energije vjetra i solarne energije je prioritetan energent EU-a jer je dugoročno sukladan cilju klimatske neutralnosti, nultoj stopi onečišćenja i u skladu je integriranim energetske sustavom. S druge strane, za ubrzano smanjenje emisija iz postojeće proizvodnje vodika i poticanje prihvaćanja vodika iz obnovljivih izvora u bliskoj budućnosti, potrebni su drugi načini proizvodnje vodika koji potječu iz fosilnih goriva uz hvatanje ugljika te vodika proizvedenog korištenjem električne energije uz znatno manje emisija stakleničkih plinova.

Strategija za vodik za klimatski neutralnu Europu predviđa implementaciju vodika kroz tri faze (COM, 2020b). Prva faza traje od 2020. do 2024. godine, a cilj je postavljanje elektrolizatora za proizvodnju vodika iz obnovljivih izvora minimalne snage 0,006 TW te proizvodnja do 1 milijun tona vodika (oko 33 TWh) iz obnovljivih izvora. Na taj način bi se dekarbonizirala postojeća proizvodnja vodika i olakšalo prihvaćanje vodika za nove krajnje primjene. Infrastruktura za transport vodika neće biti potrebna jer će se vodik upotrebljavati blizu mjesta proizvodnje, a u određenim područjima se može miješati s prirodnim plinom. Međutim, potrebno je tijekom prve faze implementacije vodika započeti s planovima infrastrukture za vodik.

Na kraju druge faze, koja bi trajala od 2025. do 2030. godine, Europska unija bi trebala imati elektrolizatore minimalne snage od 0,04 TW te ostvariti proizvodnju od 10 milijuna tona vodika (oko 333 TWh) iz obnovljivih izvora. Osim toga, u ovoj fazi vodik bi trebao postati dio integriranog energetske sustava i cjenovno konkurirati drugim načinima proizvodnje vodika. Vodik iz obnovljivih izvora bit će važan za pretvorbu električne energije iz obnovljivih izvora u vodik, na mjestima gdje je ona obilna i jeftina te će se ostvariti uravnoteženje i fleksibilnost elektroenergetskog sustava.

Posljednja, odnosno treća faza trajala bi od 2030. do 2050. godine kada bi se usavršila proizvodnja vodika iz obnovljivih izvora energije, a vodik bi se široko primjenjivao u sektorima u kojima su drugi načini dekarbonizacije skupi ili nemogući. Potrebno je znatno povećati proizvodnju obnovljive električne energije jer se predviđa da bi se do 2050. godine četvrtina te energije koristila za proizvodnju vodika.

S obzirom na raznoliku primjenu vodika te nužnost dekarbonizacije i hitno smanjenje emisija, vodik privlači sve veću pažnju Europe i svijeta. Dakle, prema *Strategiji za vodik za klimatski neutralnu Europu*, vodik je neizbježan za ostvarenje cilja klimatske neutralnosti do 2050. godine.

3.3. Prijedlozi Europskog parlamenta i Vijeća

- ***Prijedlog Uredbe o smjernicama za transeuropsku energetska infrastrukturu***

Uredba o transeuropskoj energetska infrastrukturi donesena je 2013. godine, međutim zbog modernizacije energetska sustava i proširenja energetska infrastrukture, u prosincu 2020. godine je objavljen je *Prijedlog Uredbe Europskog parlamenta i Vijeća o smjernicama za transeuropsku energetska infrastrukturu i stavljanju izvan snage Uredbe (EU) br. 347/2013*. S obzirom na ambiciozne ciljeve Europske komisije koji su istaknuti u *Europskom zelenom planu* te paketom *Čista energija za sve Europljane* i *Pariškim sporazumom*, uvidjela se potreba za promjenama. Predloženom Uredbom utvrđuju se smjernice za razvoj prioriteta koridora i područja pri čemu se pridonosi klimatskim i energetska ciljevima do 2030. godine, odnosno klimatska neutralnosti do 2050. godine (COM, 2020c). Osim toga, dodane su kategorije energetska infrastrukture za pametne plinske mreže i za vodik te za objekte za elektrolizu, umjesto prijašnje kategorije za prirodni plin. Kategorije pametne plinske mreže uključuju opremu i instalacije kojima je cilj integracija obnovljivih i niskougljičnih plinova u mrežu. Kategorija vodika u obzir uzima infrastrukturu koja može biti nova ili se može koristiti prenamijenjena infrastruktura prirodnog plina, a kategorija objekata za elektrolizu uključuje elektrolizatore i pripadajuću opremu.

- ***Prijedlog Uredbe o uvođenju infrastrukture za alternativna goriva***

Provedbom Direktive 2014/94/EU došlo je do određenog napretka po pitanju infrastrukture za alternativna goriva u Europska uniji, ali ne postoji obvezujuća metodologija kojom će države članice određivati ciljeve i donositi mjere jer se obično razlikuju nacionalne ambicije za postizanje određenih ciljeva i politike koje se na njih odnose. Europska Komisija je utvrdila da Direktiva 2014/94/EU nije u skladu s ciljevima koji se žele postići do 2030. godine te da je infrastruktura za alternativna goriva neravnomjerno raspodijeljena. Cilj *Prijedloga Uredbe o uvođenju infrastrukture za alternativna goriva*, objavljenog u srpnju 2021. godine, je osiguravanje dostupnosti široko rasprostranjene infrastrukture za alternativna goriva kako bi se omogućilo jednostavno kretanje autocestama, lukama i

zračnim lukama na području EU-a (COM, 2021b). Prijedlogom su utvrđene tehničke specifikacije i zahtjevi za informiranje korisnika, pružanje podataka i plaćanja vezanih za infrastrukturu za alternativna goriva. Donošenjem obvezujućih nacionalnih ciljeva, pravila za nacionalne okvire te uspostavljanjem mehanizma za izvješćivanje kako bi se potaknula suradnja i pratio napredak, olakšat će se postizanje ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova u prometnom sektoru.

- ***Prijedlog Direktive o zajedničkim pravilima za unutarnja tržišta obnovljivih i prirodnih plinova te vodika***

Trenutni regulatorni okvir za plinovite prijenosnike energije EU-a ne bavi se primjenom vodika kao neovisnog energenta, ne postoje pravila o ulaganjima u vodikove mreže i upravljanju njima, niti postoje pravila o kvaliteti vodika. Stoga je potrebno riješiti ove i brojne druge nedostatke kako bi se postigli ambiciozni ciljevi Europske unije do 2030. godine, odnosno do 2050. godine. U prosincu 2021. godine objavljen je *Prijedlog Direktive Europskog parlamenta i Vijeća o zajedničkim pravilima za unutarnja tržišta obnovljivih i prirodnih plinova te vodika* (COM, 2021a). Cilj ove Direktive je olakšati uvođenje i primjenu obnovljivih plinova i plinova s niskim udjelom ugljika u energetske sustav. Utvrđena su pravila za transport, opskrbu i skladištenje prirodnog plina te prelazak sustava prirodnog plina na sustav koji se temelji na obnovljivim i niskougljičnim plinovima. Isto tako, utvrđena pravila odnose se na vodik te na uspostavu vodikovog sustava u cijeloj Europskoj uniji koji će doprinijeti smanjenju emisija u sektorima koje je teško dekarbonizirati.

3.4. Desetogodišnji plan razvoja mreže

Uredbom (EU) 715/2009 zahtjeva se da ENTSOG razvija desetogodišnje planove razvoja mreže (engl. *Ten Year Network Development Plan – TYNDP*) na dvogodišnjoj bazi. TYNDP prikazuje europsku plinsku infrastrukturu i budući razvoj plinske infrastrukture te konstruira integriranu plinsku mrežu prema nizu scenarija. Prema *TYNDP 2020* utvrđeno je da plinska infrastruktura može podržati postupno ukidanje ugljično intenzivnih goriva u sektorima industrije i prometa te u energetske sektoru. Međutim, potrebna su znatna ulaganja u dekarbonizaciju i prenamjenu infrastrukture.

Prema Uredbi (EU) 347/2013 projekti od zajedničkog interesa koji se uvrštavaju u kategorije energetske infrastrukture iz Priloga II. Ove Uredbe, moraju biti u okviru

najnovijeg Desetogodišnjeg plana razvoja mreže koji je izradio ENTSOG. Uvidjevši potrebu prilagodbe plinske infrastrukture kako bi se omogućilo utiskivanje dekarboniziranih plinova u TYNDP iz 2020. godine predstavljeni su projekti energetske tranzicije (engl. *Energy Transition – ETR*). ETR projekti namijenjeni su poboljšanju transparentnosti i pružanju informacija o energetske tranziciji sa aspekta infrastrukture. U izvješću *TYNDP 2020* projekti energetske tranzicije čine oko 30 % ukupnog broja projekata, odnosno 68 projekata od kojih se većina odnosi na vodik i sintetički metan (44 projekta) te na razvoj biometana (7 projekata) (ENTSOG, 2020a).

Kako bi energetske sustav postao klimatski neutralan, potrebna je suradnja plinskog i energetske sektora (ENTSOG, 2020b). Plinu je potrebna velika količina električne energije iz obnovljivih izvora za proizvodnju velikih količina zelenog vodika, što je predviđeno europskim strategijama koje potiču dekarbonizaciju. S druge strane, elektroenergetskom sustavu su potrebni vodik i biometan kako bi se podupirao razvoj značajnih kapaciteta varijabilne proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Stoga su ENTSOG i ENTSO-E (engl. *European Network of Transmission System Operators for Electricity –* Europska mreža operatora prijenosnog sustava za električnu energiju) u listopadu 2021. godine objavili treće izdanje zajedničkog izvješća scenarija za plin i električnu energiju *TYNDP 2022*.

Naime, za postizanje neto nula emisija stakleničkih plinova do 2050. godine potrebne su tehnologije dekarbonizacije i obnovljivih izvora, što uključuje transportnu infrastrukturu koja je potrebna za povezivanje područja velikog potencijala obnovljivih izvora energija s mjestima velike potražnje te je potrebno proširenje energetske infrastrukture. U izvješću *TYNDP 2022* je istaknuta važnost integracije infrastrukture električne energije, metana i vodika, što će pružiti brojne mogućnosti kratkoročne i sezonske potrebe za fleksibilnošću energetske sustava (ENTSO-E i ENTSOG, 2021). Smatra se da će razvoj vodika i sintetičkih goriva potaknuti daljnji razvoj električne energije iz vjetra i sunca. Međutim, smatra se da je vodik ključan i za plinski i za energetske sustav. Razlozi tomu su što vodik može efikasno doprinijeti prelasku na ugljični neutralan i integrirani sustav, može poduprijeti puni potencijal obnovljivih izvora električne energije i jačanje sigurnosti opskrbe.

3.5. Jamstvo o podrijetlu

Direktivom (EU) 2018/2001 nastoji se potaknuti primjena energije iz obnovljivih izvora energije te je utvrđeno da države članice EU-a moraju osigurati da se podrijetlo te energije

može zajamčiti u skladu s objektivnim, transparentnim i nediskriminirajućim kriterijima (Direktiva (EU) 2018/2001). Stoga se na zahtjev proizvođača izdaje *Jamstvo o podrijetlu* (engl. *Guarantee of Origin – GO*), odnosno elektronički dokument čija je namjena dokazati krajnjem korisniku da je određeni udio ili količina energije proizvedena iz obnovljivih izvora.

Europski sustav energetske certifikata (engl. *European Energy Certificate System – EECS*) osigurava pouzdan rad međunarodnih shema certifikata koje zadovoljavaju kriterije objektivnosti, transparentnosti i troškovne učinkovitosti kako bi se olakšala međunarodna razmjena jamstva o podrijetlu (AIB, 2022). EECS certifikati mogu se izdavati za različite svrhe, odnosno mogu biti vezani za zakonski okvir (nacionalni sustav potpore i jamstva o podrijetlu) ili mogu biti izvan zakonskog okvira (nevladine potpore). Nevladini certifikati (engl. *Non-Governmental Certificates – NGC*) imaju sličnu ili identičnu strukturu kao *Jamstva o podrijetlu* te omogućuju certificiranje koje nije definirano zakonskim okvirom, a primjer takvog načina certificiranja je *CertifHy*.

CertifHy je sustav elektroničkih certifikata jamstva o podrijetlu (u daljnjem tekstu: *CertifHy GO*) koji dokazuje da je određena količina vodika proizvedena registriranim uređajem za proizvodnju specifične kvalitete i načina proizvodnje (*CertifHy*, 2022). *CertifHy GO* se čuvaju u središnjoj bazi podataka *Registru CertifHy* te se primjenjuju u Europi. Razlikuju se dvije oznake *CertifHy* jamstva o podrijetlu, a to su *CertifHy zeleni vodik* i *CertifHy vodik iz neobnovljivih izvora energije*. *CertifHy zeleni vodik* se dodjeljuje za vodik koje je proizveden iz obnovljivih izvora energije, odnosno iz energije vjetra, solarne energije, hidroenergije i biomase. *CertifHy vodik iz neobnovljivih izvora energije* se odnosi na vodik koji je proizveden nuklearnom energijom ili fosilnom energijom uz CCS ili CCU (engl. *Carbon Capture and Utilisation – hvatanje i korištenje vodika*) tehnologiju. Izdavanjem *CertifHy* jamstva o podrijetlu promiče se održiva proizvodnja vodika za primjenu u transportnom sektoru, zgradarstvu te za proizvodnju električne energije.

U tijeku je projekt REGATRACE (engl. *Renewable Gas Trade Centre in Europe*) kojemu je cilj stvaranje učinkovitog trgovinskog sustava za izdavanje i trgovanje jamstvima o podrijetlu za biometan i obnovljive plinove (Regatrace, 2022). U suradnji s nacionalnim registrima za obnovljivi plin potrebno je razviti skup usklađenih europskih pravila, propisa, postupaka i zahtjeva za izdavanje jamstva o podrijetlu za biometan, odnosno obnovljivi plin. Tu će ulogu imati Europski registar obnovljivog plina (engl. *European Renewable Gas Registry – ERGaR*) koji će uspostaviti mrežu nacionalnih tijela za izdavanje dozvola i utvrditi pravila za sudjelovanje u sustavu. Udruga izdavaateljskih tijela (engl. *Association of*

Issuing Bodies – AIB) uspostaviti će jamstva o podrijetlu za različite tehnologije obnovljivih plinova i razviti određene standarde provjere. U projektu REGATRACE sudjeluje 15 organizacija iz 10 država pri čemu svaka ima svoju ulogu i doprinos, što će doprinijeti razvoju tržišta za biometan i druge obnovljive plinove u Europi te odvajanju energetske sustava od fosilnih goriva.

4. PRIRODNI PLIN I PLINSKI TRANSPORTNI SUSTAV EUROPSKE UNIJE

Transportna mreža prirodnog plina u Europi duljine je oko 200 000 km, a duljina distribucijske mreže je višestruko dulja (Hydrogen Europe, 2021). Uz to, postoje cjevovodi ukupne duljine oko 10 000 km koji služe za transport tvari poput nafte, kerozina, vodika, etilena i dušika te su uglavnom u privatnom vlasništvu (npr. povezuju rafinerije nafte s petrokemijskim i srodnim industrijama). U nekim dijelovima Europe postoji dvostruka plinska mreža za plin s niskim i visokim kalorijskim vrijednostima jer se zbog tehničkih razloga i određenih propisa ova dva tipa plina moraju transportirati u odvojenim sustavima (Koonaphapdeelert et al, 2020). Plin niže kalorijske vrijednosti (L-plin) je plin iz plinskog polja Groningen u Nizozemskoj, a koristi se u Nizozemskoj, Belgiji, Francuskoj i Njemačkoj (Hydrogen Europe, 2021). Plin više kalorijske vrijednosti (H-plin) potječe iz Ujedinjenog Kraljevstva, Norveške, Rusije, Alžira te iz uvoza ukapljenog prirodnog plina. Budući da Nizozemska nastoji zaustaviti proizvodnju niskokaloričnog plina do 2022. godine, u tijeku su rasprave o prenamjeni plinske mreže.

4.1. Kvaliteta plina

Uredbom br. 2015/703 o uspostavi mrežnih pravila interoperabilnosti i razmjeni podataka ističe se potreba za uspostavljanjem standardne kvalitete plina u Europi. Europski odbor za normizaciju (engl. *European Committee for Standardization – CEN*) je u prosincu 2015. godine donio neobvezujući europski standard kvalitete plina klasificiran u skupinu H, EN 16726:2015, a u tablici 4-1. su prikazani zahtjevi standarda (ENTSOG, 2016).

Tablica 4-1. Parametri standardne kvalitete plina prema CEN-u (ENTSOG, 2016)

		CEN
Kemijski sastav, mol%		
Ugljični dioksid (CO ₂)	max.	2,5 – 4 % mol/mol
Kisik (O ₂)	max.	10 ppm – 4 % mol/mol
Sadržaj sumpora, mg/m³		
Sumpor ukupni (S)	max.	30
Sumporovodik i karbonil sulfid ukupno (H ₂ S + COS)	max.	5
Merkaptani (RSH)	max.	6
Relativna gustoća, d	min.	0,555
	max.	0,70
Točka rosišta, °C (pri 70 bar)		
vode	max.	-8
ugljikovodika	max.	-2
Metanski broj	min.	65

Budući da se plinski sektor usmjerava prema niskougljičnim i obnovljivim plinovima, OTS-ovi razmatraju na koje načine prilagoditi postojeću plinsku mrežu većim udjelima biometana i vodika u sustavu (ENTSOG, 2018). Prijelaz s prirodnog plina na obnovljive i niskougljične plinove imat će utjecaja na kvalitetu plina jer standardi kvalitete plina mogu ograničiti kapacitet utiskivanja novih plinova.

Glavni parametri kvalitete plina su ogrjevna vrijednost, metanski broj i Wobbe indeks među kojima postoji zavisna veza. Ogrjevna vrijednost je termodinamička veličina koja predstavlja oslobođenu toplinsku energiju pri izgaranju samog prirodnog plina, a koju je moguće koristiti u bilo kojem toplinskom stroju (Krsnik i Pavlović, 2020). Razlikujemo donju i gornju ogrjevnu vrijednost plina. Gornja ogrjevna vrijednost (Hg) je količina topline koja nastaje potpunim izgaranjem jedinične količine goriva, pri tome se dimni plinovi ohlade na temperaturu od 25 °C te se vodena para izlučuje kao kondenzat (Strelec et al, 2001). Donja ogrjevna vrijednost (Hd) razlikuje se od gornje ogrjevne vrijednosti po tome što, nakon izgaranja, vodena para ostaje u dimnim plinovima te toplina kondenzacije nije iskorištena.

Wobbe indeks je omjer (gornje) ogrjevne vrijednosti i korijena relativne gustoće te je pokazatelj međusobne zamjenjivosti plinova na temelju fizikalnih parametara (Krsnik i Pavlović, 2020). Plinska tržišta Europske unije imaju određene različite raspone Wobbe indeksa, ali Europska unija teži propisivanju jedinstvenog standarda kvalitete plina za sve države članice.

Metanski broj (MB) je pokazatelj kvalitete plina po kriteriju otpornosti prema pojavi detonacije u plinskim motorima, a ovisi o omjeru vodika i ugljika u sastavu plina (Krsnik i Pavlović, 2020). Budući da metan ima visok stupanj otpornosti prema detonaciji njegov MB iznosi 100, dok vodik ima iznimno nizak stupanj otpornosti prema detonaciji pa je njegov MB jednak nuli. Većina smjesa prirodnog plina ima MB veći do 70. Dakle, ako je metanski broj iznimno nizak, veća je vjerojatnost pojave detonacije i manja je efikasnost rada plinskog motora.

4.1.1. Utjecaj utiskivanja vodika na kvalitetu plina

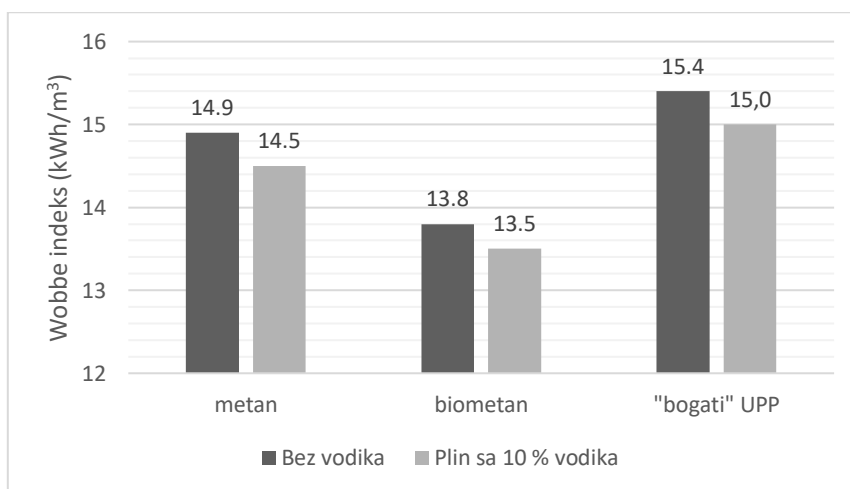
Mogućnost utiskivanja vodika u mrežu prirodnog plina predmet je mnogih istraživanja kako bi se utvrdio utjecaj utiskivanja vodika na kvalitetu plina. Različite vrste plinova trebaju imati slične vrijednosti Wobbe indeksa (WI), ogrjevne vrijednosti (Hg) i metanskog broja (MB) kako bi se slično ponašali tijekom procesa izgaranja (Krsnik i Pavlović, 2020). U tablici 4-2. prikazane su vrijednosti glavnih parametara kvalitete plina za prirodni plin,

vodik i ukapljeni prirodni plin (UPP) pri referentnim uvjetima koji podrazumijevaju temperaturu izgaranja 15 °C i temperaturu plina 15 °C.

Tablica 4-2. Usporedba parametara kvalitete prirodnog plina, vodika i ukapljenog prirodnog plina (Krsnik i Pavlović, 2020)

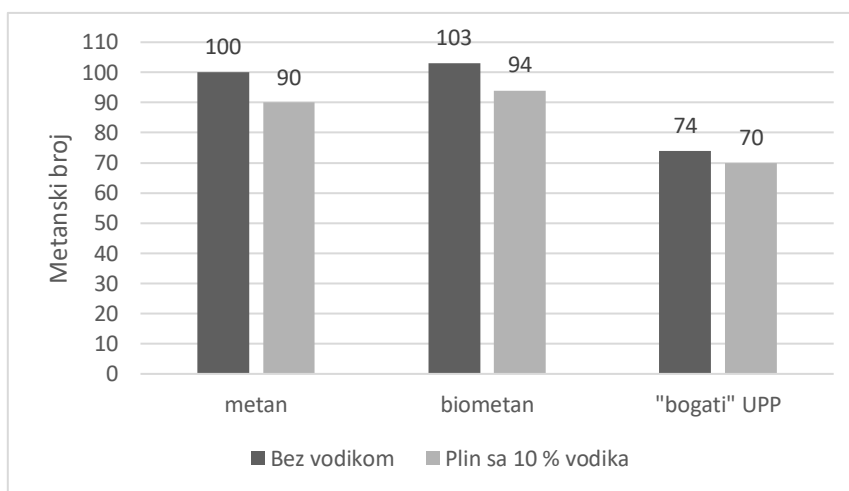
Parametri kvalitete plina	PRIRODNI PLIN	VODIK	UPP
Hg (kWh/m ³)	11,00	3,36	11,46
WI (kWh/m ³)	14,09	12,74	14,54
Relativna gustoća	0,6114	0,0696	0,6212
Metanski broj	78	0	73

Istraživanjem iz 2013. godine, o utjecaju miješanja 10 % vodika s čistim metanom, biometanom i „srednje bogatim“ UPP dobiveni su zanimljivi rezultati (Altfeld i Pinchbeck, 2013). Sastav biometana čine 96 % metan i 4 % ugljični dioksid, dok „srednje bogati“ UPP čine 92 % metan, 5 % etan, 2 % propan i 1 % butan. Plinovi sa istim Wobbe indeksom proizvode jednako toplinsko opterećenje u plemeniku te je potrebno usporediti vrijednosti WI kod ispitivanih plinova. Dakle, prema slici 4-1. je vidljivo da veće varijacije Wobbe indeksa imaju različite vrste plinova, nego isti plinovi koji u svom sastavu imaju 10 % vodika. Međutim, biometan već ima prilično nizak WI koji iznosi oko 13,8 kWh/m³, a dodavanjem vodika se dodatno smanjuje, zbog čega bi se moglo onemogućiti utiskivanje ove mješavine u lokalnu plinsku mrežu.



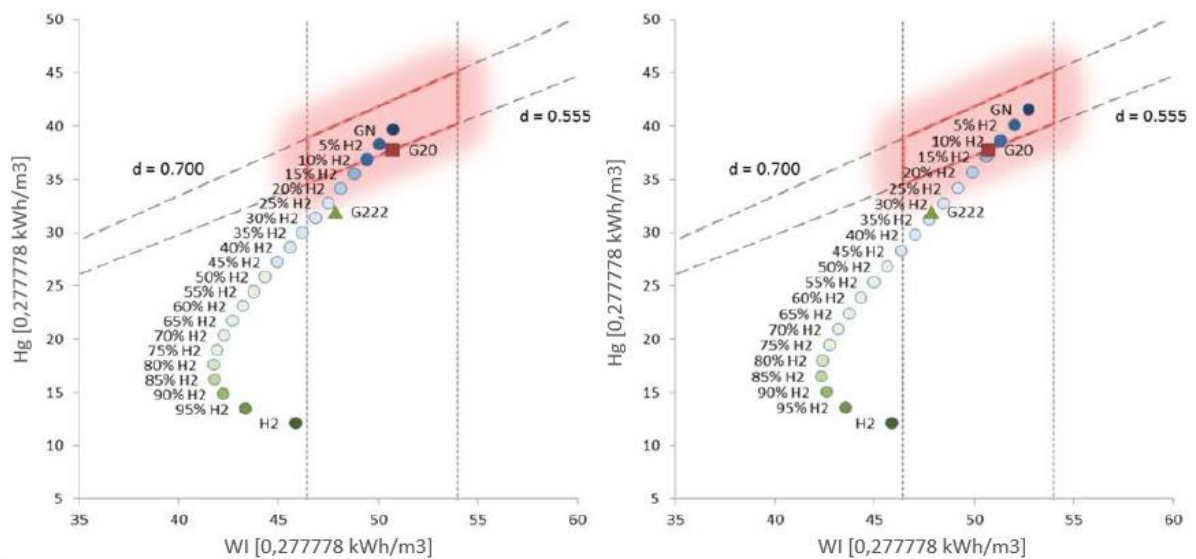
Slika 4-1. Vrijednosti Wobbe indeksa u različitim plinovima bez i sa 10 % vodika u smjesi plina (Altfeld i Pinchbeck, 2013)

Metanski broj opisuje detonaciju gorivih plinova u motorima s unutarnjim izgaranjem i snažno ovisi o specifičnom sastavu plina, osobito o količinama viših ugljikovodika (propan, butan, pentan) i vodika u gorivom plinu (Altfeld i Pinchbeck, 2013). Kako je već istaknuto, MB čistog metana je 100, čistog vodika je 0, a „bogatog“ UPP-a 65 – 70. Prema slici 4-2. može se zaključiti slično kao i za Wobbe indeks, odnosno veće su varijacije metanskog broja kod različitih plinova bez dodavanja vodika nego prilikom dodavanja 10 % vodika. Međutim, ukoliko plin već ima nizak metanski broj (npr. „bogati“ UPP) tada dodavanje 10 % vodika može rezultirati neprihvatljivo niskim metanskim brojem.



Slika 4-2. Vrijednosti metanskog broja u različitim plinovima bez i sa 10 % vodika u smjesi plina (Altfeld i Pinchbeck, 2013)

Promjene Wobbe indeksa i gornje ogrjevne vrijednosti u smjesi vodika i prirodnog plina prikazane su na slici 4-3. Rezultati su dobiveni dodavanjem različitih koncentracija vodika u prirodni plin, odnosno ukapljeni prirodni plin. Pri koncentracijama 15 – 20 % vodika u smjesi dolazi do većih promjena u kvaliteti plina, odnosno relativna gustoća plina je manja od minimalno dozvoljene vrijednosti koja iznosi 0,555. Međutim, dodavanjem do 10 % vodika nema bitnog utjecaja na promjenu kvalitete plina te je vrijednost relativne gustoće plina između 0,555 i 0,7. U smjesi prirodnog plina s 10 % vodika iznos ogrjevne vrijednosti je 10,27 kWh/m³ i Wobbe indeksa 13,75 kWh/m³, dok će smjesa ukapljenog prirodnog plina s istim udjelom vodika imati iznos ogrjevne vrijednosti 10,56 kWh/m³ i Wobbe indeksa 14,31 kWh/m³.



Slika 4-3. Utjecaj dodavanja različitih količina vodika na gornju ogrjevnu vrijednost i Wobbe indeks za prirodni plin (lijevo) i ukapljeni prirodni plin (desno) (Krsnik i Pavlović, 2020)

4.1.2. Čistoća biometana i vodika

Standarde čistoće biometana određuje pojedina država, pri tome biometan treba imati visoki stupanj čistoće kako bi mogao sigurno izgarati na krajnjoj lokaciji upotrebe, a CEN nastoji uvesti europski standard za utiskivanje biometana u plinsku mrežu (Koonaphapdeelert et al, 2020). Svojstva biometana poput kalorijske vrijednosti, količine metana, Wobbe indeksa, relativne gustoće i sadržaja CO₂, određuju nacionalne vlade pojedinih država. Kada se postigne određeni udio metana, tada se biometan može sigurno utiskivati u nacionalnu mrežu prirodnog plina. Obično je najmanji udio metana u biometanu 85 %, što je vidljivo u tablici 4-3. koja prikazuje minimalni udio metana (CH₄) prema zahtjevima pojedinih europskih država.

Tablica 4-3. Minimalni udio metana u toku biometana za pojedine europske države (Koonaphapdeelert et al, 2020)

Komponenta	Austrija	Francuska	Belgija	Češka
CH ₄	≥ 96%	≥ 86%	≥ 85%	≥ 95%
	Nizozemska	Švedska	Švicarska	
CH ₄	≥ 85%	≥ 97 %	≥ 96 %	

Dva čimbenika ukazuju na to da je čistoća biometana, odnosno udio metana > 85% poželjan (Koonaphapdeelert et al, 2020). Prvi čimbenik se odnosi na Wobbe indeks koji je pokazatelj zamjenjivosti plina, a često se definira u specifikacijama za opskrbu i transport

plina, pri čemu se plinovi sa sličnim WI mogu koristiti istom opremom. Europska udruga za racionalizaciju razmjene energije (engl. *European Association for the Streamlining of Energy Exchange – EASEE*) je predložila raspon Wobbe indeksa od 13,60 do 15,81 kWh/m³, kako bi se poboljšala interoperabilnost plinovoda na prekograničnim točkama. Predloženi raspon odgovara relativnoj gustoći 0,55 – 0,7 koja je u rasponu gustoće biometana koji sadrži 85 – 100 % metana. Drugi čimbenik je toplinska vrijednost plina, odnosno niža toplinska vrijednost znači da je potrebno dulje vrijeme za zagrijavanje krajnjeg proizvoda te nezadovoljstvo krajnjih kupaca. Zbog toga se predlaže visok udio metana u smjesi biometana.

Za utiskivanje vodika u mrežu prirodnog plina ili prenamijenjene cjevovode, potrebno je u obzir uzeti čistoću vodika koja je određena čimbenicima na strani ponude i potražnje. Prenamijenjeni cjevovodi ne mogu se koristiti za vodik čistoće 99,999 %, ali je malo vjerojatno da će takva čistoća biti potrebna na razini transporta. Čistoća vodika proizvedenog reformiranjem metana je 97,5 – 98,5 %, a vodik proizveden u AEL i PEM elektrolizatoru je čistoće 99,999 %. Međutim, potrebno je odrediti kvalitetu i čistoću vodika za transport cjevovodima u Europi kako bi transportna mreža bila interoperabilna (Gas for Climate, 2020b).

Zbog razlika u kemijskom sastavu prirodnog plina i vodika, potrebno je promotriti strukturni integritet. Problem predstavljaju vodikovi atomi koju mogu uzrokovati smanjenje integriteta čeličnih cjevovoda, odnosno dolazi do krhkosti uzrokovane vodikom i stvaranja pukotina u čeliku (The world of hydrogen, 2022). Međutim, vodik kao plin sastoji se od molekula vodika koje se ne mogu apsorbirati kao atomi u čeliku. Do apsorpcije dolazi samo ako je površina čelika čista te se molekula vodika razgradi na atome vodika i dovodi do krhkosti. Važne su redovite provjere širine pukotina na cijevima i održavanje stabilnih tlakova kako bi se spriječilo početno stvaranje pukotina (Gas for Climate, 2020b). Idealno rješenje ovisi o cjevovodu, odnosno o transportnim kapacitetima, stanju postojećih cjevovoda te kapitalnim i operativnim troškovima.

4.2. Ključne komponente plinskog transportnog sustava

Infrastruktura za transport prirodnog plina sastoji se nekoliko ključnih komponenti, a to su (Gas for Climate, 2020b):

- cjevovodi koji služe za transport plina,
- ventili koji omogućuju sigurnu dnevnu funkcionalnost i radove na održavanju,

- kompresorske stanice koje osiguravaju transport plina kroz cjevovode pri određenom tlaku,
- mjerne stanice koje omogućuju operatorima transportnih sustava da prate i mjere količine plina te upravljaju plinskim sustavom,
- gradske regulacijske stanice u distribucijskim sustavima.

Ovisno o potencijalu opskrbe i potražnji za prirodnim plinom, biometanom i vodikom, funkcije plinske mreže će se morati prenamijeniti u skladu s izborom tehnologija pojedinih država članica Europske unije.

4.2.1. Transportni cjevovodi i ventili

Većinu plinske infrastrukture čine cjevovodi koji služe za transport plina od mjesta proizvodnje do industrijskih kupaca i distribucijskih mreža (Gas for Climate, 2020b). Europski transportni cjevovodi su promjera 406,4 – 1422,4 mm (16" – 56") i rade na tlakovima 16 – 100 bar.

Istraživanja koja su proveli europski operatori transportnog sustava, u svrhu prvih projekata za vodik, pokazala su da se cjevovodi za vodik ne razlikuju bitno od cjevovoda za prirodni plin. Prema procjenama OTS-ova, kapitalni trošak novoizgrađenog cjevovoda za vodik mogao bi biti 10 – 50 % skuplji od novoizgrađenog cjevovoda za prirodni plin, a ovisi o regiji u kojoj se gradi i dimenzijama cijevi koje se ugrađuju (Gas for Climate, 2020b).

Na već postojećim cjevovodima za prirodni plin potrebne su modifikacije da bi se mogli koristiti za transport čistog vodika. Kapitalni trošak prenamjene predstavljao bi 10 – 25 % troškova izgradnje novih cjevovoda namijenjenih za transport vodika (Gas for Climate, 2020b). Glavni proces koji se provodi za prenamjenu cjevovoda je pročišćavanje dušikom. Postupak se provodi kako bi se uklonili neželjeni dijelovi, pratile potencijalne pukotine duž cjevovoda i zamijenili ventili koji su duže vrijeme u funkciji.

Položaji ventila duž linije cjevovoda ovise o lokaciji, a obično su razmaci između ventila 8 – 30 km. Glavni ventili su otvoreni, dopuštaju slobodan protok plina i zaustavljaju protok u slučajevima potrebe. Ventili se koriste da bi se izolirao dio cjevovoda i smanjilo gubljenje plina kada dođe do oštećenja ili kvara na cijevima. Iako su u tijeku istraživanja o ventilima prilikom prenamjene cjevovoda, očekuje se da će ovisno o regiji, biti potrebna djelomična zamjena ventila i brtvi ili potpuna zamjena opreme kako ne bi došlo do istjecanja plina.

4.2.2. Kompresorske stanice

Razlika tlaka unutar cjevovoda je potrebna da bi se osigurao protok plina. Tlak koji je potreban za transport plina ovisi o gubitku trenja, elevaciji, tlaku u cijevi (na strani potražnje) i svojstvima fluida koji se transportira. Kako bi se osiguralo da je vodik u cjevovodu pod tlakom i kontrolirao pad tlaka, potrebna je kompresija plina duž cjevovoda koji omogućuje kompresorska stanica. Kapacitet kompresora i udaljenost između kompresorskih stanica ovisi o karakteristikama plinske mreže i medija koji se transportira (Gas for Climate, 2020b).

Razlikuju se dvije vrste kompresora – klipni i centrifugalni. Klipni imaju klipni pogon te plin koji je utisnut u cilindar se komprimira jer klipovi smanjuju volumen u cilindru. Centrifugalni kompresori rade na način da pretvaraju kinetičku energiju radijalnih lopatica u energiju tlaka za stvaranje tlaka plina.

Ogrjevna vrijednost vodika je tri puta manja od ogrjevnosti prirodno plina. Da bi se povećao kapacitet vodika u plinskoj mreži, potrebna je približno tri puta veća pogonska snaga, a time i veći broj turbina i kompresora nego u radu s prirodnim plinom. Za transportne kapacitete do 750 000 m³/h, suvremeni klipni kompresori su najekonomičnije rješenje, dok su za transportne kapacitete iznad 750 000 m³/h, potrebni turbo-kompresori (Siemens, 2020).

Kod transporta vodika očekuju se puno veći napori za kompresiju, a razlog je mala molarna masa vodika i veliki volumni protok. Različiti operatori transportnih sustava i proizvođači opreme kompresora imaju različite stavove o utjecaju velikih napora kompresije, jedni smatraju da je potrebna nadogradnja postojećih kompresorskih stanica, dok drugi vide potrebu za novima jer postojeće nisu prikladne za veće količine vodika (The world of hydrogen, 2022).

4.2.3. Mjerne i ulazne regulacijske stanice

Kako bi operatori transportnih sustava mogli pratiti, upravljati i obračunavati plin u cjevovodima, mjerne stanice se postavljaju na ulaznim, izlaznim i prekograničnim mjestima. Podaci o plinu su vrlo bitni jer male greške prilikom mjerenja protoka u cjevovodima velikog kapaciteta mogu dovesti do velikih financijskih gubitaka za vlasnika ili kupca plina. Budući da je kemijski sastav vodika drugačiji u odnosu na prirodni plin ili metan, potrebno je prilagoditi mjernu opremu i to obično predstavlja mali dio ukupnih troškova infrastrukture (Gas for Climate, 2020b).

Plin koji je potreban za krajnju primjenu dovodi se do regulacijske stanice i ulaza u distributivni sustav. Njihova je uloga mjerenje plina i regulacija tlaka s vrijednosti u

transportnom sustavu na vrijednost tlaka u distribucijskom sustavu. Tijekom procesa redukcije tlaka dolazi do Joule-Thompsonovog efekta u plinovima, pri čemu promjena tlaka dovodi do promjene temperature. Temperatura prirodnog plina se smanjuje oko 0,5 °C/bar kada se smanji tlak, dok je kod vodika prisutan obrnuti Joule-Thompsonov efekt te Joule-Thompsonov koeficijent iznosi oko 0,0355 °C/bar (Gas for Climate, 2020b). Dakle smanjenje tlaka s 80 bar na 20 bar, dovest će do povećanja temperature vodika za 2,1 °C dok bi se u tom slučaju temperatura prirodnog plina smanjila za 30 °C.

Regulacijske stanice predstavljaju mali dio ukupnih troškova infrastrukture i zahtjevi za prenamjenu za vodik su minimalni. Budući da su ove stanice poveznica s distribucijskim mrežama, važna je koordinacija s operatorima distribucijskog sustava.

4.3. Buduća uloga plinske infrastrukture

Europa ima dobro razvijenu mrežu prirodnog plina koja se sastoji od oko 2,2 milijuna km cjevovoda za transport i distribuciju plina (ENTSOG, 2019). Tako prostrana mreža omogućuje brz i lagan transport plina od mjesta proizvodnje do krajnjih kupaca te van granica pojedine države. Poželjno je da čisti vodik ima sve veću ulogu u energetsom miksu, osobito u sektorima u kojima je teško ili neisplativo postići smanjenje emisija.

Europska mreža operatora transportnih sustava za plin (ENTSOG) predviđa da će plinska infrastruktura imati ključnu ulogu u postizanju cilja smanjenja emisija stakleničkih plinova u EU-u. Europska unija zahtjeva brzo smanjenje emisija koje će biti olakšano prelaskom s ugljena i nafte na prirodni plin te razvojem obnovljivih i niskougljičnih plinova. Dakle, smanjenje CO₂ u sektorima i državama koje su još uvijek ovisne o ugljenu i nafti će se omogućiti prvenstveno prelaskom na prirodni plin s manjim emisijama stakleničkih plinova. Dok će u sektorima koji su već značajno napredovali po pitanju uklanjanja ugljena i nafte iz upotrebe, sljedeći korak biti razvoj novih plinova.

Razne su studije dokazale potencijal plinske mreže u dekarbonizaciji gospodarstva sa smanjenim troškovima tranzicije (ENTSOG, 2019). U mrežu prirodnog plina je tijekom duljeg razdoblja ulagano kako bi se stvorio dobro razvijen i otporan plinski sustav te postiglo dobro funkcioniranje tržišta. Stoga već postoji znanje, iskustvo i resursi koji će pomoći da tranzicija bude troškovno učinkovita te da se unutarne tržište plina unaprijedi i radi na održivosti ugradnjom novih plinova. ENTSOG također vidi veliku važnost biometana i vodika koji će pomoći u stvaranju ugljično neutralnog plinskog sustava.

U skladu s ovim stajalištem, ACER je 2020. godine proveo istraživanje na razini transportnog sustava pri čemu su prikupljene informacije od 23 nacionalna regulatorna tijela

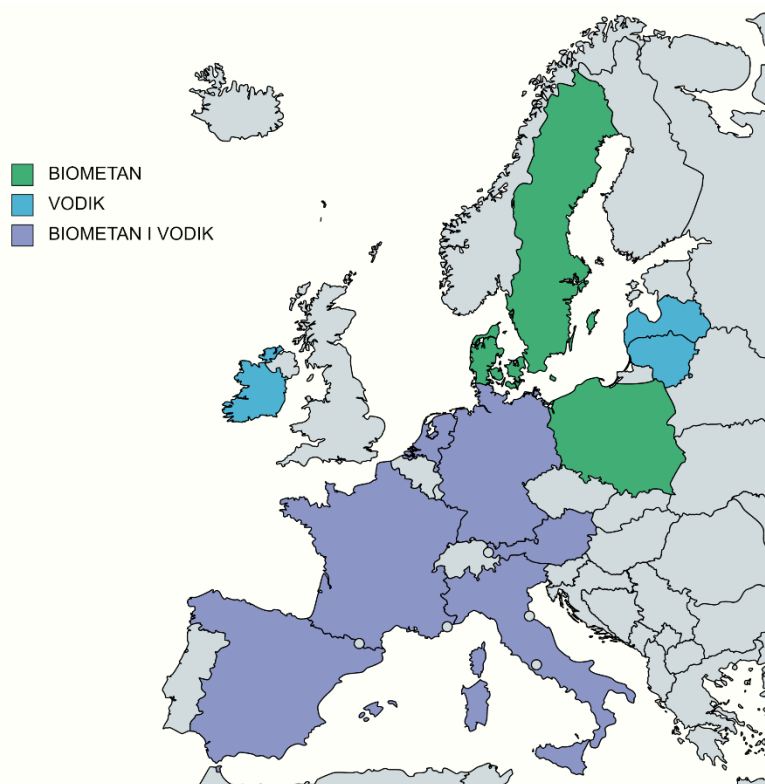
o mogućnostima utiskivanja novih plinova u mrežu prirodnog plina te prilagodbama mreže i ulaganjima koja bi to omogućila (ACER, 2020). Istraživanje je usmjereno na mogućnost utiskivanja vodika i biometana u mrežu prirodnog plina te izgradnju mreže plinovoda za vodik.

Upotreba biometana jedna je od opcija buduće plinske infrastrukture Europske unije. Utiskivanje biometana nije problematično budući da je istog ili vrlo sličnog kemijskog sastava kao prirodni plin. Prema provedenom istraživanju biometan se utiskuje u plinski transportni sustav Danske, Francuske, Njemačke, Italije, Španjolske, Nizozemske, Švedske te Austrije i Poljske.

U budućim godinama očekuje se utiskivanje vodika u mrežu prirodnog plina u sve većim razmjerima. Razlog tome je potencijalno povećanje udjela vodika koji se može proizvoditi elektrolizom iz obnovljivih izvora energije i vodika koji se proizvodi reformiranjem prirodnog plina s CCUS tehnologijom (ACER, 2021). Naime, vodik se može miješati s prirodnim plinom do određene razine pri čemu neće biti štetan za uređaje i opremu. Iznad te granice, infrastruktura i oprema krajnjih korisnika bi zahtijevala prilagodbu ili zamjenu. Smatra se da nije izvedivo postupno povećavati udio vodika od 0 do 100 % u plinskim mrežama, već kada se postigne određena razina koja će učiniti prelazak na vodik ekonomičnim tada bi se to trebalo učiniti. Ipak, utiskivanje vodika u plinsku mrežu je specifično za svaki pojedini slučaj, ovisno o kvaliteti prirodnog plina i lokalnim propisima. U većini država članica Europske unije, nadležno tijelo koje postavlja granice miješanja vodika je ministarstvo (ACER, 2020).

U istraživanju iz 2020. godine, 15 od 23 nacionalnih regulatornih tijela se izjasnilo da u svojoj domeni još ne dopuštaju utiskivanje vodika u mrežu prirodnog plina (ACER, 2020). Međutim, u nekim državama utiskivanje je moguće pri vrlo malim koncentracijama. U Njemačkoj je najviša razina koncentracije vodika 10 %, u Francuskoj 6 %, Španjolskoj 5 % i Austriji 4 % (ACER, 2020). Još četiri države dopuštaju manje koncentracije vodika u svojim plinskim mrežama – Litva 2 %, Italija 1%, Latvija 0,1 % i Irska 0,1 %. Nizozemska navodi dozvoljenu koncentraciju od 0,02 % vodika u svojim transportnim plinskim mrežama kao prihvatljivu razinu. Konačno, u više od 60 % država razmatranih u istraživanju dopuštena razina vodika je 0 %. Međutim, više od 50 % sudionika istraživanja je upoznato s projektima koji se odnose na utiskivanje vodika u plinsku mrežu te navode da bi se uskoro u njihovim državama mogle prihvaćati određene koncentracije vodika i imaju cilj povećanje granica prihvatljivosti vodika.

Prema ACER istraživanju, o postojanju mreže plinovoda za vodik izvještavaju Belgija, Francuska, Njemačka i Nizozemska, ali je njihova namjena za industrijske svrhe (ACER, 2020). Tim cjevovodima ne upravljaju operatori transportnog ili distribucijskog sustava već privatne tvrtke, a vodikovi cjevovodi se koriste za opskrbu rafinerija, tvornica gnojiva i drugih industrija. Na slici 4-4. prikazana je karta Europe na kojoj su označene države u kojima je dopušteno utiskivanje biometana i/ili vodika prema ACER istraživanju iz 2020. godine.



Slika 4-4. Karta Europe na kojoj su označene države u kojima je dozvoljeno utiskivanje vodika (plava boja), biometana (zelena boja) te biometana i vodika (ljubičasta boja) u plinski transportni sustav OTS-a

Konačno, transformacija mreže prirodnog plina u Europskoj uniji je nužna. Međutim, mali je broj država koje ozbiljno shvaćaju i provode dekarbonizaciju transportnog sustava što je vidljivo prema rezultatima ovog istraživanja. Spremnost transportnih mreža da prihvate vodik i/ili biometan, kao i predviđeni razvoj koji će omogućiti takvo prihvaćanje, prilično su različiti u cijeloj Europskoj uniji, a u nekim slučajevima nedosljedni. Zahvaljujući donesenim strateškim strategijama Europske unije te zakonodavnim okvirom, države članice će morati započeti i ubrzati implementaciju novih plinova u transportne sustave.

4.3.1. Tehnička problematika transporta vodika cjevovodima

Tranzicija energetskog sustava provodi se s ciljem smanjenja stakleničkih plinova, za što je potrebno smanjiti upotrebu fosilnih goriva. Istovremeno se može primijetiti širenje infrastrukture za prirodni plin u različitim regijama, što dovodi do nejasne uloge prirodnog plina i njegove infrastrukture u budućem energetskom sustavu (Cerniauskas et al., 2020). Jedno od mogućih rješenja ovih dvaju problema jest korištenje plinovoda za prirodni plin za transport vodika utiskivanjem vodika u tok prirodnog plina ili prenamjena plinovoda za transport čistog vodika.

U slučaju utiskivanja vodika u prirodni plin, Ogden et al. (2017) u svome radu ukazuju na tehnička ograničenja umješavanja te na prisutne poteškoće u procesu separacije vodika. S druge strane, prenamjena cjevovoda suočava se s problemom oštećenja materijala uzrokovanih vodikom i omogućavanja sigurne isporuke vodika.

Krhkost materijala koju uzrokuje vodik prodiranjem u čeličnu strukturu, dovodi do smanjenja mehaničkih svojstava materijala cjevovoda. Krhkost uzrokovana vodikom se javlja kod čelika veće čvrstoće pri sobnoj temperaturi i tlaku manjem od 100 bar (PLINACRO, 2020). Budući da su molekule vodika male, one prodiru u nastale pukotine i dovode do pucanja cjevovoda. Dakle, krhkost će imati značajniji utjecaj kod čelika veće čvrstoće, dok će kod čelika manje čvrstoće (API 5L A,B, X42, X46) negativan utjecaj vodika biti manji tako da se cjevovodi izrađeni od takvog materijala smatraju sigurnijima za transport vodika. Nadalje, čelik koji je u kontaktu s vodikom, a čija je granica razvlačenja između 200 i 580 MPa neće pokazivati znakove rasta pukotina pod statičkim opterećenjem. Budući da čelik X70 ima čvrstoću popuštanja 483 MPa, smatra se sigurnim za transport vodika.

Dva su glavna mehanizma degradacije materijala kod cjevovoda – degradacija zona pod utjecajem topline (engl. *Heat-affected zones – HAZ*) i širenje zamorne pukotine (engl. *Fatigue crack propagation – FCP*) u materijalu cjevovoda (Cerniauskas et al., 2020). Degradacija pod utjecajem topline nastaje zbog rasta pukotina izazvanih vodikom pod statičkim opterećenjem na zavarenom dijelu cjevovoda, dok se širenje zamorne pukotine događa u osnovnom materijalu cjevovoda. Istraživanjima je utvrđeno da je za uklanjanje HAZ oštećenja ili djelomično rješavanje FCP problema prikladna upotreba cjevovoda od čelika X70. Međutim, u slučaju pojave pukotine koja dođe u kontakt s vodikom pod visokim tlakom, FCP mehanizam će se pojaviti bez obzira za korišteni tip čelika.

Cerniauskas et al. Su proveli istraživanje na primjeru Njemačke o mehanizmima smanjenja širenja pukotine (FCP) te su razmatrana 4 alternativna modela prenamjene cjevovoda:

1. upotreba cjevovoda bez modifikacija kod kojih se vodikova krhkost umanjuje dodatnim popravcima i postupcima održavanja cjevovoda,
2. korištenjem premaza, odnosno dodatnog sigurnosnog sloja, kojim se ograničava adsorpcija plinovitog vodika u materijal cjevovoda,
3. korištenje inhibitora koji se dodaju u struju plina kako bi narušili bilo kakve reakcije između materijala cjevovoda i vodika,
4. sustav cjevovoda u cjevovodu, pri čemu je unutarnji dizajniran za transport vodika, a vanjski pruža potrebnu stabilnosti i sigurnost.

Predstavljene metode prenamjene cjevovoda, povezane su s dva izazova vezana uz implementaciju cjevovoda za vodik (Cerniauskas et al., 2020): ograničeno znanje o upravljanju prenamijenjenim cjevovodima i nekorisćenje čeličnih cjevovoda velikog promjera (> 300 mm) na visokim tlakovima, što je važno budući da su promjeri cjevovoda koji se koriste za transport vodika puno većeg promjera. Zbog toga su potrebna opsežna ispitivanja i odgovarajuće mjere politike kako bi se prenamjena cjevovoda olakšala i ubrzala. U tablici 4-4. istaknute su prednosti i nedostaci četiriju metoda prenamjene cjevovoda za transport vodika.

Tablica 4-4. Prednosti i nedostaci metoda prenamjene postojećih cjevovoda za transport vodika (Cerniauskas et al, 2020)

	Prednosti	Nedostaci
Cjevovodi bez modifikacija	<ul style="list-style-type: none"> – Mali broj modifikacija zbog korištenja nove kompresijske i regulacijske stanice prilagođene vodik – Ograničen lom materijala pod statičkim opterećenjem 	<ul style="list-style-type: none"> – Povećani rast pukotina (degradacija materijala) što će imati negativan utjecaj na čvrstoću materijala i na troškove rada i održavanja cjevovoda
Premazivanje cjevovoda	<ul style="list-style-type: none"> – Prekrivanje cjevovoda specifičnim zaštitnim slojem kako bi se spriječila krhkost izazvana vodikom – Premazivanje metalnih površina je već poznat industrijski proces 	<ul style="list-style-type: none"> – Nema poznatih postupaka premazivanja cjevovoda na licu mjesta koji bi se mogli provoditi na već postavljenim cjevovodima – Vjerojatno je potreban iskop cjevovoda, što povećava složenost i troškove prenamjene cjevovoda

Dodavanje inhibitora	<ul style="list-style-type: none"> - Postiže se sličan učinak kao kod premaza, budući da inhibitori sprječavaju adsorpciju vodika u materijalu cjevovoda - Zaštitni sloj umanjuje propusnost vodika - Potrebne su male izmjene cjevovoda jer se inhibitori mogu lako umiješati u tok vodika 	<ul style="list-style-type: none"> - Toksičnost i sigurnosni rizici povezani sa određenim tipom inhibitora - Ovisno o obradi i primjeni vodika, potrebno je pročišćavanje
Cijev u cijevi (engl. <i>Pipe-in-pipe</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Vanjski cjevovod je postojeći cjevovod koji pruža mehaničku zaštitu, a unutarnji cjevovod je namijenjen za prijenos vodika 	<ul style="list-style-type: none"> - Iziskuje veliki kapital zbog potrebnih dodatnih instalacija unutar postojećih cjevovoda - Potreban je iskop cjevovoda što povećava složenost i troškove prenamijene cjevovoda

S obzirom na rezultate dobivene istraživanjem alternativnih modela prenamijene cjevovoda, metoda premazivanja cjevovoda i sustav cijevi unutar cijevi su zanemarene jer zahtijevaju iskopavanja cjevovoda što umanjuje ekonomski potencijal prenamijene cjevovoda. Stoga su metode cjevovoda bez modifikacija i metoda dodavanja inhibitora detaljnije analizirane.

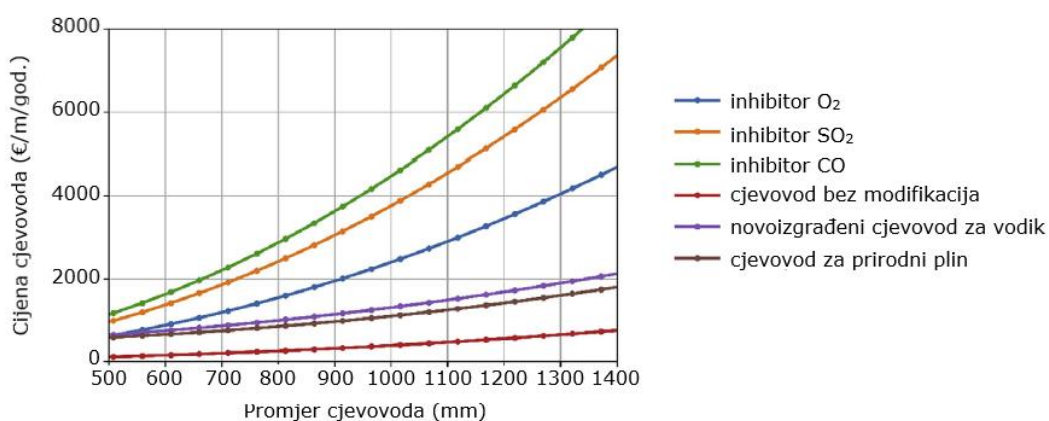
Troškovi koji uključuju prenamjenu cjevovoda bez modifikacija odnose se na operativne i kapitalne troškove (Cerniauskas et al., 2020). Pretpostavlja se da zbog prenamijene cjevovoda nisu potrebni kapitalni troškovi za cjevovode, već samo za nove kompresore i plinske regulacijske stanice koje su kompatibilne s vodikom. Također se u obzir nisu uzimali kapitalni troškovi zamjene dotrajalih ventila i opreme jer su ti troškovi neovisni o prenamjeni cjevovoda. Kao što je već spomenuto, prenamjena cjevovoda bez modifikacija ubrzava proces degradacije materijala cjevovoda, što povećava troškove rada i održavanja cjevovoda.

U slučaju dodavanja inhibitora u tok vodika, uz troškove inhibitora postoji i dodatni trošak njihovog uklanjanja prije daljnje obrade vodika (Cerniauskas et al., 2020). Dakle, kapitalni troškovi se odnose na kompresorske stanice, proces pročišćavanja, kompresore za pročišćavanje i regulacijske stanice. Inhibitori koji se mogu dodavati u tok vodika su kisik (O₂), sumporov dioksid (SO₂) i ugljični monoksid (CO), a njihove potrebne koncentracije kojima bi se spriječila krhkost su prikazane u sljedećoj tablici.

Tablica 4-5. Potrebne koncentracije inhibitora kojima bi se spriječio negativan utjecaj krhkosti čelika (Cerniauskas et al., 2020)

Inhibitor	Potrebna koncentracija inhibitora, %	Količina inhibitora (kg _{inhibitora} /kg _{H2})	Cijena inhibitora (€/kg _{inhibitora})	Cijena inhibitora (€/kg _{H2})
O ₂	0,015	0,0024	0,06	0,000144
SO ₂	2	0,6531	0,2443	0,159577
CO	2	0,4490	0,5428	0,243715

Može se primijetiti da je potrebna znatno manja koncentracija kisika, nego u slučaju SO₂ i CO, što pokazuje učinkovitost dodavanja kisika. Dodatna komponentna troškova je postrojenje za pročišćavanje vodika koje se koristi za uklanjanje inhibitora i osigurava postizanje potrebne čistoće vodika za daljnju obradu ili primjenu. Kao adsorbirajući materijal u procesima pročišćavanja vodika često se koriste zeoliti (Cerniauskas et al., 2020). Na slici 4-5. prikazani su godišnji troškovi prenamijenjenih cjevovoda pri promjerima od 500 do 1400 mm. Uz to, prikazani su i troškovi novih vodikovih cjevovoda s regulacijskim i kompresorskim stanicama postavljenim na svakih 250 km.



Slika 4-5. Usporedba cijene prenamijenjenih cjevovoda i novoizgrađenih cjevovoda za vodik (Cerniauskas et al., 2020)

Primjetno je da nisu sve metode prenamjene cjevovoda za prirodni plin povoljnije od izgradnje novih vodikovih cjevovoda. Najviši godišnji trošak ima metoda prenamjene cjevovoda uz dodavanje CO i SO₂ u tok vodika, a dodavanje O₂ pokazuje znatno manji trošak. Iako je dodavanje inhibitora O₂ vrlo povoljna opcija, troškovi pročišćavanja ne smanjuju ukupne troškove u usporedbi s novo izgrađenim cjevovodima za vodik. Međutim, značajno manje troškove pokazuje metoda prenamjene cjevovoda bez modifikacija, a razlog

tome je što nema potrebe za procesom pročišćavanja vodika. Uz to, znatno su manji kapitalni i fiksni troškovi te je metoda prenamjene cjevovoda bez modifikacija oko 60 % jeftinija od izgradnje novog cjevovoda za vodik (Cerniauskas et al., 2020).

Međutim, potrebno je napomenuti da su ispitivanja za ovo istraživanje provedena na cjevovodima malog promjera i u uvjetima niskog tlaka, a obzirom na promjenjive cikluse opterećenja i potrebnu veću fleksibilnost u mreži cjevovoda zbog varijabilnih obnovljivih izvora potrebna su opsežnija istraživanja u realnijim uvjetima kako bi se dobili točniji rezultati.

4.4. Smjernice za izgradnju vodikove infrastrukture

Određene strategije Europske unije i razna provedena istraživanja dovela su do zaključka da će vodik imati vrlo važnu ulogu na putu tranzicije energetskog sustava s neto nula emisija stakleničkih plinova. Stoga je krajem 2020. godine objavljen je prvi dokument *Smjernice za izgradnju vodikove infrastrukture* (engl. *European Hydrogen Backbone – EHB*) koji je nastao suradnjom 11 europskih operatora plinskih sustava (Gas for Climate, 2020b). Uvidjevši važnost postojeće europske plinske infrastrukture u energetskej tranziciji predstavljen je detaljan plan izgradnje infrastrukture za opskrbu vodikom koja je tehnički izvediva i ekonomski prihvatljiva. Vodikova mreža služit će za transport vodika koji se proizvodi iz obnovljivih izvora energije u Europi i vodika koji će se uvoziti van granica Europe. *Smjernice za izgradnju vodikove infrastrukture* predstavljaju europski pothvat na temelju kojeg će se povezivati ponuda i potražnja vodika od sjevera do juga i od istoka do zapada Europe.

Potaknuti prijedlogom *Direktive o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište obnovljivih i prirodnih plinova te vodika* iz prosinca 2021. godine, okvirom *Spremni za 55%* i *RePowerEU*, vizija europske vodikove mreže je proširena. U travnju 2022. godine objavljene su nove *Smjernice za izgradnju vodikove infrastrukture* s uključenim 31 operatorom energetskog sustava iz 25 zemalja Europske unije te Norveške, Ujedinjenog Kraljevstva i Švicarske (Gas for Climate, 2022). S obzirom na ambiciozne nacionalne i europske klimatske ciljeve, javila se potreba za ubrzanim planiranjem i razvojem vodikove mreže, a *Smjernice za izgradnju vodikove infrastrukture* prikazuju viziju vodikove infrastrukture do 2030., odnosno 2040. godine.

4.4.1. Vodikova infrastruktura do 2030. godine

Kako bi se ostvarili ciljevi proizvodnje vodika do 2030. godine prema planu *REPowerEU* i *Spremni za 55%*, potrebno je osigurati nekoliko izvora opskrbe – dijeljenje prostora za elektrolizu, proizvodnja vodika iz vlastitih OIE, proizvodnja plavog vodika velikih razmjera, uvoz vodika cjevovodima i uvoz vodikovih derivata (amonijak, metanol) brodovima (Gas for Climate, 2022).

Analizom provedenom u svrhu izrade *Smjernica za izgradnju vodikove infrastrukture*, predviđa se 5 europskih koridora za uvoz i opskrbu vodikom kojima se mogu integrirati velike količine vodika iz obnovljivih izvora te vodika proizvedenog iz fosilnih goriva uz hvatanje ugljika. Pri tome se očekuje primjena solarnih izvora iz zemalja južne i istočne Europe te izvora vjetra sa Sjevernog, Baltičkog i Sredozemnog mora. Predviđeni koridori do 2030. godine su sljedeći (Gas for Climate, 2022):

1) Sjevernomorski koridor

Koridor sa Sjevernog mora nadovezuje se na već planirane projekte odobalnih vjetroelektrana, projekte vezane za integraciju vodika te projekte brodskog uvoza vodikovih derivata kojima će se zadovoljiti industrijska potražnja. Sjevernomorskim koridorom ostvaruje se povezanost s lukama na obali Belgije, Nizozemske, Njemačke i Francuske. S obzirom da se očekuje iskorištavanje velikog potencijala vjetra na moru i kopnu, pretpostavlja se da će vodikova mreža u Nizozemskoj biti izgrađena do 2027. godine. Vodikova mreža bi povezivala industrijske klastere, skladišta i susjedne operatore transportnog sustava u Njemačkoj i Belgiji te se širila prema drugim zemljama sjeverozapadne Europe.

2) Nordijski i baltički koridor

Zahvaljujući energiji vjetra na kopnu i moru, očekuje se značajan potencijal opskrbe zelenim vodikom kojim će se baltičke i nordijske zemlje povezati s ostatkom Europe. Uz to veliki potencijal vjetra na moru će potaknuti razvoj morskih cjevovoda za transport vodika kojim će se povezati nordijska opskrba s potražnjom u srednjoj Europi. Međutim, ovaj koridor bi se uglavnom sastojao od novoizgrađenih cjevovoda te razvoj do 2030. godine uvelike ovisi o financiranju te brzini izdavanja dozvola i potrebama lokalnog tržišta.

3) Koridor Sjeverna Afrika – Italija

Koridorom iz Sjeverne Afrike će se povezati opskrba vodikom iz Tunisa i Alžira preko Italije do srednje Europe pri čemu će se moći iskoristiti prenamijenjeni postojeći cjevovodi u Italiji, Austriji, Slovačkoj i Češkoj.

4) Jugozapadni koridor

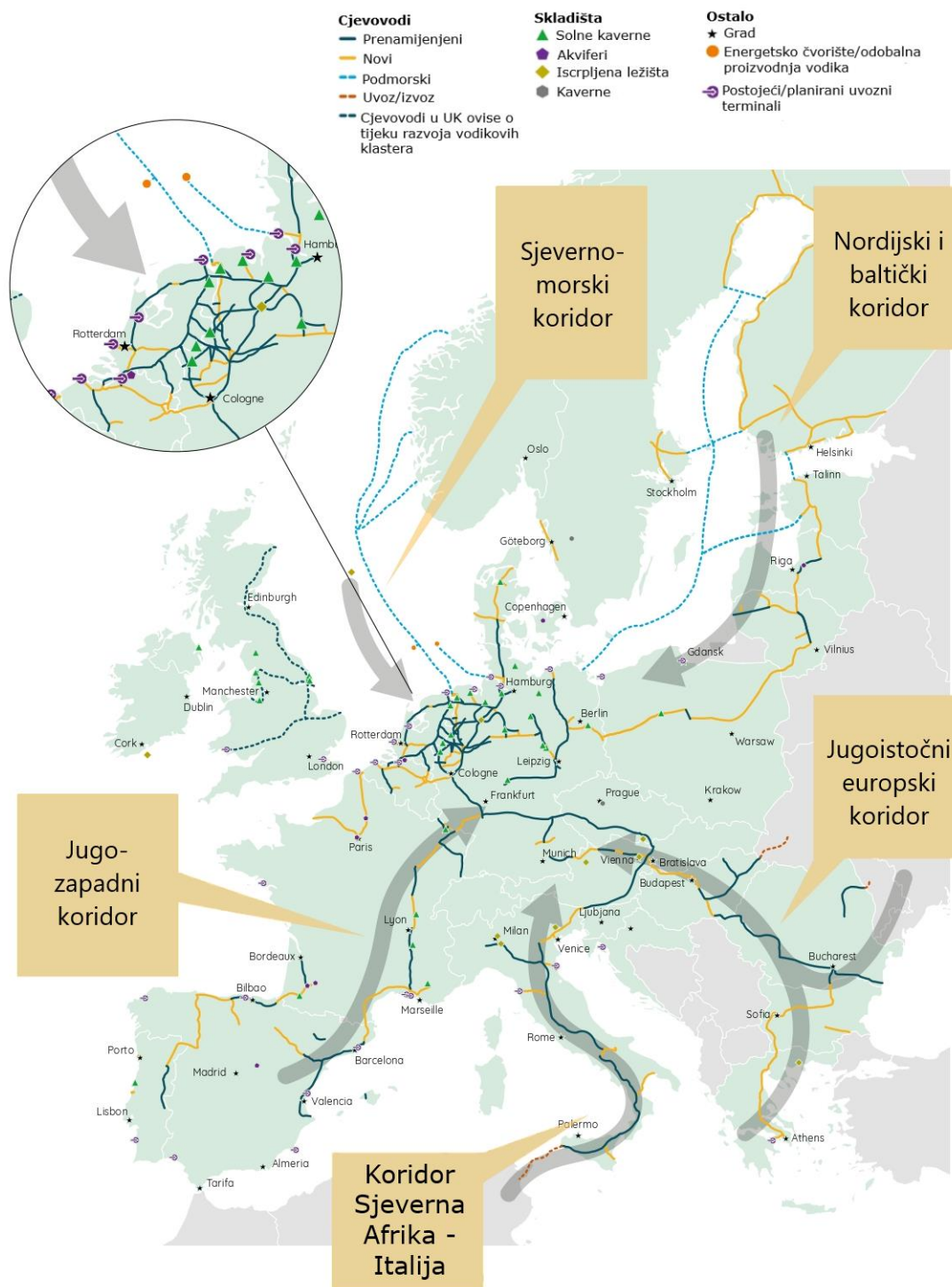
Koridorom na jugozapadu Europe bi se mogao iskoristiti izvoz i transport zelenog vodika na Pirinejskom poluotoku. Novim interkonekcijama između Portugala i Španjolske te interkonekcijama Pirinejskog poluotoka i Francuske, iskoristila bi se španjolska i portugalska proizvodnja zelenog vodika te mogućnost podzemnog skladištenja u Francuskoj. Koridor bi se proširio do Njemačke, a dugoročno bi njime bio omogućen uvoz vodika iz Maroka.

5) Jugoistočni europski koridor

Povezivanje regija bogatih obnovljivim izvorima energije iz Rumunjske, Grčke i Ukrajine sa srednjom Europom omogućio bi Jugoistočni europski koridor. Raspoloživost zemljišta, kapaciteti energije vjetra i solarne energije, dostupnost vodika koji se može proizvesti primjenom električne energije s nuklearnih postrojenja i mogućnost prenamjene postojećih cjevovoda prednosti su razvoja proizvodnje vodika u ovoj regiji.

Ovisno o brzini povećanja proizvodnje vodika u izvoznim regijama i razvoju strategija uvoznih terminala, uvoz će biti moguć cjevovodima ili brodovima. U slučajevima kada će cjevovodni uvoz biti skup, moguća opcija je uvoz amonijaka i metanola brodovima koji se mogu izravno koristiti ili pretvoriti u vodik za transport cjevovodima.

Infrastruktura za transport vodika do 2030. godine prikazana je na slici 4-6., a sastojala bi se uglavnom od rekonstruirane infrastrukture prirodnog plina, na način da se prenamjene postojeći cjevovodi (Gas for Climate, 2021c). U Nizozemskoj, Njemačkoj, Francuskoj, Španjolskoj i Italiji dostupnost plinovoda nije ograničena dugoročnim obvezama za prirodni plin i ugovorima o kapacitetu te je omogućena prenamjena cjevovoda. S obzirom na očekivani pad potražnje za prirodnim plinom, zatvaranje polja Groningen i prijelaz s opskrbe niskokaloričnim plinom na opskrbu visokokaloričnim plinom u sjeverozapadnoj Europi, stvoriti će se prostor za prenamjenu postojećih plinovoda.



Slika 4-6. Vizija vodikove mreže do 2030. godine prema EHB-u (Gas for Climate, 2022)

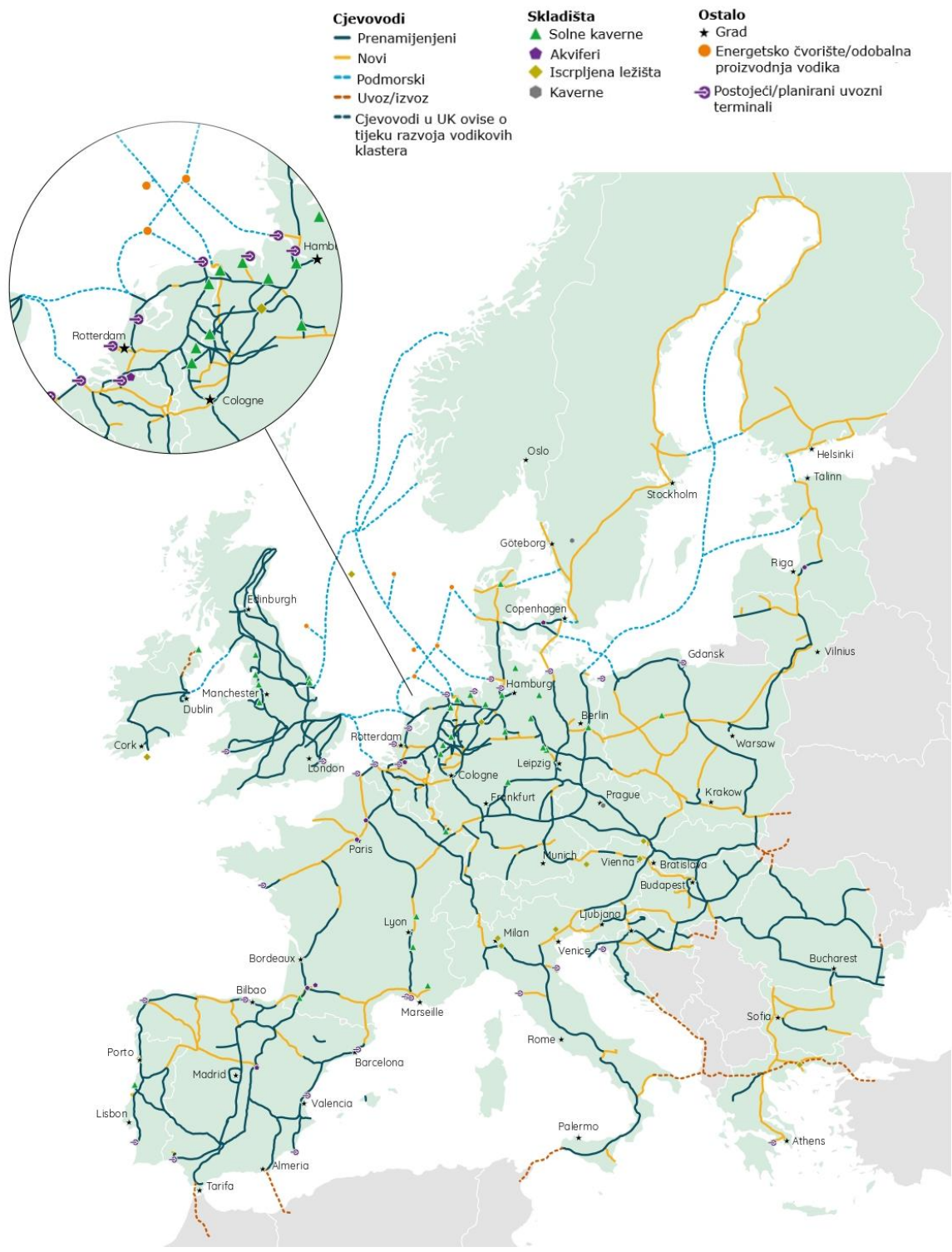
4.4.2. Vodikova infrastruktura do 2040. godine

Očekuje se daljnji rast i razvoj vodikove mreže nakon 2030. godine te pokrivanje više regija i razvijanje novih interkonekcija između država članica što je potaknuto hitnošću postizanja klimatskih ciljeva. Spajanjem velikih koridora opskrbe vodikom, do 2040. godine

se može predvidjeti razvijena vodikova mreža koja će povezivati 28 država što prikazuje slika 4-7. (Gas for Climate. 2022).

Očekuje se da bi ukupna duljina vodikovih cjevovoda do 2040. godine mogla iznositi oko 53 000 km od čega bi 60 % cjevovoda bili prenamijenjeni plinovodi za prirodni plin, a 40 % bi činili novoizgrađeni cjevovodi za transport vodika (Gas for Climate, 2022). Pretpostavlja se da bi takva mreža bila dovoljna da se zadovolji predviđenih 1640 TWh godišnje potražnje za vodikom u Europi do 2040. godine. Očekuje se da bi u početku vodikova mreža izrađena ovim Smjernicama služila za industrijske potrebe za vodikom, ali nakon 2030. godine se očekuje upotreba vodika u teškom transportu, proizvodnji e-goriva, skladištenju energije, proizvodnji električne energije itd. Očekuje se uvoz vodika iz Namibije, Čilea, Australije i Bliskog istoka te zamjena postojećih terminala za uvoz prirodnog plina s terminalima za uvoz vodika.

Vodikova mreža predviđena *Smjernicama za izgradnju vodikove infrastrukture* osigurat će povezivanje proizvođača vodika s kupcima i velikim skladištima vodika te će pomoći integrirati velike količine obnovljive energije u energetske sustav. Iako se do 2040. godine očekuje rast potražnje za vodikom kao što očekuje većina klimatskih scenarija, značajniji rast potražnje za vodikom se očekuje nakon 2040. godine. Uz to, tijekom 2030-ih godina se očekuje istek nekih dugoročnih Ugovora o plinovodima, što otvara mogućnost prenamjene mreže prirodnog plina u mrežu za vodik, a smanjenje troškova proizvodnje zelenog vodika potaknut će proizvodnju i rast potražnje za vodikom (Gas for Climate, 2020b).



Slika 4-7. Zrela vodikova mreža do 2040. godine prema EHB-u (Gas for Climate. 2022)

4.4.3. Procjena troškova izgradnje vodikove infrastrukture

Očekuje se da bi ukupni investicijski trošak izgradnje vodikove infrastrukture do 2040. godine mogao iznositi 80 – 143 milijarde eura, što uključuje izgradnju novih cjevovoda i prenamjenu postojećih. Uz to, godišnji investicijski trošak se procjenjuje na 1,6 – 3,2

milijarde eura uz pretpostavljeni faktor opterećenja od 5000 sati godišnje (Gas for Climate, 2022). Nadalje, predviđa se da bi cijena transporta vodika na udaljenosti od 1000 km mogla iznositi $3,3 \cdot 10^6 - 6,3 \cdot 10^6$ €/TWh vodika (0,11 – 0,21 €/kg), transport podmorskim cjevovodima bi mogao iznositi $5,5 \cdot 10^6 - 9,7 \cdot 10^6$ €/TWh vodika (0,17 – 0,32 €/kg) pri čemu se očekuje cijena proizvodnje zelenog vodika $30 \cdot 10^6 - 60 \cdot 10^6$ €/TWh (1,00 – 2,00 €/kg).

Procjena troškova je pojednostavljena korištenjem triju dimenzija cjevovoda – mali promjer (20", ~500 mm), srednji promjer (36", ~900 mm) i veliki promjer (48", ~1200 mm). Dimenzije morskih cjevovoda se pretpostavljaju iste kao i dimenzije kopnenih cjevovoda, a troškovi su procijenjeni faktorom množenja 1, 7 u odnosu na kopnene cjevovode istog promjera (Gas for Climate, 2022). Pretpostavljeni radni tlak za cjevovode velikog promjera iznosi 80 bar, a za cjevovode srednjeg i malog promjera je 50 bar.

Procjene troškova su rezultat niza hidrauličkih mjerenja koja su proveli operatori transportnih sustava za plin te se ne bi trebali smatrati reprezentativnima za stvarnu vodikovu mrežu s obzirom na napravljene pretpostavke u analizama. Rezultati dobiveni ovim analizama su prikazani u sljedećoj tablici.

Tablica 4-6. Procjena troška pojedinih parametara za realizaciju vodikove infrastrukture do 2040. godine (Gas for Climate, 2022)

Parametar	Promjer cjevovoda	Trošak	Mjerna jedinica
Kapitalni trošak novih cjevovoda	Mali	42,2 – 54,5	10 ⁶ milijardi €/TWh
	Srednji	60,6 – 81,8	
	Veliki	75,8 – 103,0	
	Morski srednji	103,0 – 139,4	
	Morski veliki	130,3 – 175,8	
Kapitalni trošak prenamijenjenih cjevovoda	Mali	6,1 – 15,2	
	Srednji	6,1 – 15,2	
	Veliki	9,1 – 18,2	
	Morski srednji	9,1 – 15,2	
	Morski veliki	12,1 – 18,1	
Kapitalni trošak kompresorske stanice		2,2 – 6,7	10 ⁶ milijardi € / TWh
Cijena električne energije		40 – 80	10 ⁶ € / TWh
Troškovi rada i održavanja cjevovoda		0,8 – 1,0	€/ god. kao % kapitalnog troška
Troškovi rada i održavanja cjevovoda		1,7	€/ god. kao % kapitalnog troška
Ponderirani prosječni trošak kapitala		5,0	%
Razdoblje amortizacije cjevovoda		40	godina
Razdoblje amortizacije kompresora		25	

5. DEKARBONIZACIJA PLINSKOG TRANSPORTNOG SUSTAVA U NJEMAČKOJ

Njemačka, po uzoru na *Europski zeleni plan*, teži ostvarenju klimatske neutralnosti do 2050. godine u skladu s ciljevima *Pariškog sporazuma*. Kako bi energetska tranzicija u Njemačkoj bila uspješna, sigurnost opskrbe i dostupnost energije moraju se kombinirati s inovativnim i pametnim djelovanjem. Fosilna goriva koja se trenutno koriste, potrebno je zamijeniti alternativnim opcijama, odnosno plinovitim i tekućim izvorima energije koji će biti sastavni dio opskrbe energijom u Njemačkoj (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020). U skladu s time, vodik će imati ključnu ulogu u procesu energetske tranzicije. Savezna vlada Njemačke uzima u obzir jedino zeleni vodik, odnosno vodik koji je proizveden iz obnovljive električne energije kao održivu i dugoročnu opciju.

Njemačka planira godišnje ulagati oko 100 milijuna eura u istraživanje tehnologija za vodik, a brojni su projekti vezani za vodik u kojima Njemačka sudjeluje (FCH 2 JU, 2020). U njemačkom *Nacionalnom i energetskom klimatskom planu* spominje se kako će Njemačka do 2030. godine pokrivati oko 0,1 % svojih transportnih potreba vodikom, a oko 0,2 % do 2040. godine. Kako bi potaknuli razvoj tehnologije vodika i gorivih ćelija, državna tijela, industrija i znanstvenici su 2006. godine uspostavili udruženje Nacionalni inovacijski program za tehnologiju vodika i gorivih ćelija (engl. *National Innovation Programme (NIP) for Hydrogen and Fuel Cell Technology*).

Cilj energetske tranzicije u Njemačkoj je zamijeniti nuklearna i konvencionalna goriva obnovljivom energijom. Prema podacima iz 2019. godina, obnovljivi oblici goriva čine oko 43 % njemačkog energetskog miksa (CMS, 2022).

Proizvodnja vodika u Njemačkoj trenutno iznosi oko 55 TWh, a najveći dio potražnje je povezan s industrijskim te kemijskim i petrokemijskim sektorom (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020). Najveći dio proizvedenog vodika je sivi vodik, a samo 7 % vodika koji se proizvodi u Njemačkoj potječe iz elektrolizatora. Kako bi se omogućilo probijanje tržišta i potaknuo željeni izvoz tehnologija za vodik, neophodno je domaće tržište koje će biti snažna i održiva podloga za proizvodnju i primjenu vodika uz istovremenu energetska tranziciju. Nadalje, u industrijskom sektoru je potrebno postojeće izvore energije zamijeniti alternativama s nula ili vrlo malo emisija ugljika, gdje se očekuje važna uloga vodika.

Njemačka proizvodi biometan za potrebe transportnog goriva i kao zamjena za prirodni plin u cjevovodima, a postala je najveći proizvođač bioplina na svijetu zahvaljujući bioplinskim postrojenjima na farmama (Koonaphapdeelert et al., 2020). Njemačka je Vlada

postavila cilj proizvodnje 10 milijardi m³ biometana do 2030. godine kao zamjenu za prirodni plin te smanjenje emisija stakleničkih plinova za 80 – 90% do 2050. godine u odnosu na razinu iz 1990. godine. Uz to, postavljen je cilj kojim bi se 10 % korištenja prirodnog plina zamijenilo biometanom do 2030. godine. Osim lokalne primjene, biometan se može prenositi i u druge dijelove zemlje zahvaljujući dobro razvijenoj mreži prirodnog plina.

5.1. Regulatorni okvir u Njemačkoj

Kako bi se lakše postigli klimatski i energetske ciljevi te provodila dekarbonizacija potreban je regulatorni okvir koji će to poticati. Njemačka kao i druge države EU-a, mora donositi nacionalne zakone u okviru regulative Europske unije. U skladu s time, njemački zakoni koji se odnose na plinski sektor izmijenjeni su kako bi se prilagodili uvođenju niskougljičnih i obnovljivih plinova u plinski transportni sustav Njemačke.

- **Zakon o energetici**

Prema *Izmjenama i dopunama Zakona o energetici* (njem. *Energiewirtschaftsgesetz – EnWG*) iz 2021. godine, svrha Zakona je omogućiti sigurnu, povoljnu, učinkovitu i ekološki prihvatljivu opskrbu električnom energijom, plinom i vodikom koja se temelji na obnovljivim izvorima energije (BGBl. I S. 1970, 3621). Operatori transportnih sustava za vodik moraju pisanim putem ili u elektronskom obliku prijaviti Federalnoj agenciji za mreže (njem. *Bundesnetzagentur – BnetzA*) da njihove mreže podliježu propisima iz ovog Zakona. Operatori transportnih sustava su dužni osigurati transparentnost i nediskriminatorno projektiranje i izvođenje operacija te ne smiju posjedovati, graditi ili upravljati objektima za proizvodnju vodika, skladištenje vodika ili distribuciju vodika. Zakon sadrži propise za prijelaznu regulaciju vodikovih mreža i odredbe za razvoj infrastrukture za vodik. Člankom 49. ovog Zakona definirano je da se energetske sustavima mora upravljati na način da je zajamčena tehnička sigurnost, odnosno sustavi za proizvodnju, transport i isporuku prirodnog plina i vodika moraju biti u skladu s tehničkim pravilima Njemačkog tehničkog i znanstvenog društva za plina i vodu (njem. *Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches – DVGW*). Prema članku 112b. ovog Zakona, Federalno ministarstvo gospodarstva i energetike (njem. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi*) će do 31.12.2022. godine objaviti koncept daljnjeg razvoja mreže vodika u Njemačkoj koji će uključivati mogućnosti transformacije plinskih mreža u mreže za vodik.

- ***Pravilnik o naknadi za plinsku mrežu***

Pravilnikom o naknadama za plinsku mrežu (njem. *Gasnetzentgeltverordnung – GasNEV*) kojim se uređuje određivanje načina utvrđivanja naknade za pristup plinoopskrbnoj mreži, odnosno mrežne naknade te uključuje propise o razdvajanju troškova (BGBl. I S. 3229). GasNEV regulira određivanje naknade za korištenje mreže za prijenos plina kroz plinske mreže operatora transportnih sustava do potrošača na liberaliziranom energetske tržištu. Njime se stvara temelj za djelovanje regulatornog tijela u ovom području i reguliraju obveze objavljivanja mrežnih operatera.

- ***Uredba o pristupu plinskoj mreži***

Uvjete pod kojima mrežni operatori moraju omogućiti nediskriminirajući pristup mreži, onima koji imaju pravo na to, uređuje *Uredba o pristupu plinskoj mreži* (njem. *Gasnetzzugangsverordnung – GasNZV*) (BGBl. I S. 3026). Potrebno je osigurati da je plin koji se utiskuje u mrežu određenih karakteristika koje odgovaraju svojstvima plina u mreži, a koje je objavljeno na mrežnim stranicama operatera mreže. Uredbom je propisano da se moraju sklapati ugovori o pristupu mreži između korisnika i mrežnih operatera te određeni su minimalni zahtjevi ugovora.

- ***Zakon o obnovljivim izvorima energije***

Zakon o obnovljivim izvorima energije (njem. *Das Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG*) ključan je za promicanje električne energije iz obnovljivih izvora koji je stupio na snagu 2014. godine te se kontinuirano razvija. Promicanje primjene obnovljivih izvora energije provodi se u interesu zaštite klime i okoliša za razvoj održive opskrbe energijom. Širenje obnovljivih izvora energije je središnji stup energetske tranzicije, pa tako opskrba električnom energijom u Njemačkoj iz godine u godinu postaje „zelenija“ (BGBl. I S. 747). Udio obnovljivih izvora energije u potrošnji električne energije je 2020. godine iznosio 46 % (BMWK, 2022a). Cilj EEG-a je povećati udio električne energije iz obnovljivih izvora na 65 % u 2030. godini, a do 2050. godine bi sva električna energija proizvedena ili potrošena u Njemačkoj bila proizvedena na emisijski neutralan način (BGBl. I S. 747). Uz to, potrebno je restrukturiranje opskrbe energijom te povećanje udjela energije iz obnovljivih izvora na najmanje 80 % do 2050. godine (BMWK, 2022b).

5.2. Nacionalna strategija za vodik

U lipnju 2020. godine, Savezna vlada Njemačke je objavila *Nacionalnu strategiju za vodik* kojom je pružen dosljedan okvir za proizvodnju, transport i primjenu vodika uz poticanje inovacija i investiranja. Savezna Vlada vidi veliku važnost Njemačke u smanjenju emisija stakleničkih plinova, te smatra da Njemačka ima ključan globalni doprinos promjeni klimatskih emisija što se postiže razvojem tržišta vodika i promicanjem vodika kao opcije dekarbonizacije (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020). Uz to, Strategijom se želi postići pretvaranje vodika u konkurentnu opciju, odnosno smanjenje troškova proizvodnje vodika. Jedan od ciljeva *Nacionalne strategije za vodik* je razvijanje domaćeg tržišta za vodikovu tehnologiju u Njemačkoj, odnosno za proizvodnju i primjenu, što bi trebalo potaknuti i druge države da koriste vodik. Savezna vlada očekuje da će se do 2030. godine javiti potreba za oko 90 – 110 TWh vodika. Zbog toga Njemačka planira ostvariti proizvodne kapacitete do 0,005 TW, što odgovara proizvodnji oko 14 TWh vodika te zahtijeva oko 20 TWh električne energije iz obnovljivih izvora. Međutim, domaća proizvodnja vodika neće biti dovoljna da se zadovolji potražnja za vodikom u Njemačkoj te će biti potreban uvoz. U zemljama u Sjevernom i Baltičkom moru te zemljama na jugu Europe mogu se proizvoditi velike količine obnovljive energije, što predstavlja veliki potencijal proizvodnje zelenog vodika te je potrebna suradnja Njemačke s tim zemljama. S druge strane, razvijena njemačka plinska infrastruktura predstavlja mogućnost transporta vodika cjevovodima.

Nacionalna strategija za vodik sadrži akcijski plan od 38 mjera koje vode uspjehu strategije. Prva faza ili faza rasta trajat će do 2023. godine, a cilj je uspostavljanje domaćeg tržišta za vodik, odnosno privlačenje privatnih ulaganja u proizvodnju, transport i korištenje vodika. Iduća faza bi trebala početi 2024. godine te se odnosi na stabilizaciju domaćeg tržišta u nastojanju i oblikovanju europske i međunarodne dimenzije. Potreban je regulatorni okvir za izgradnju i širenje infrastrukture za vodik da bi se planirani razvoj pretvorio u stvarnost na čemu operatori transportnih sustava i Savezna Vlada Njemačke uzajamno rade.

Kako bi se pratilo djelovanje njemačke strategije za vodik i njezin razvoj, Savezna vlada je imenovala određenu upravnu strukturu koja će obavljati tu zadaću (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020). Imenovano je Nacionalno vijeće za vodik (njem. *Nationaler Wasserstoffrat – NWR*) koje se sastoji od 26 stručnjaka iz područja gospodarstva, znanosti i civilnog društva koji nisu dio javnog sektora. Zadaća Nacionalnog vijeća za vodik je savjetovati i podržavati Odbor državnih tajnika za vodik (njem. *Staatssekretärsausschuss für Wasserstoff*) kroz prijedloge i preporuke za djelovanje u provedbi i unapređenju

Nacionalne strategije za vodik. Provedbu i daljnji razvoj njemačke strategije za vodik podržava Ured za koordinaciju vodika (njem. *Leitstelle Wasserstoff*).

5.3. Infrastruktura za transport prirodnog plina u Njemačkoj

Dostupnost podataka o sektoru prirodnog plina u Njemačkoj je oskudna te je teško prikupiti točne i kvalitetne podatke. Naime, ne postoji centralizirano otvoreno mjesto za prikupljanje podataka o infrastrukturi njemačkog transportnog sustava, ali s obzirom na obaveze OTS-ova dostupni su neki javni podaci (Kunz et al., 2018). Njemačka ima ukupno 16 operatora transportnih sustava koji upravljaju mrežom prirodnog plina, a koji su bili raspoređeni na 2 glavna tržišna područja – Gaspool i NetConnect Germany. Međutim, u listopadu 2021. godine došlo je do njihovog spajanja u čvorište THE (engl. *Trading Hub Europe* – trgovačko središte Europe) kojim je omogućeno trgovanje plinom i prekogranično povezivanje europskih plinskih tržišta (Trading Hub Europe, 2022).

U Njemačkoj su izdvojena tri tipa cjevovoda s obzirom na tlak (Kunz et al., 2018):

- visokotlačni cjevovodi (> 1 bar)
- srednjetačni cjevovodi (100 mbar – 1 bar)
- niskotlačni cjevovodi (≤ 100 mbar).

Prema članku 27. GasNEV-a, svi operatori transportnih sustava moraju objaviti pojedinačne duljine svojih visokotlačnih cjevovoda prema klasama promjera od A do G. Klasa G se odnosi na plinovode za niskokalorijski plin ili L-plin koji se uglavnom koristi na sjeverozapadu Njemačke.

Protok prirodnog plina u plinskim mrežama uglavnom ovisi o različitim razinama tlaka u cjevovodu koji se mogu kontrolirati kompresorskim stanicama. Maksimalni transportni kapacitet svakog cjevovoda procjenjuje se korištenjem nazivnog tlaka i promjera cjevovoda, kao što je prikazano u tablici 5-1., uz pretpostavku maksimalne brzine masenog protoka od 10 m/s i kalorijsku vrijednost od 13,81 kWh/kg pri idealnim plinskim uvjetima (Kunz et al., 2018).

Tablica 5-1. Tehničke karakteristike visokotlačnog cjevovoda (Kunz et al., 2018)

Klasifikacija/ kategorija	Tlak [bar]	Promjer cjevovoda [mm]	Transportni kapacitet [10 ⁻³ TWh/d]
A	100	$x \geq 1000$	651 – 1275
B	25 – 100	$700 \leq x < 1000$	80 – 651
C	25 – 63	$500 \leq x < 700$	41 – 201
D	25	$350 \leq x < 500$	20 – 41
E	16 – 25	$200 \leq x < 350$	4 – 20
F	63	$100 \leq x < 200$	4 – 16
G	63	$x \leq 100$	≤ 4

5.3.1. Kvaliteta plina

Njemački institut za standardizaciju (njem. *Das Deutsche Institut für Normung – DIN*) je nezavisna platforma za standardizaciju u Njemačkoj i svijetu te ima važnu ulogu u pomaganju inovacijama da dođu do tržišta. Norma DIN EN 16726 *Plinska infrastruktura – kvaliteta plina – grupa H* dio je standardizacije prema CEN-u za europsko usklađivanje kvalitete plina skupine H (DVGW, 2022). Plinski standard DIN EN 16723-2, odnosi se na primjenu prirodnog plina i biometana u transportu te na utiskivanje biometana u mrežu prirodnog plina. DVGW je razvio radni list G 260 u rujnu 2021. godine koji služi kao osnova za sastav plinova koji se koriste u javnoj opskrbi plinom pri čemu se posebna važnost pridaje korištenju plinova iz obnovljivih izvora energije, ali podaci nisu javno dostupni. Cilj revizije ovog dokumenta jest integracija biometana, sintetskog prirodnog plina i vodika u sustav opskrbe plinom.

5.4. Razvoj plinske mreže u Njemačkoj

Njemačka ima dobro razvijenu mrežu za transport prirodnog plina koja se sastoji od oko 40 000 km cjevovoda, uz duljinu distribucijske mreže od oko 470 000 km (Siemens, 2020). Osim toga, Njemačka ima i najveća skladišta plina u Europskoj uniji s radnim kapacitetom oko 24,3 milijardi m³. Kao važna tranzitna zemlja, Njemačka je dobro povezana s europskim tržištem plina. Postojeće trase cjevovoda pružaju iznimno vrijedan element transportnog sustava i nude priliku za izgradnju klimatski neutralne infrastrukture za vodik uz malo ulaganja. Mjerni uređaji, kompresori i druga oprema može se vrlo lako zamijeniti te bi premještanje cjevovoda ili izgradnja novih bila vrlo skupa. U najboljem slučaju, proces prenamjene bi trajao 5 – 7 godina od početnog planiranja do puštanja u rad.

Prema Siemens istraživanju i drugim studijama, moguće je prenamijeniti postojeće čelične cjevovode za prirodni plin za transport vodika u određenoj mjeri. Međutim potrebna

su dodatna ispitivanja i utvrđivanje prikladnosti postojećih ventila i opreme za vodik. Prije utvrđivanja jesu li cjevovodi prikladni, potrebno je pregledati i procijeniti specifične uvjete postojeće infrastrukture te konzultirati relevantne kodekse i propise.

Da bi se doveo u transportni sustav, vodik se mora komprimirati na radni tlak mreže (Siemens, 2020). Kako bi se osiguralo optimalno korištenje s velikom gustoćom transportne energije u radu s vodikom, potrebno je više kompresora veće snage nego u radu s prirodnim plinom. Za planirane projekte cjevovoda u Njemačkoj, potrebne su kompresorske tehnologije dostupne u obliku klipnih kompresora. Dugoročno, kada se u cijeloj zemlji prijeđe na vodik, turbokompresori koji se trenutno koriste trebat će se optimizirati na vodik.

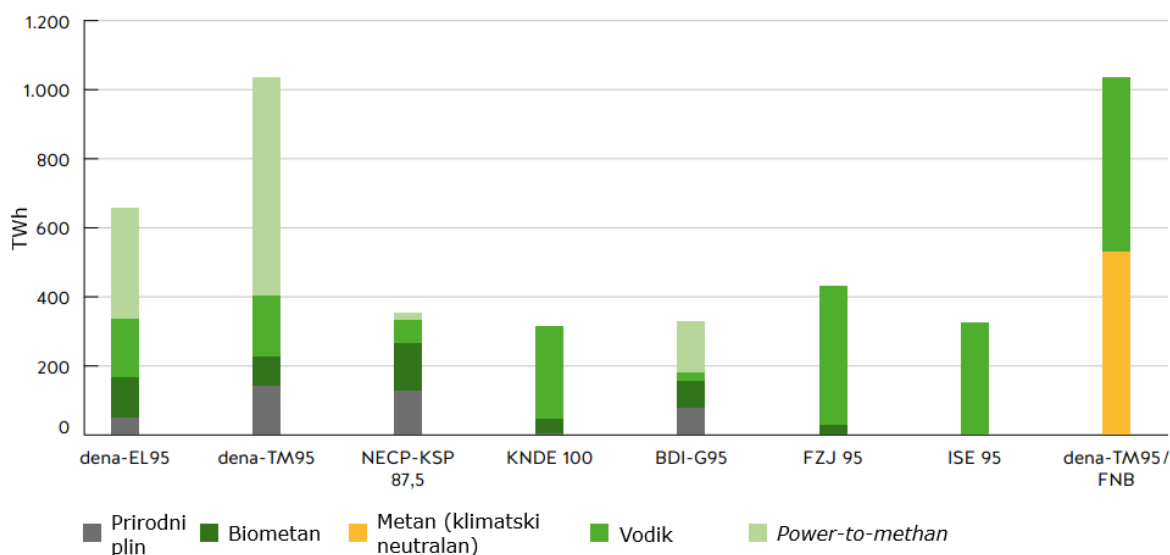
Njemačka infrastruktura prirodnog plina uglavnom koristi turbo-kompresore s jednim ili dva propelera koji rade s plinskim turbinama ili motorima pogonske snage do 30 MW (Siemens, 2020). Ovisno o sadržaju vodika u cjevovodu, infrastruktura se može održavati ili prilagođavati u skladu s tim. S udjelom do oko 10 % vodika u struji prirodnog plina, kompresor se može nastaviti koristiti bez većih promjena. Kućište kompresora može podržavati do oko 40 % vodika, dok se propeleri, zupčanici i ostala oprema mogu prilagoditi, a udio vodika veći od 40 % zahtijevat će zamjenu kompresora.

5.4.1. Scenariji razvoja plinske mreže u Njemačkoj

Uz planiranje postojeće mreže prirodnog plina, potrebno je uzeti u obzir i rastuću važnost obnovljivih plinova. Svijest o ključnoj ulozi vodika u transformaciji energetskog sustava, potaknula je njemačke operatore transportnog sustava na planiranje izgradnje vodikove infrastrukture (FNB Gas, 2021a). Prema članku 15a. EnWG-a, operatori transportnog sustava dužni su svake parne kalendarske godine izraditi *Plan razvoja plinske mreže* (njem. *Netzentwicklungsplan*) koji mora sadržavati učinkovite mjere za optimizaciju, jačanje i proširenje plinske mreže uz jamstvo sigurnosti opskrbe, a koji se odnosi na siguran i pouzdan rad mreže u idućih deset godina. *Plan razvoja plinske mreže* koji je izrađen za razdoblje od 2022. do 2032. godine predstavlja potencijalan rast potražnje za metanom i vodikom. Prema provedenom istraživanju o proizvodnji i potražnji za vodikom (njem. *Wasserstoffabfrage Erzeugung und Bedarf – WEB*) te „zelenih“ plinova, domaća potražnja za vodikom bi do 2032. godine iznosila oko 191 TWh, odnosno oko 342 TWh do 2040. godine te oko 476 TWh do 2050. godine (FNB Gas, 2021a). Buduća potražnja za metanom pokazuje stabilan rast do planirane 2032. godine, što znači da je i infrastruktura za transport metana od velike važnosti. Međutim, kako bi se postigla buduća integrirana mreža između električne energije i plina, potrebne su prilagodbe postojećih procesa razvoja mreže

uzimajući u obzir energetske i klimatske ciljeve. Prema stajalištu operatora transportnog sustava, razvoj ekonomske plinske infrastrukture je moguć jedino uz integrirano planiranje mreže metana i vodika što bi osiguralo da se proizvodni potencijal obnovljivih plinova kombinira sa sadašnjom i budućom potražnjom. Međutim, operatori su istaknuli da je potrebno i planiranje pretvorbe mreže za L-plin u mrežu za H-plin, kako bi se prenamjena transportnog sustava za prirodni plin provela optimalno, učinkovito i brzo.

Operatori transportnog sustava su ispunivši svoju zakonsku obvezu (članak 15a EnWG), predstavili scenarije s različitim putevima razvoja plinske mreže do 2050. godine, uključujući politički cilj klimatske neutralnosti. Razmatrani scenariji pokazuju širok raspon mogućih kretanja potražnje za plinom, kao što prikazuje slika 5-1. Kako bi se postigli ciljevi zaštite klime, potražnja za plinom se također mijenja u smjeru klimatski neutralnih plinova.



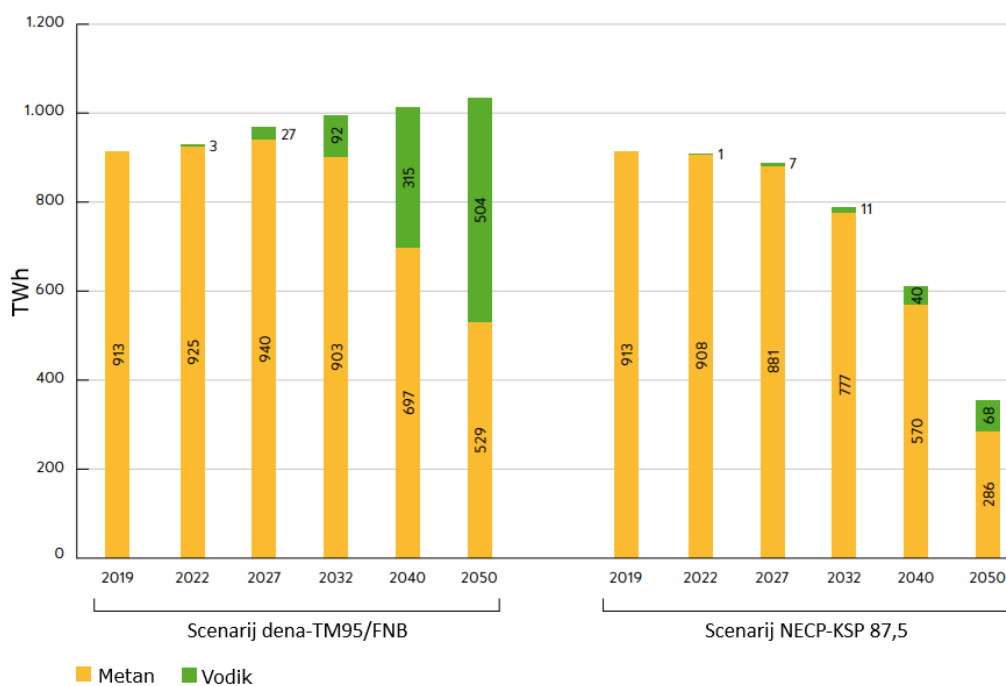
Slika 5-1. Potražnja za plinom u razmatranim scenarijima do 2050. godine (FNB Gas, 2021a)

Međutim, operatori su odlučili detaljnije razmotriti dva od ukupno osam scenarija za *Plan razvoja plinske mreže 2022. – 2032. godine*, a to su scenarij *dena-TM95/FNB* i scenarij *NECP-KSP 87,5*.

Scenarij dena-TM95/FNB je u osnovi scenarij *dena-TM95* uz prilagodbe koji su proveli operatori transportnog sustava (njem. *Fernleitungsnetzbetreiber Gas – FNB Gas*) te je povezan sa scenarijem mješavine tehnologije (njem. *Technologiemixszenario – TM*) koji pretpostavlja korištenje različitih tehnologija i izvora energije (FNB Gas, 2021a). *Scenarijem dena-TM95/FNB* postiže se smanjenje stakleničkih plinova od 95% do 2050. godine u odnosu na bazu 1990. godinu. Upotreba nafte zamijenjena je metanom i vodikom

te je pretpostavljena upotreba vodika u proizvodnji primarne energije i grijanja. Nadalje, ovaj scenarij uzima u obzir visoki sadržaj plina, posebice vodika, te je relevantan za planiranje plinske infrastrukture.

Drugi scenarij, *NECP-KSP 87,5*, uključuje cilj Nacionalnog energetskeg i klimatskog plana (NECP) o poboljšanoj koordinaciji europske energetske i klimatske politike kako bi se postigli klimatski ciljevi do 2030. godine uz program zaštite klime (njem. *Klimaschutzprogramm – KSP*). U ovom scenariju postiže se smanjenje stakleničkih plinova od oko 87,5 % do 2050. godine u odnosu na 1990. godinu (FNB Gas, 2021a). Važnost vodika također raste, ali razvoj nije u skladu s ciljevima *Nacionalne strategije za vodik*. Na slici 5-2. prikazan je grafički prikaz potražnje plina prema dva razmatrana scenarija do 2050. godine.



Slika 5-2. Grafički prikaz razvoja potražnje za plinom (metan i vodik) prema scenariju *dena – TM95/ FNB* i *NECP – KSP 87,5* (FNB Gas, 2021a)

Kao što je vidljivo iz prethodne slike, *Scenarij dena-TM95/FNB* pokazuje blagi porast potražnje za plinom, uz pretpostavku da će se 2050. godine koristiti samo obnovljivi plinovi, pri čemu će se značajno povećati potražnja za vodikom. Potražnja za vodikom do 2030. godine slijedi predviđanja *Nacionalne strategije za vodik*, odnosno korištenje vodika od 90 do 110 TWh do 2030. godine. Nadalje, potražnja za metanom se blago smanjuje do 2032. godine, dok potražnja za vodikom raste. Razlog tomu je očekivana povećana upotreba

vodika u industriji i transportu. U razdoblju 2032. – 2050. godine izražajan je učinak supstitucije, odnosno potražnja za vodikom se povećava, a potražnja za metanom se kontinuirano smanjuje. U tom razdoblju se očekuje primjena vodika u drugim područjima potrošnje (npr. vodik u proizvodnji čelika, upotreba kao sirovine u kemiji), što povećava potražnju za vodikom.

S druge strane, u *Scenariju NECP-KSP 87,5* potražnja za plinom se smanjuje. Iako potražnja za vodikom raste, razvoj ovog scenarija nije u skladu s ciljevima *Nacionalne strategije za vodik*. U razdoblju od 2019. do 2032. godine dolazi do značajnijeg pada potražnje za metanom nego u *Scenariju dena-TM95/FNB*. Potražnja za vodikom se povećava, ali u znatno manjem iznosu te će prema ovom scenariju potražnja za plinom značajno pasti do 2032. godine. U razdoblju nakon 2032. godine, nastavlja se smanjenje potražnje za metanom i povećava potražnja za vodikom, ali je to povećanje puno manje nego u prvom scenariju.

Budući da njemački operatori plinskog transportnog sustava vide važnu ulogu vodika i obnovljivih plinova u dekarbonizaciji energetske sustav, odabran je *Scenarij dena-TM95/FNB* za dugoročno planiranje plinske infrastrukture u Njemačkoj.

5.4.2. Vodikova mreža u Njemačkoj

Budući da je u njemačko zakonodavstvo, odnosno EnwG uključena izgradnja vodikove mreže, neophodno je da se razvoj plinske mreže odvija u smjeru vodika. Stoga je FNB Gas predstavio plan razvoja vodikove mreže do 2030. i 2050. godine, smatrajući da je učinkovita, sigurna i klimatski neutralna opskrba energijom jedino moguća uz pomoć vodika.

Prema prijavljenim projektima za obnovljive plinove koji su uzimani u obzir prilikom izrade *Plana razvoja plinske mreže 2020. – 2030.*, izrađena je tablica kapaciteta vodika do 2030. godine (FNB Gas, 2021b). Prema tablici 5-2. je vidljivo da će potražnja za vodikom biti veća nego što se može pokriti postojećim izvorima vodika, odnosno predviđen je nedostatak vodika u iznosu od 1 166 MW_{th} za 2025. godinu te 1 906 MW_{th} za 2030. godinu.

Tablica 5-2. Predviđeni kapaciteti i potražnja za vodikom prema najavljenim projektima do 2030. godine (FNB Gas, 2021b)

Godina	Kapacitet elektrolize	Ulazni vodik	Izlazni vodik	Dodatna potražnja
	MW _e	MW _{th}		
2020.	67	50	1	0
2022.	338	253	1248	995
2025.	1397	1044	2210	1166
2028.	1417	1058	2989	1931
2030.	1467	1095	3002	1906

Operatori transportnih sustava su razmotrili tri opcije dodatnih izvora vodika kako bi se kompenzirao pretpostavljeni nedostatak (FNB Gas, 2021b):

- domaća proizvodnja zelenog vodika iz vjetroelektrana na kopnu kojima je istekla ili će isteći subvencija za OIE,
- uvoz zelenog ili plavog vodika,
- skladištenje vodika.

Očekuje se da će velikom broju vjetroturbin na kopnu Njemačke isteći potpora prema *Zakonu o obnovljivim izvorima energije* koja je ograničena na najviše 20 godina. Pretpostavlja se da će se neke vjetro turbine zamijeniti snažnijima, a druge nastaviti s radom bez značajnih promjena. Dakle, proizvedena električna energija se mora prodavati izravno na burzama električne energije ili putem ugovora, a postoji dodatna mogućnost pretvaranja električne energije u zeleni vodik korištenjem *Power-to-x* tehnologije (FNB Gas, 2021b). Druga mogućnost kompenziranja ravnoteže vodika je uvoz iz susjednih država, osobito iz Nizozemske gdje postoje brojni projekti u kojima se planira proizvodnja klimatski neutralnog vodika te su planirane točke prekogranične veze s Njemačkom. Treća opcija je skladištenje vodika, a kapacitet skladištenja prirodnog plina u Njemačkoj iznosi oko 253 TWh. Kako bi se ostvario cilj klimatske neutralnosti do 2050. godine, procijenjen je potreban skladišni kapacitet za vodik u iznosu od 47 do 73 TWh, što odgovara trenutnom kapacitetu skladištenja plina od 147 do 229 TWh (INES,2021). OTS-ovi očekuju da će skladištenje vodika biti moguće kada prve slane kaverna budu dostupne za vodik.

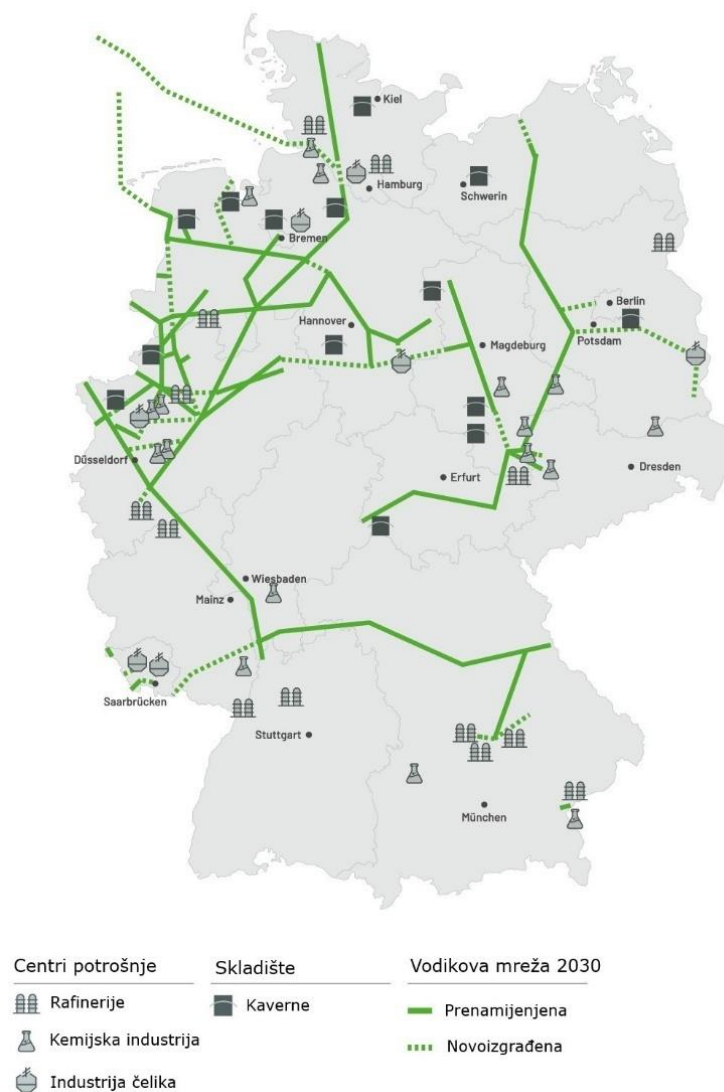
U konačnici, operatori transportnog sustava u Njemačkoj, pretpostavljaju da će se potražnja za vodikom pokriti uvozom iz Nizozemske u iznosu od 70 %, domaćom proizvodnjom zelenog vodika iz vjetroelektrana u iznosu od 20 % te skladišnim kapacitetima u iznosu od 10 % (FNB Gas, 2021b).

5.4.2.1. Vodikova mreža do 2030. godine

Međuregionalna infrastruktura za vodik u Njemačkoj potrebna je za lakšu integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije i opskrbe koja zadovoljava potražnju u svakom trenutku. Stoga su operatori transportnih sustava predstavili razvoj vodikove mreže do 2030. godine (tzv. H2 Net 2030), kako bi se zadovoljile potrebe u slučaju dinamičkog razvoja tržišta vodika (FNB Gas, 2022a). Za projektiranje vodikove mreže, OTS-ovi su razmatrali različite scenarije opterećenja ovisno o dostupnosti obnovljive energije i postojećih skladišta u kavernama. U obzir su uzeti ciljevi *Nacionalne strategije za vodik*, prema kojoj se očekuje potražnja od 90 do 110 TWh vodika do 2030. godine.

Pretpostavlja se da će se do 2030. godine vodik transportiran cjevovodima koristiti za potrebe u industriji čelika, kemijskoj i rafinerijskoj industriji. Mreža bi do 2030. godine, trebala biti ukupne duljine 5 100 km, od kojih je oko 3 700 km duljine cjevovoda se temeljilo na prenamijenjenim cjevovodima (FNB Gas, 2022a). Očekivani troškovi iznose oko 6 milijardi eura, a procijenjena vrijednost uključuje investicijske troškove za transportne cjevovode i kompresore koji su neophodni za međuregionalni transport vodika.

Vodikova mreža H2 Net 2030 temelji se na scenariju (slika 5-3.), a OTS-ovi su u fazi razvoja nove mreže H2 Net 2032 koja će biti modelirana na temelju potražnje i prema *Planu razvoja plinske mreže 2022. – 2032. godine*. Osnova za H2 Net 2032 će biti rezultat istraživanja tržišta o zahtjevima za transport vodika, odnosno WEB-a. S obzirom na različite pristupe, jedan se temelji na potražnji, a drugi na scenariju, očekuju se razlike između H2 Net 2030 i H2 Net 2032.



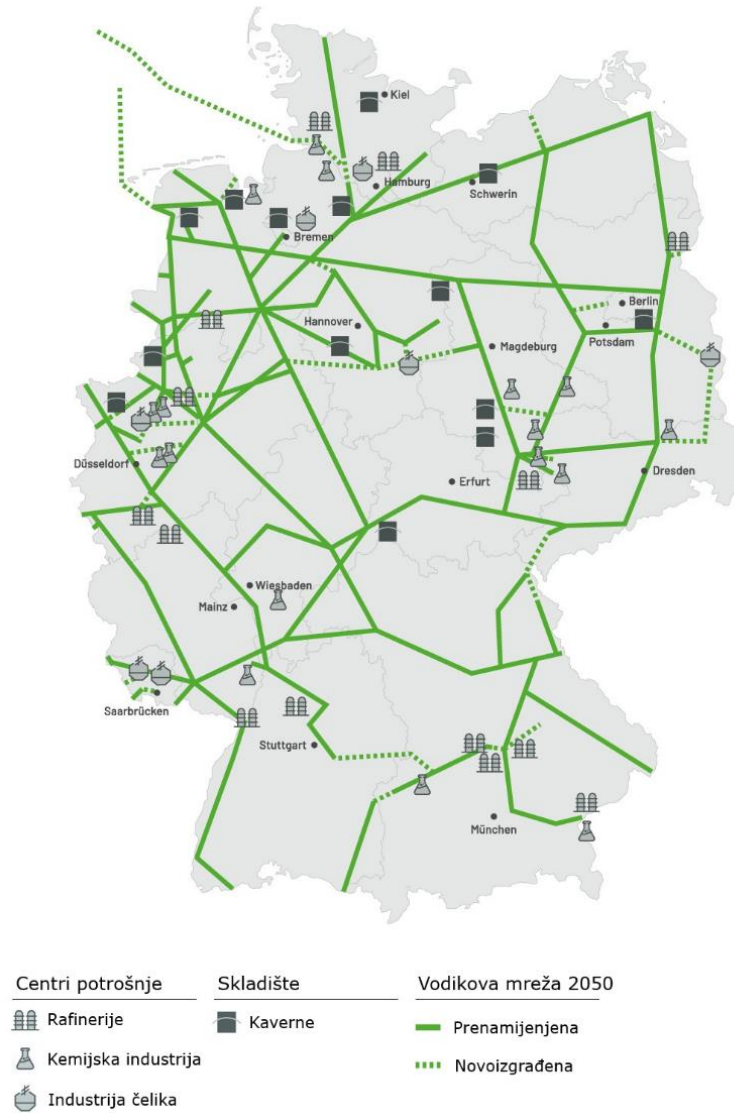
Slika 5-3. Vodikova mreža u Njemačkoj do 2030. godine (FNB Gas, 2022a)

5.4.2.2. Vodikova mreža do 2050. godine

Vodikovom mrežom do 2050. godine (tzv. H2 Net 2050), odnosno vodikovom mrežom za klimatski neutralnu Njemačku, OTS-ovi pokazuju da se infrastruktura za vodik može izgraditi učinkovito i pouzdano uz umjerene troškove ulaganja (FNB Gas, 2022b). Osnova za razvoj H2 Net 2050 je *Scenarij dena-TM95/FNB*. Pretpostavljen je dinamičniji razvoj tržišta vodika, odnosno povećana upotreba vodika u industrijskom sektoru, neznatno povećana upotreba vodika u sektoru prometa i umjerena upotreba vodika u elektranama i sektoru grijanja. Mreža H2 Net 2050 prikazana je na slici 5-4. te je njena ukupna duljina oko 13 300 km, od čega se oko 11 000 km cjevovoda temelji na prenamijenjenim plinovodima.

Procjena troškova za infrastrukturu vodika pokazuje da se učinkovita mreža za transport vodika može implementirati uz relativno niske troškove, odnosno investicijski troškovi će

do 2050. godine iznositi oko 18 milijardi eura (FNB Gas, 2022b). U procjenu troškova nisu uključeni troškovi prenamijene infrastrukture skladišta, podmorskih cjevovoda i cjevovoda za povezivanje pojedinačnih proizvodnih postrojenja i pojedinačnih potrošača.

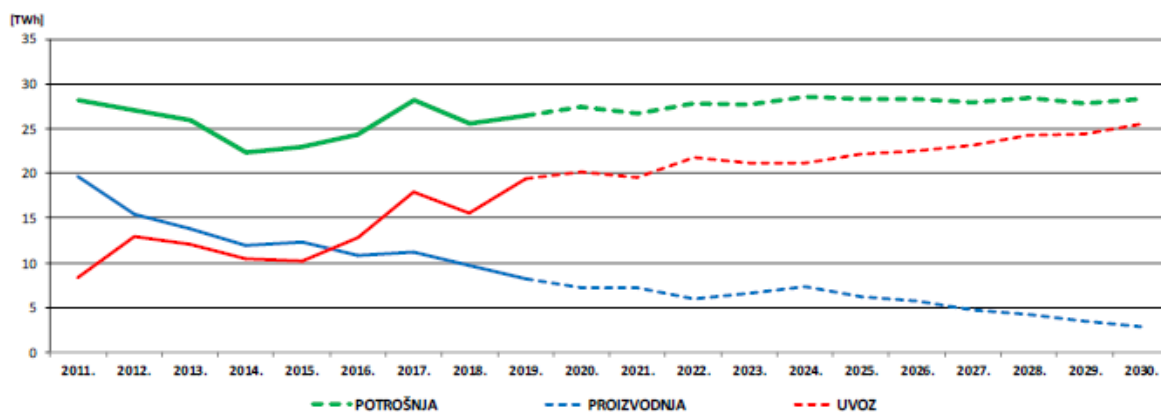


Slika 5-4. Vodikova mreža u Njemačkoj do 2050. godine (FNB Gas, 2022b)

6. DEKARBONIZACIJA PLINSKOG TRANSPORTNOG SUSTAVA U HRVATSKOJ

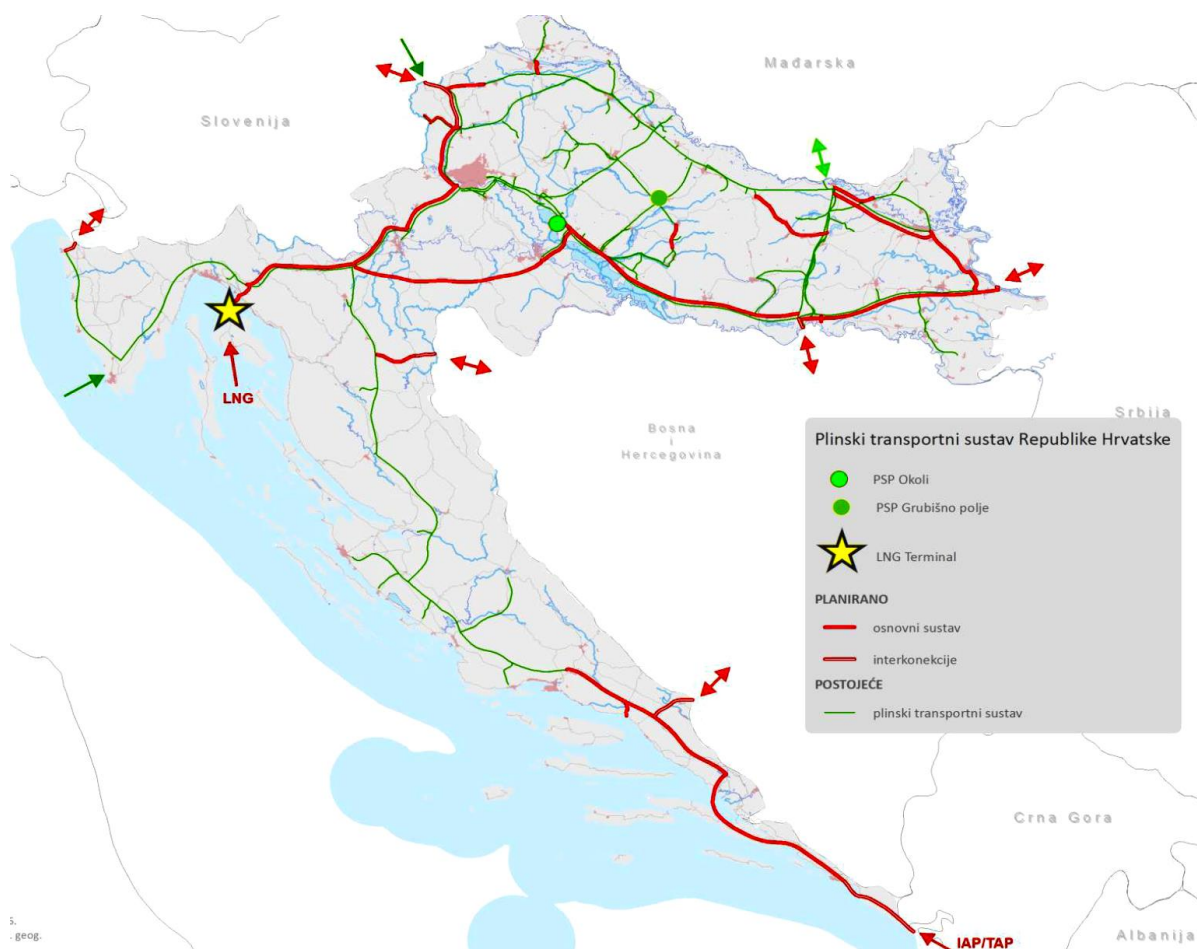
S obzirom na doneseni *Europski zeleni plan* te *Strategiju EU-a za integraciju energetske sustava* i *Strategiju za vodik za klimatski neutralnu Europu*, uz europske operatore transportnog sustava i hrvatski operator transportnog sustava, odnosno Plinacro d.o.o., vidi buduću ulogu biometana i vodika u dekarbonizaciji plinskog transportnog sustava.

Razdoblje u kojem je domaća proizvodnja prirodnog plina zadovoljavala većinu potreba Hrvatske za prirodnim plinom je završilo. Posljednjih nekoliko godina bilježi se sve manji udio domaće proizvodnje u ukupnoj potrošnji plina. Slika 6-1. prikazuje da je 2019. godine domaća proizvodnja zadovoljila oko 30 % potreba za plinom, dok je ostatak potrebnog plina uvezen (PLINACRO, 2020).



Slika 6-1. Potrošnja, proizvodnja i uvoz prirodnog plina od 2011. do 2019. godine te projekcija za razdoblje od 2019. do 2030. godine (PLINACRO, 2020).

Potrošnja plina u Hrvatskoj od 2020. do 2030. godine će lagano rasti zbog povećanja potrošnje kupaca na distribucijskim sustavima i industrijskih potrošača na transportnim sustavima. Domaća proizvodnja plina će se smanjiti, što će dovesti do veće ovisnosti o uvozu koji je 2020. godine iznosio 76 %, a očekuje se porast na 96 % do 2030. godine (PLINACRO, 2020). Zbog toga se javlja potreba uključivanja Hrvatske u europske tokove i tržište prirodnog plina, odnosno bolje povezivanje sa plinskim sustavima susjednih država te novim dobavnim pravcima (slika 6-2.).



Slika 6-2. Povezivanje hrvatskog plinskog transportnog sustava s europskim dobavnim pravcima (PLINACRO, 2020)

6.1. Regulatorni okvir Republike Hrvatske

Razvoj energetskega sektora Republike Hrvatske (RH) se zasniva na osiguravanju kvalitetne, sigurne i pristupačne opskrbe energijom uz smanjenje emisija stakleničkih plina, što mora biti u skladu s ciljevima Europske unije (MZOE, 2020). Stoga se i zakonodavni okvir Hrvatske treba usmjeriti prema niskougljičnoj energiji, odnosno uključiti niskougljične i dekarbonizirane oblike energije u regulatorni okvir koji se odnosi na plinski sektor.

- **Zakon o tržištu plina**

Zakonom o tržištu plina određena su pravila i mjere za sigurnu i pouzdanu proizvodnju, transport i skladištenje plina te druge energetske djelatnosti u plinskom sektoru (NN 18/18). Propisana pravila odnose se ne samo na prirodni plin, nego i na druge vrste plinova koji se mogu na tehnički siguran način utiskivati u tok prirodnog plina te prenositi plinskim sustavom.

Prema Zakonu, operator transportnog sustava je energetska subjekt koji obavlja energetska djelatnost transporta plina i odgovoran je za rad, održavanje i razvoj transportnog sustava. Uz, to operator transportnog sustava je vlasnik transportnog sustava te je dužan izraditi desetogodišnji plan razvoja transportnog sustava u skladu sa Strategijom energetska razvoja i Programom provedbe Strategije energetska razvoja koji se dostavlja Hrvatskoj energetska regulatornoj agenciji (HERA) na odobrenje svake dvije godine.

- ***Mrežna pravila transportnog sustava***

HERA donosi *Mrežna pravila transportnog sustava*, kojima se uređuje opis, razvoj, nadzor i upravljanje transportnim sustavom, pravila priključenja i pravila uravnoteženja transportnog sustava te druga pravila korištenja transportnog sustava (NN 50/18-1009). Mrežna pravila obvezni su primjenjivati operator transportnog sustava, korisnik transportnog sustava i drugi sudionici na tržištu. Prema Mrežnim pravilima kvaliteta plina, određena je kemijskim sastavom plina, sadržajem sumpornih spojeva te točkom rosišta vodika i ugljikovodika, a izračunom se određuju ostali parametri kvalitete plina poput relativne gustoće, ogrjevne vrijednosti, faktora stlačivosti i Wobbe indeksa.

- ***Opći uvjeti opskrbe plinom***

Općim uvjetima opskrbe plinom određeni su ugovorni odnosi između opskrbljivača plinom i krajnjeg kupca te njihove obveze i odgovornosti, a obavezni su ih primjenjivati svi sudionici na tržištu plina (NN 50/18-1003). Osim toga, Općim uvjetima određena je standardna kvaliteta plina, koja je promijenjena *Izmjenama i dopunama Općih uvjeta opskrbe plinom* iz srpnja 2021. godine.

- ***Zakon o biogorivima za prijevoz***

Posljednjim izmjenama i dopunama *Zakona o biogorivima za prijevoz* u hrvatsko zakonodavstvo se preuzima *Direktiva (EU) 2018/2001 o promicanju upotrebe energije iz obnovljivih izvora*. Ovim Zakonom se propisuje proizvodnja, trgovina i skladištenje biogoriva te mjere korištenja i poticanja korištenja obnovljivih izvora energije u prijevozu (NN 52/21-1055). Svrha zakona je smanjenje negativnih utjecaja na okoliš, sigurnost opskrbe ekološki prihvatljivih goriva, odnosno ostvarivanje ciljeva održivog razvoja (NN 94/18-1820). Zakonom je istaknuto da se korištenjem biogoriva te električne energije i vodika iz obnovljivih izvora ostvaruju interesi Republike Hrvatske te se ostvaruje nacionalni cilj od najmanje 10 % udjela obnovljivih izvora energije u prijevozu do 2020. godine, odnosno 14 % do 2030. godine (NN 52/21-1055).

- **Zakon o tržištu električne energije**

Zakonom o tržištu električne energije određuju se pravila za proizvodnju, transport, distribuciju i skladištenje energije te opskrbu električnom energijom. Nadalje, potiče se suradnja Hrvatske s drugim državama članicama Europske unije, regulatornim tijelima i operatorima transportnih sustava te se potiče integracija energije iz obnovljivih izvora i sigurnost opskrbe (NN 111/21-1940). Pri tome se u obnovljive izvore energije ubrajaju energija vjetra, solarna i geotermalna energija te energija iz okoliša, energija plime i oseke, hidroenergije, biomasa, plin dobiven od otpada te plin dobiven iz uređaja za obradu otpremnih voda i bioplina.

6.2. Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine

Vodeći se ciljevima postavljenima *Europskim zelenim planom* te strateškim dokumentima Europske komisije, u ožujku 2022. godine donesena je *Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine*. Strategija predstavlja početak primjene vodika u Hrvatskoj te predstavlja moguće načine proizvodnje, skladištenja i transporta vodika te njegovu upotrebu u raznim sektorima (NN 40/22-492).

Prema *Strategiji energetskeg razvoja RH do 2030. s pogledom na 2050. godinu*, vodik je prepoznat kao gorivo u prometu, a mogućnosti primjene vodika u prometu definiraju *Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o biogorivima za prijevoz* (prema kojem se očekuje uvođenje vodika na hrvatsko tržište) i *Zakon o uspostavi infrastrukture za alternativna goriva* (kojim su definirane tehničke specifikacije mjesta za opskrbu vozila vodikom). Primjena vodika očekuje se i u industriji, za što će biti potrebna modernizacija i modifikacija elektroenergetske mreže i transportnog sustava za plin. Primjena vodika očekuje se u sektorima koje je teško dekarbonizirati te u sektoru prometa i električne energije. Uz to, važna je njegova uloga za skladištenje energije što će potaknuti veću proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

Povezivanjem krajnjih korisnika s obnovljivim izvorima energije, Hrvatska vidi važnost vodika u procesu dekarbonizacije. Osim toga, zahvaljujući povoljnom položaju Hrvatske i povezanosti s državama na jugu EU-a i afričkim državama koje počinju s proizvodnjom velikih količina zelenog vodika, Hrvatska bi mogla u budućnosti postati mjesto ulaza i prijenosa vodika ostalim državama članicama Europske unije (NN 40/22-492).

Kako bi se gospodarstvo RH temeljilo na vodik, potrebno je osigurati potražnju te sustav prijenosa vodika krajnjim korisnicima, odnosno proizvodnja, distribucija i potrošnja moraju biti u skladnom rastu. Dakle, skladištenje i transport vodika su pokretački elementi

proizvodnje vodika, a zahvaljujući razvijenoj transportnoj plinskoj mreži, moguće je postojeće plinovode za prirodni plin koristiti za transport vodika.

Prema *Strategiji energetskeg razvoja RH do 2030. s pogledom na 2050. godinu*, planira se dekarbonizacija instaliranjem novih kapaciteta obnovljivih izvora energije koji će se elektroenergetskim sustavom u obliku električne energije prenositi do krajnjih kupaca, a preostali dio se može koristiti za proizvodnju zelenog vodika. Očekuje se da će se prvi projekti vezani za vodik odnositi na elektrolizatore i električnu energiju iz obnovljivih izvora, uključujući razvoj tehnologije proizvodnje vodika (NN 40/22-492). Uz to, kada dođe do prestanka rada plinskih platformi na sjevernom Jadranu, javlja se mogućnost razvoja odobalnih vjetroelektrana za proizvodnju električne energije i zelenog vodika koji bi se postojećim plinovodom mogao transportirati u Hrvatsku, ali i Italiju.

Kako bi se vodik mogao transportirati cjevovodima potrebno je osigurati adekvatnu infrastrukturu, a prema *Hrvatskoj strategiji za vodik do 2025. godine* se očekuje zakonodavni okvir za transport i skladištenje vodika. Pretpostavlja se da će u početku potražnja za vodikom biti u blizini ili na mjestu proizvodnje te se vodik neće trebati transportirati na veće udaljenosti. Stoga će u početnoj fazi doći do potrebe za miješanjem vodika s prirodnim plinom te će se raditi na planiranju infrastrukture za transport vodika korištenjem i prenamjenom postojeće plinske transportne infrastrukture (NN 40/22-492). U idućoj fazi očekuje se primjena prenamijenjene ili novoizgrađene infrastrukture za transport vodika, odnosno nastojat će se osigurati transport vodika iz područja s velikim potencijalnom proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora do mjesta potražnje.

Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine je u skladu s europskom strategijom za vodik te su i strateški ciljevi RH s time usklađeni – povećanje proizvodnje zelenog vodika, povećanje korištenja obnovljivih izvora energije za proizvodnju vodika, povećanje upotrebe vodika te poticanje istraživanja, razvoja znanosti i vodikovih tehnologija. Kako bi se ostvarili postavljeni strateški ciljevi, određeni su pokazatelji učinka njihove provedbe, što je prikazano u tablici 6-1.

Tablica 6-1. Strateški ciljevi i njihove ciljane vrijednosti do 2030. i 2050. godine (NN 40/22-492)

STRATEŠKI CILJ	POKAZATELJ UČINKA	POČETNA VRIJEDNOST	CILJNA VRIJEDNOST	
		2021/2022	2030	2050
Povećanje proizvodnje obnovljivog vodika	Kapacitet elektrolizatora, 10 ⁻⁶ TW	0	70	2750
Povećanje iskorištavanja potencijala OIE za proizvodnju obnovljivog vodika	Udio vodika u ukupnoj potrošnji energije, %	0	0,2	11
Povećanje korištenja vodika	Broj punionica vodika, broj	0	15	100
Poticanje razvoja znanosti, istraživanja i razvoja vodikovih tehnologija	Broj patenata vezanih za gospodarstvo temeljeno na vodik, broj	0	5	50

Razvoj vodika u Hrvatskoj je pretpostavljen dvama scenarijima i u skladu je sa *Strategijom energetske razvoja RH do 2030. s pogledom na 2050. godinu*. Prvi scenarij je *Scenarij klimatske neutralnosti* kojim su pretpostavljena kretanja potrošnje i proizvodnje vodika do 2050. godine. U tablici 6-2. su prikazani pretpostavljeni kapaciteti elektrolizatora koji koriste električnu energije iz mreže kako bi proizvodili zeleni vodik.

Tablica 6-2. Pretpostavljena potrošnja energije te kapacitet elektrolizatora i količina potrebnog vodika u razdoblju od 2020. do 2050. godine (NN 40/22-492)

Godina	Ukupna potrošnja energije TWh/god.	Udio vodika u ukupnoj potrošnji energije, %	Količina potrebnog vodika, TWh/god.	Kapacitet elektrolizatora, 10 ⁻⁶ TW
2020.	99,101	0,0	0	0
2025.	101,786	0,1	0,086	35
2030.	104,470	0,2	0,174	70
2035.	97,358	1,5	1,221	480
2040.	90,245	3,0	2,277	900
2045.	83,359	6,5	4,554	1800
2050.	76,473	11,0	7,062	2750

Međutim, prema drugom pretpostavljenom scenariju – *Scenariju ubrzanog razvoja gospodarstva zasnovanog na vodik*, ciljevi se mogu povisiti. Pretpostavljeni su kapaciteti elektrolizatora od 7328,7·10⁻⁶ TW do 2050. godine, uz udio vodika od 15 % u ukupnoj potrošnji energije (NN 40/22-492).

Procijenjeni troškovi infrastrukture za vodik uključuju troškove elektrolizatora, kompresora i spremnika za vodik, te prema tome prvi scenarij uključuje kapitalnu investiciju od 23,8 milijardi HRK, dok drugi scenarij zahtjeva investiciju od 70,2 milijardi HRK. Uz to procijenjena je prosječna godišnja investicija koja bi u prvom scenariju iznosila 795 milijuna HRK, a u drugom 2,34 milijardi HRK (NN 40/22-492). Dakle, potrebno je osigurati dovoljno ulaganja kojima će se potaknuti rast i razvoj gospodarstva koje se zasniva na vodiku, a važno je da ulaganja ne uzrokuju značajna pogoršanja troškova krajnjih kupaca što je omogućeno sredstvima iz EU fondova.

6.3. Infrastruktura za transport prirodnog plina u Hrvatskoj

Operator plinskog transportnog sustava u Hrvatskoj je Plinacro d.o.o. koji je odgovaran za izgradnju i sigurno upravljanje plinskim transportnim sustavom. Plinacro upravlja mrežom plinovoda ukupne duljine 2 531 km, od kojih je 1 579 km radnog tlaka 50 bar, a preostalih 952 km je radnog tlaka 75 bar (PLINACRO, 2020). Prema *Desetogodišnjem planu razvoja plinskog transportnog sustava Republike Hrvatske 2021. – 2030.*, transportni sustav RH čini 157 mjerno-redukcijskih stanica, 1 kompresorska stanica, 82 čistačke stanice i 142 blokadne stanice. Plinski transportni sustav povezan je interkonekcijama s Mađarskom i Slovenijom, odnosno s regionalnim i europskim plinskim sustavom. Uz to, preko LNG terminala na otoku Krku, povezan je i sa svjetskim tržištem LNG-a.

6.3.1. Kvaliteta plina

Svi plinovi koji zadovoljavaju zahtjeve standardne kvalitete plina iz *Općih uvjeta za opskrbu plinom* mogu se utiskivati u transportni sustav Plinacro-a, odnosno plinski transportni sustav u mogućnosti je primiti bioplin, miješani plin, plin iz biomase i UPP u mjeri u kojoj se mogu tehnički i sigurno umješavati u tok prirodnog plina (NN 18/18). *Izmjenama i dopunama Općih uvjeta opskrbe plinom* iz 2021. godine standarda kvaliteta plina se mijenja te su dane vrijednosti pri tlaku od 1,01325 bar i različitim referentnim uvjetima (temperatura izgaranja/temperatura plina), a vrijednost metanskog broja određena prema standardu *CEN EN 16726*. Međutim, utiskivanje plinova poput biometana i vodika u mrežu prirodnog plina se ne spominju u hrvatskom zakonodavstvu.

Tablica 6-3. Standardna kvaliteta plina u RH prema *Izmjenama i dopunama Opih uvjetima opskrbe plinom* (NN 100/21-1815)

PRIRODNI PLIN		Referentni uvjeti	
		25/0 °C	15/15 °C
A. Kemijski sastav, mol%			
Ugljični dioksid (CO ₂)	maksimalno	2,5	
Kisik (O ₂)	maksimalno	0,001	
B. Sadržaj sumpora, mg/m³			
Sumpor ukupni (S)	maksimalno	30	
Sumporovodik i karbonil sulfid ukupno (H ₂ S+COS)	maksimalno	5	
Merkaptani (RSH)	maksimalno	6	
C. Gornja ogrjevna vrijednost Hg, kWh/m³			
	minimalno	10,96	10,40
	maksimalno	12,75	12,09
D. Donja ogrjevna vrijednost Hd, kWh/m³			
	minimalno	–	9,37
	maksimalno	–	10,89
E. Gornji Wobbe – indeks Wg, kWh/m³			
	minimalno	13,60	12,90
	maksimalno	15,81	15,00
F. Donji Wobbe – indeks Wd, kWh/m³			
	minimalno	–	11,62
	maksimalno	–	13,51
G. Relativna gustoća d			
	minimalno	0,555	
	maksimalno	0,70	
H. Točka rosišta, °C pri tlaku od 70 bar			
vode		-8	
ugljikovodika		-2	
I. Metanski broj			
	minimalno	75	
J. Plin neodoriziran (osim plina u distribucijskom sustavu), bez mehaničkih primjesa, smola ili spojeva koji tvore smolu			

6.4. Razvoj plinske mreže u Hrvatskoj

Promatrajući teritorijalnu razvijenost, kapacitete, povezanost sa transportnim sustavima susjednih država te tehnološkoj i operativnoj sigurnosti, transportni sustav RH je dobro razvijen, ali neophodan je daljnji razvoj. *Strategijom energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu* određene su strateške smjernice izgradnje plinske infrastrukture: plinovodi za transport prirodnog plina i biometana kao dio visokotlačne plinovodne mreže, podzemna skladišta plina, objekte za prihvata, skladištenje te uplinjavanje ili dekompresiju UPP-a i SPP-a i ostalu potrebnu opremu za rad sustava i omogućavanje dvosmjernog kapaciteta (PLINACRO, 2020).

Transport vodika prema *Desetogodišnjem planu razvoja plinske mreže 2021. – 2030. godine*, moguć je bez dodatnih tehničkih zahvata u regulacijskoj i mjernoj opremi pri čemu udio vodika može biti do 50 % u smjesi metana. Za transport čistog vodika kroz čelične cjevovode još nije dokazan utjecaj vodika na trajnost i integritet stjenke cjevovoda, a pojava oštećenja koju uzrokuje vodik ovisi o vrsti materijala, koncentraciji vodika i radnim parametrima.

Transportni sustav Plinacro-a koji radi na tlaku od 50 bar, većinom je izrađen od čelika klase API 5L B i X52 te se smatra sigurnim za transport visokih koncentracija vodika. Plinovodni sustav radnog tlaka 70 bara, najvećim je dijelom izrađen od čelika X70 koji ima malu osjetljivost na rast pukotina izazvanih vodikom te se smatra materijalom koji je prikladan za transport visoke koncentracije vodika (PLINACRO, 2020). U konačnici, plinski transportni sustav Plinacra može prihvatiti i transportirati visoke koncentracije vodika.

Po uzoru na europske operatore transportnih sustava, Plinacro vidi buduću ulogu plinskog sustava za transport vodika i biometana. Stoga, hrvatski operator transportnog sustava prati razvoj i tehnologije transporta dekarboniziranih plinova te radi na planovima izgradnje i održavanju plinske transportne infrastrukture. U tablici 6-4. su predstavljena planirana ulaganja u izgradnju i rekonstrukciju plinskog transportnog sustava do 2030. godine.

Tablica 6-4. Planirana ulaganja Plinacro-a u razvoj plinskog transportnog sustava do 2030. godine (HERA, 2020)

UKUPNA PLANIRANA ULAGANJA U RAZVOJ PLINSKOG TRANSPORTNOG SUSTAVA ZA RAZDOBLJE 2021.-2030.											<i>u 000 kn</i>
	2021	2022.	2023.	2024.	2025.	2026.	2027.	2028.	2029.	2030.	2021.-2030.
Plinovodi	35.997	103.168	802.400	1.504.984	949.239	332.021	1.389.350	1.510.000	0	28.771	6.655.930
Mjerno redukcijske stanice	14.196	17.042	10.992	23.592	17.750	0	0	1.875	1.875	0	87.322
Plinski čvorovi	4.070	18.146	20.625	22.500	0	0	0	0	0	0	65.341
Napuštanje objekata za koje se očekuje da će biti izvan funkcije	100	0	7.525	0	0	0	0	0	0	0	7.625
Kompresorske stanice	0	7.500	15.000	75.000	112.500	60.000	36.000	34.740	270.000	70.260	681.000
Nadzor i upravljanje	7.725	11.850	15.375	14.813	7.875	5.400	5.475	10.875	12.450	11.625	103.463
Informatički sustavi	4.500	5.000	4.500	4.500	5.000	4.500	4.500	5.000	4.500	4.500	46.500
Pogonski objekti	0	3.750	5.250	0	0	0	0	0	0	0	9.000
Razvoj novih tehnologija	2.000	2.375	17.375	16.375	16.375	375	375	375	375	375	56.375
Optimizacija sustava i napuštanje neperspektivnih objekata	0	10.000	16.000	0	0	0	0	0	0	0	26.000
SVEUKUPNO	68.587	178.831	915.043	1.661.763	1.108.739	402.296	1.435.700	1.562.865	289.200	115.531	7.738.555

6.4.1. Scenariji razvoja plinske infrastrukture u Hrvatskoj

Kako bi se provela energetska tranzicija prema sustavima u kojima će prevladavati varijabilni obnovljivi izvori energije, prirodni plin će imati vrlo važnu ulogu. Diversifikacija dobavnih pravaca i razvoj plinske infrastrukture su neizostavni u postizanju sigurnog i stabilnog tržišta prirodnog plina. Hrvatski potencijal obnovljivih izvora energije je dovoljan da bi se zadovoljile potrebe za električnom energijom, ali i za djelomično zadovoljavanje potreba za promet i toplinu.

Da bi se potaknula dekarbonizacija energetskog sektora i povećao udio električne energije iz OIE, u veljači 2020. godine je donesena *Strategija energetskog razvoja RH do 2030. s pogledom na 2050. godinu*. Strategija je usmjerena prema viziji niskougljične energije uz osiguravanje pristupačne, sigurne i kvalitetne opskrbe energijom bez dodatnog opterećenja državnog proračuna (NN 25/20-602). Razvoj energetskog sustava RH je u skladu s europskim ciljevima ublažavanja klimatskih promjena, odnosno teži se smanjenju emisija stakleničkih plinova, povećanju energetske učinkovitosti i udjela OIE, povećanju sigurnosti i kvalitete opskrbe energijom te se radi na razvoju unutarnjeg europskog tržišta.

Strategijom je promatrano kratkoročno razdoblje – do 2030. godine, te dugoročno razdoblje – do 2050. godine, u kojima će se provesti mjere za ostvarenje željenih ciljeva i uvesti promjene u energetske sektoru.

Glavni cilj hrvatskog energetske sektora je smanjenje emisija stakleničkih plinova te su u skladu s time razmatrana 3 scenarija (NN 25/20-602):

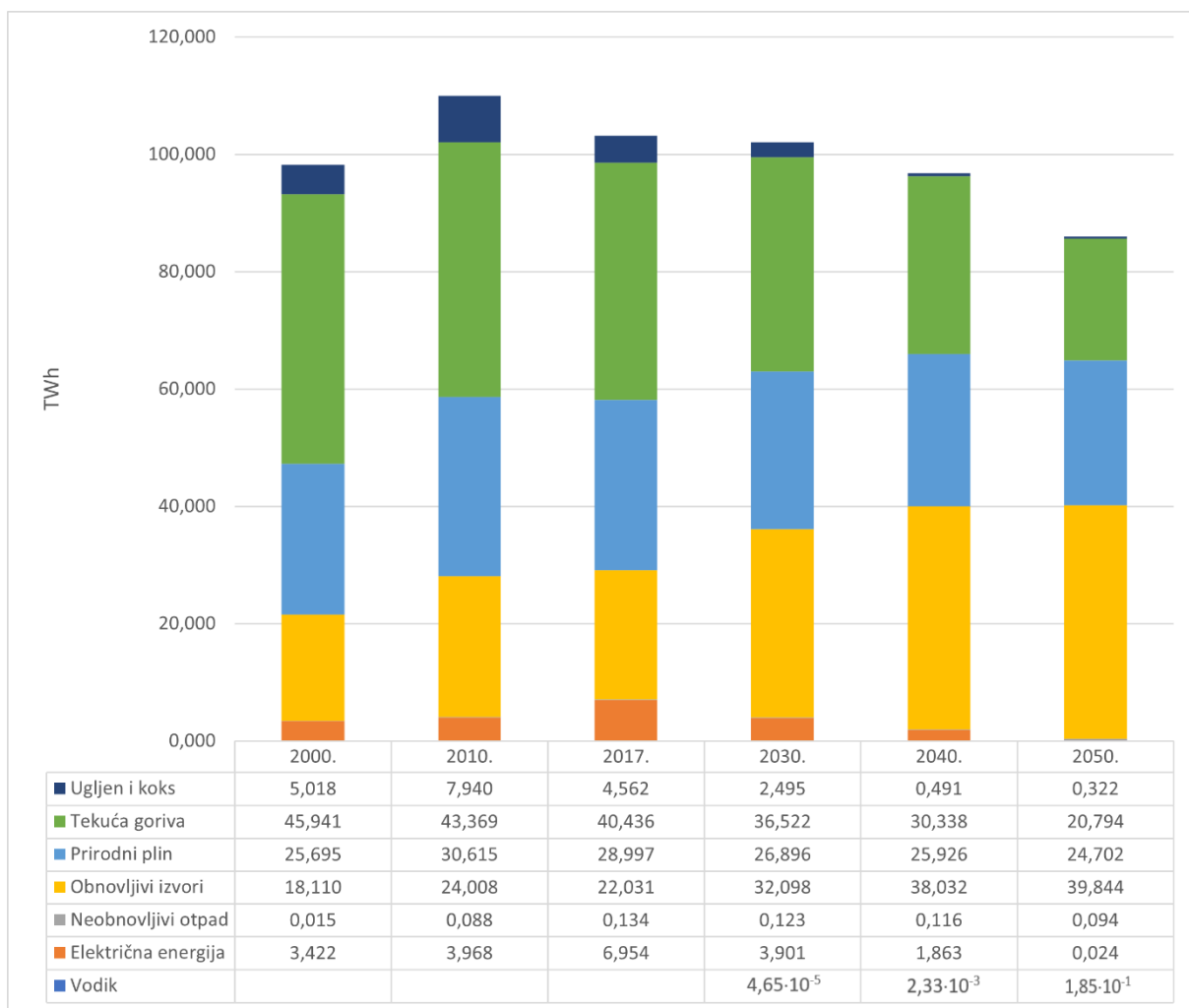
- *Scenarij razvoja uz primjenu postojećih mjera, odnosno Scenarij 0 ili S0*, koji se odnosi na nastavak primjene postojećih mjera promjene energetske sektora,
- *Scenarij ubrzane energetske tranzicije, odnosno Scenarij 1 ili S1*, pretpostavlja kako je potrebna suradnja na području EU-a, ali i u međunarodna suradnja kako bi se postigli ciljevi Pariškog sporazuma. Pri tome se na području proizvodnje, transporta, distribucije i potrošnje energije radi na poboljšanju energetske učinkovitosti,
- *Scenarij umjerene energetske tranzicije, Scenarij 2 ili S2*, sličan je scenariju ubrzane energetske tranzicije, a razlikuju ga postavljeni niži ciljevi u odnosu na S1 scenarij.

Tablica 6-5. Pretpostavljeni ciljevi smanjenja emisija, udjela OIE prema scenarijima S0, S1 i S2 do 2030. i 2050. godine (NN 25/20-602)

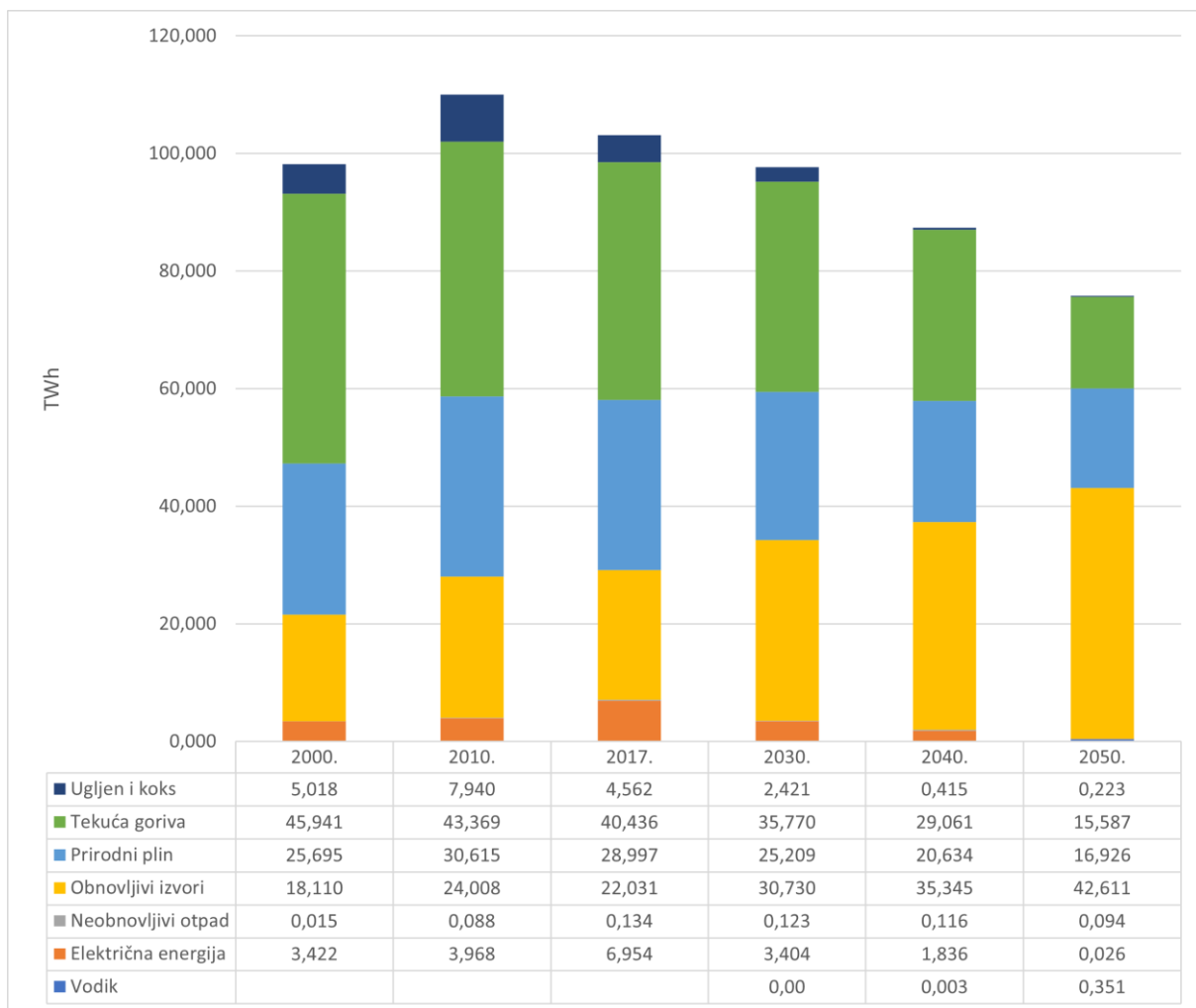
	Početno stanje	S0		S1		S2	
	2016./2017.	do 2030.	do 2050.	do 2030.	do 2050.	do 2030.	do 2050.
Očekivano smanjenje emisije stakleničkih plinova**	21, 8 %	32, 8 %	49, 3 %	37, 5 %	74, 4 %	35, 4 %	64, 3 %
Udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije	27, 3 %	35, 7 %	45, 5 %	36, 7 %	65, 6 %	36, 6 %	53, 2 %
Udio OIE u proizvodnji električne energije	45 %	60 %	82 %	66 %	88 %	61 %	83 %

Promatrajući tablicu 6-6., *Scenariji S1 i S2* u razdoblju do 2030. godine su vrlo slični, dok se u razdoblju do 2050. godine, *Scenarij S1* smatra boljom opcijom zbog većeg smanjenja emisija i većeg udjela OIE, većoj energetskej obnovi zgrada te većem udjelu električnih i hibridnih vozila (NN 25/20-602). Kao referentni scenarij, odabran je *Scenarij umjerene tranzicije*, a ciljevi *Scenarija ubrzane tranzicije* ostvarit će se ovisno o mogućnostima energetske obnove zgrada i brzini promjena u sektoru prometa jer oni imaju velik utjecaj na potrošnju energenata.

Prema *Scenariju S1* i *Scenariju S2* pretpostavlja se da će se ukupna potrošnja energije smanjiti do 2030. godine, odnosno do 2050. godine, što prikazuju slika 6-3. i slika 6-4. Udio prirodnog plina u ukupnoj potrošnji energije će se smanjiti do 2030. godine prema oba scenarija, ali prema *Scenariju S2* će blago narasti njegov udio na 28,7 % do 2050. godine, dok će prema *Scenariju S1* pasti na 22,3 % do 2050. godine (NN 25/20-602). Velika se promjena predviđa za obnovljive izvore energije čiji će udio konstantno rasti. Uz to, očekuje se udio vodika od 0,2 % prema scenariju *S2* te od 0,5 % prema scenariju *S1* do 2050. godine.



Slika 6-3. Ukupna potrošnja energije prema *Scenariju S2* (NN 25/20-602)



Slika 6-4. Ukupna potrošnja energije prema *Scenariju SI* (NN 25/20-602)

6.4.1.1. Razvoj plinske mreže do 2030. i 2050. godine

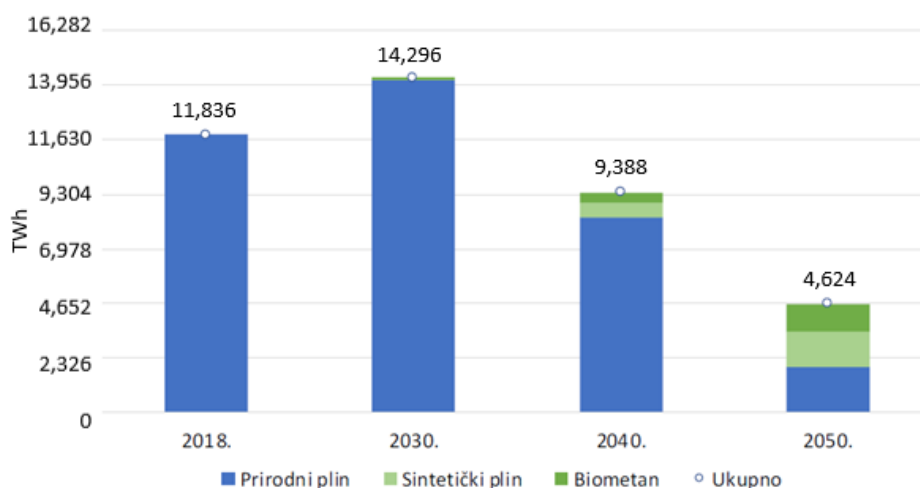
Glavni dokument na kojem će se temeljiti energetska razvoj RH do 2030. godine je *Integrirani nacionalni energetski i klimatski plan*. Kako bi se ostvarili ciljevi postavljeni do 2030. godine potrebna je suradnja svih sektora, a neophodno je uskladiti provedbene dokumente i preuzete obveze, odnosno izrada i implementacija regulatornog okvira.

Prelazak na niskougljično gospodarstvo, obilježit će prirodni plin zbog značajno manje emisije stakleničkih plinova u odnosu na druga fosilna goriva (NN 25/20-602). Pri tome se očekuje korištenje plinskog sustava za transport ugljično-neutralnog metana (sintetični metan ili biometan), odnosno dekarboniziranih plinova. Razvoj tržišta alternativnih oblika energije u prometu potaknut će izgradnja nove infrastrukture za korištenje električne energije, vodika, biogoriva, ukapljenog naftnog plina, ukapljenog prirodnog plina te stlačenog prirodnog plina. Dakle, potrebno je iskoristiti učinkovite opcije kako bi se ostvarili postavljeni ciljevi udjela OIE u prometu.

Nadalje, očekuje se smanjenje potrošnje energije do 2050. godine uz kontinuirani prelazak s fosilnih goriva na električnu energije iz OIE i niskougličnih oblika energije te povećano korištenje ovih oblika energije. Potreban je tehnološki razvoj energetske sustava i promjene na strani potrošnje da bi se postavljeni ciljevi dosegli (NN 25/20-602).

Međutim, s obzirom na ambiciozne ciljeve EU-a i postizanju klimatske neutralnosti do 2050. godine, izrađen je scenarij za postizanje većih smanjenje emisija do 2030. godine i klimatske neutralnosti do 2050. godine u RH, tzv. *Nulti scenarij*. Dakle, scenarijem su utvrđene mjere i potrebna ulaganja kojima bi se ciljano smanjenje emisija od 73 % u 2050. godini prema *SI scenariju* postavilo na 100 % (EIHP i MGOR, 2020). U skladu s time, prirodni plin će se morati u potpunosti ukloniti do 2050. godine, a postojeća plinska transportna mreža se može prenamijeniti za prijenos biometana, vodika ili plina proizvedenog iz električne energije.

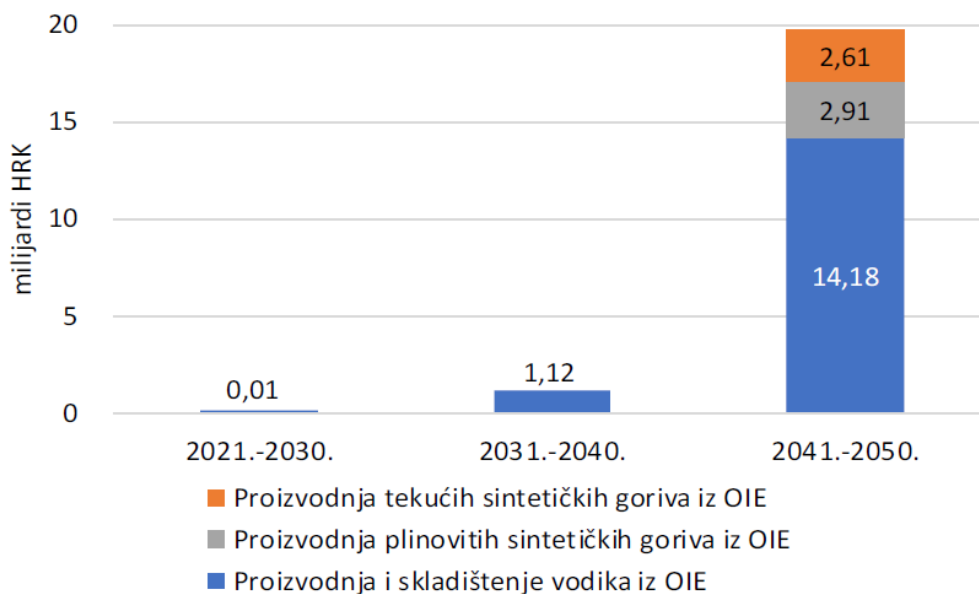
U početku se plinska mreža može koristiti za utiskivanje vodika i miješanje s prirodnim plinom, a trenutno je moguće bez velikih promjena u infrastrukturi plina utiskivati do 20 % vodika. Ipak, očekuje se rast proizvodnje prirodnog plina do 2030. godine, nakon čega slijedi pad što se zamjenjuje porastom proizvodnje sintetičkog plina i biometana (slika 6-5.). Očekuje se da će proizvodnja prirodnog plina do 2050. godine iznositi 1,907 TWh, sintetičkog plina 1,907 TWh i biometana 1,198 TWh (EIHP i MGOR, 2020).



Slika 6-5. Pretpostavljena proizvodnja određenih plinova prema *Nultom scenariju* (EIHP i MGOR, 2020)

Nulti scenarij predviđa široku upotrebu vodika i sintetičkih goriva do 2050. godine, a njihova je važna prednost što se mogu utiskivati u postojeću plinsku mrežu. Međutim, niska energetska učinkovitost proizvodnog procesa zahtjeva veće količine izvora električne

energije (EIHP i MGOR, 2020). Nakon 2040. godine predviđa se proizvodnja vodika procesom elektrolize, odnosno primjenom električne energije iz obnovljivih izvora. Pri tome se kao investicijski trošak podrazumijeva postrojenja za proizvodnju vodika i odgovarajući sustav skladištenja. Dok se kao investicijski trošak za sintetička goriva podrazumijeva postrojenje za mehanizaciju i postrojenje metanolske sinteze. Ukupna ulaganja u proizvodnju i skladištenje vodika te proizvodnju sintetičkih goriva u razdoblju od 2021. do 2050. godine prikazana su na sljedećoj slici.



Slika 6-6. Procijenjena ulaganja u proizvodnju sintetičkih goriva i vodika te skladištenje vodika do 2050. godine prema *Nultom scenariju* (EIHP i MGOR, 2020)

Kako bi se plinski sektor i dalje razvijao, potrebno je nastaviti procese povezivanja sa susjednim državama i razviti alternativne dobavne pravce kojima će se omogućiti veća dostupnost plina i učinkovitije korištenje plinskog transportnog sustava (EIHP i MGOR, 2020). Uz to je potrebno uključiti obnovljive i niskougljične plinove u hrvatski plinski transportni sustav kako bi se brzo i učinkovito postigli ciljevi postavljeni doneseni europskim i hrvatskim strategijama te zakonodavstvom.

7. ZAKLJUČAK

Europski zeleni plan i cilj klimatske neutralnosti, ojačali su svijest država članica EU-a o važnosti smanjenja emisija stakleničkih plinova i potrebi da se smanji upotreba fosilnih goriva. Međutim, prelazak na obnovljive izvore energije nije jednostavna opcija, stoga će važnu ulogu imati niskougljični i obnovljivi plinovi u sektorima koje je teško dekarbonizirati. *Strategija za vodik za klimatsku neutralnu Europu* predstavlja ambiciozne ciljeve razvoja vodika kao prioritetskog energenta koji je ključan za ostvarenje klimatske neutralnosti do 2050. godine. Uz to, doneseni su paket *Spremni za 55%* kojim se predlaže revizija europskog zakonodavstva kako bi se postigao cilj smanjenja emisija stakleničkih plinova za najmanje 55 % do 2030. godine i plan *REPowerEU* kojim su predstavljene mjere smanjena ovisnosti o fosilnim gorivima iz Rusije i ubrzane tranzicije. Zakonodavni okvir Europske unije se mijenja i prilagođava postavljenim energetske i klimatskim ciljevima što će potaknuti ne samo države članice, nego i treće zemlje da slijede primjer EU-a.

U energetske tranziciji prema neto nula emisija, vodik i biometan će imati ključnu ulogu u kombinaciji s električnom energijom iz obnovljivih izvora. Dobro razvijena mreža za transport plina u Europskoj uniji i pojedinim državama će uvelike olakšati dekarbonizaciju plinskog transportnog sustava. Transport vodika nije jednostavan budući da je ogrjevna vrijednost vodika tri puta manja od ogrjevnosti prirodnog plina te se očekuju puno veći napori za kompresiju. Transport vodika cjevovodima moguć je utiskivanjem vodika u tok prirodnog plina do određene razine ili prenamjenom postojećih cjevovoda za transport vodika. Obje opcije nisu jednostavne te iziskuju dodatne troškove i prilagodbu opreme. Dakle, potrebna je modernizacija i modifikacija sustava kako bi se vodik sigurno transportirao od mjesta proizvodnje do mjesta potražnje.

Njemačka je ozbiljno prihvatila ciljeve koje je postavila Europska unija te su postavljeni ambiciozni nacionalni ciljevi koji uključuju klimatsku neutralnost do 2050. godine i razvoj vodikove infrastrukture do 2040. godine. Također se njemačko zakonodavstvo ubrzano mijenja kako bi se potaknula i olakšala implementacija niskougljičnih i obnovljivih plinova. S druge strane, Hrvatska polako uvodi potrebu za primjenom i transportom niskougljičnog i obnovljivog plina. Prema podacima Plinacro-a, transportni sustav RH može prihvatiti visoke koncentracije vodika, a utjecaj čistog vodika na postojeće čelične cjevovode nije istražen. Prateći europske trendove, objavljen je *Nulti scenarij* prema kojem bi Hrvatska mogla postići klimatsku neutralnost 2050. godine, pri čemu je ciljano smanjenje emisija povećano na 100 %. Dakle, očekuje se prestanak korištenja prirodnog plina, a povećana upotreba biometana i vodika te drugih plinova proizvedenih iz električne energije. Hrvatska bi zahvaljujući

povoljnom geografskom položaju i razvijenom transportnom sustavu, trebala raditi na izgradnji novih plinovoda za transport vodika iz južne Europe prema središtu kontinenta. Pri tome bi važnu ulogu mogao imati i terminal za UPP na otoku Krku koji bi se mogao koristiti za dobavu zelenog vodika.

Sve je snažnija potreba EU-a da se oslobodi ovisnosti o uvozu prirodnog plina iz zemalja koje nisu članice EU-a. Stoga su i ciljevi za smanjenje emisija stakleničkih plinova te potreba tranzicije prema niskougljičnim oblicima energije vrlo ambiciozni. Međutim, neophodna je suradnja, integracija energetskeg sustava i znatna financijska ulaganja kako bi se željeni ciljevi ostvarili u relativno kratkom vremenskom periodu.

8. LITERATURA

1. ACER, 2020. *ACER Report on NRAs Survey – Hydrogen, Biomethane, and Related Network Adaptations*. Ljubljana, Slovenija
2. ACER, 2021. *Possible regulation of hydrogen networks*
3. ALTFELD, K., PINCHBECK, D., 2013. *Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems*
4. BELAMARIĆ. B., , BOŠNJAK, R., 2021. *Smjernice i mehanizmi provedbe energetske tranzicije Europske unije s posebnim naglaskom na plinski sektor*. Zbornik radova, 36. Međunarodni znanstveno-stručni skup stručnjaka za plin. Str. 60 – 70
5. CERNIAUSKAS, S., CHAVEZ JUNCO, A.J., GRUBE, T., ROBINIUS, M., STOLTEN, D., 2020. *Options of natural gas pipeline reassignment for hydrogen: Cost assessment for a Germany case study*. International Journal of Hydrogen Energy. 45(21). str. 12095-12107
6. COM, 2019. Komunikacija Komisije Europskom parlamentu, Europskom vijeću, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i Odboru regija Europski zeleni plan, COM (2019) 640, final
7. COM, 2020a. Komunikacija Komisije Europskom parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i Odboru regija Energija za klimatski neutralno gospodarstvo: strategija EU-a za integraciju energetske sustava, COM (2020) 299, final
8. COM, 2020b. Komunikacija Komisije Europskom parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i Odboru regija Strategija za vodik za klimatski neutralnu Europu, COM/2020/301, final
9. COM, 2020c. Prijedlog Uredbe Europskog parlamenta i Vijeća o smjernicama za transeuropsku energetske infrastrukturu i stavljanju izvan snage Uredbe (EU) br. 347/2013, COM/2020/824, final
10. COM, 2021a. Prijedlog Direktive Europskog parlamenta i Vijeća o zajedničkim pravilima za unutarnja tržišta obnovljivih i prirodnih plinova te vodika, COM/2021/803, final
11. COM, 2021b. Prijedlog Uredbe Europskog parlamenta i Vijeća o uvođenju infrastrukture za alternativna goriva i stavljanju izvan snage Direktive 2014/94/EU Europskog parlamenta i Vijeća, COM(2021) 559, final
12. DIREKTIVA (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora
13. DIREKTIVA (EU) 2019/692 Europskog parlamenta i Vijeća od 17. travnja 2019. o izmjeni Direktive 2009/73/EZ o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište prirodnog plina

14. DIREKTIVA 2009/73/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 13. srpnja 2009. o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište prirodnog plina i stavljanju izvan snage Direktive 2003/55/EZ
15. DIREKTIVA 2014/94/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 22. listopada 2014. o uspostavi infrastrukture za alternativna goriva
16. ENERGIEWIRTSCHAFTSGESETZ VOM 7. Dana 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), BGBl. I S. 1970, 3621
17. ENTSO-E, ENTSOG. 2021. *TYNDP 2022 – Draft Scenario Report*. Bruxelles, Belgija
18. ENTSOG, 2016. *Impact analysis of a reference to the EN16726:2015 in the network code on Interoperability and Dana Exchange*
19. ENTSOG, 2018. *A flexible approach for handling different and varying gas qualities*
20. ENTSOG, 2019. *ENTSOG 2050 Roadmap for Gas Grids*. Bruxelles, Belgija
21. ENTSOG, 2020a. *Ten-year network development plan 2020 – Infrastructure Report*. Bruxelles, Belgija
22. ENTSOG, 2020b. *Ten-year network development plan 2020 – System Assessment Report*. Bruxelles, Belgija
23. ERNEUERBARE-ENERGIEN-GESETZ VOM 21. Dana 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23. Mai 2022 (BGBl. I S. 747) geändert worden ist, BGBl. I S. 747
24. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020. *The National Hydrogen Strategy*. Berlin, Njemačka
25. FNB Gas, 2021a. *Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032, Szenariorahmen*. Berlin, Njemačka
26. FNB Gas, 2021b. *Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030*. Berlin, Njemačka
27. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU), 2020. *Germany – Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans*
28. Gas for Climate, 2019. *The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system*. Utrecht, Nizozemska
29. Gas for Climate, 2020a. *Gas Decarbonisation Pathways 2020–2050*. Utrecht, Nizozemska
30. Gas for Climate, 2020b. *European Hydrogen Backbone, How a dedicated hydrogen infrastructure can be created*. Utrecht, Nizozemska
31. Gas for Climate, 2021b. *The future role of biomethane*. Utrecht, Nizozemska
32. Gas for Climate, 2021c. *Extending the European Hydrogen Backbone, A EUROPEAN HYDROGEN INFRASTRUCTURE VISION COVERING 21 COUNTRIES*. Utrecht, Nizozemska

33. Gas for Climate, 2022. *European Hydrogen Backbone, A EUROPEAN HYDROGEN INFRASTRUCTURE VISION COVERING 28 COUNTRIES*. Utrecht, Nizozemska
34. GASNETZENTGELTVERORDNUNG VOM 25. Dana 2005 (BGBl. I S. 2197), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 27. Dana 2021 (BGBl. I S. 3229) geändert worden ist, BGBl. I S. 3229
35. GASNETZZUGANGSVERORDNUNG VOM 3. September 2010 (BGBl. I S. 1261), die zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 16. Dana 2021 (BGBl. I S. 3026) geändert worden ist, BGBl. I S. 3026
36. Hydrogen Europe, 2021. *HYDROGEN ACT- Towards the Creation of the European Hydrogen Economy*. Bruxelles, Belgija
37. IGU, 2021. *Global Renewable & Low-Carbon Gas Report*. Izvješće. London, Engleska
38. KOONAPHAPDEELERT, S., AGGARANGSI, P., MORAN, J., 2020. *Biomethane Production and Applications*. Switzerland: Green Energy and Technology, Springer.
39. KRSNIK S., PAVLOVIĆ D., 2020. *Energetska tranzicija – utjecaj primjene vodika na kvalitetu plina u transportu sustavu s ciljem dekarbonizacije plinskih sustava*. Zbornik radova, 35. Međunarodni znanstveno-stručni skup stručnjaka za plin, str. 49-59
40. KUNZ, F., VON HIRSCHHAUSEN, C., ZECH, M., FELTEN, B., WEBER, C., KENDZIORSKI, M., HAUSER, P., SCHILL, W., WEIBEZAHN, J., ZEPTER, J.M., MÖST, D., HEIDARI, S., 2018. *Electricity, Heat, and Gas Sector Dana for Modeling the German System*. Technische Universität Dresden, Fakultät der Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für Energiewirtschaft. Dresden, Njemačka
41. EIHP, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja (MGOR), 2020. *Izrada scenarija za postizanje većih smanjenja emisija do 2030. godine i klimatske neutralnosti u Republici Hrvatskoj do 2050. godine za energetske sektor*. Zagreb, Hrvatska
42. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike (MZOE), 2020. *Strategija energetskog razvoja RH do 2030 s pogledom na 2050. godinu*. Zagreb, Hrvatska
43. Narodne novine br. 100/21-1815. Izmjene i dopune Općih uvjeta opskrbe plinom Zagreb: Narodne novine d.d.
44. Narodne novine br. 111/21-1940. Zakon o tržištu električne energije Zagreb: Narodne novine d.d
45. Narodne novine br. 18/18. Zakon o tržištu plina. Zagreb: Narodne novine d.d.
46. Narodne novine br. 25/20-602. Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu. Zagreb: Narodne novine d.d.

47. Narodne novine br. 40/22-492. Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine. Zagreb: Narodne novine d.d.
48. Narodne novine br. 50/18. Pravila o organizaciji tržišta plina. Zagreb: Narodne novine d.d.
49. Narodne novine br. 50/18-1003. Opći uvjeti opskrbe plinom. Zagreb: Narodne novine d.d.
50. Narodne novine br. 50/18-1009. Mrežna pravila transportnog sustava. Zagreb: Narodne novine d.d.
51. Narodne novine br. 52/21-1055. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o biogorivima za prijevoz. Zagreb: Narodne novine d.d.
52. Narodne novine br. 94/18-1820. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o biogorivima za prijevoz. Zagreb: Narodne novine d.d.
53. OGDEN, J., MYERS JAFFE, A., SCHEITRUM, D., MCDONALD, Z., MILLER M., 2017. *Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: Insights from the literature*. Energy Policy. 115. str. 317-327
54. Pariški sporazum, 2016. Pariz, Francuska
55. PLINACRO, 2020. *Desetogodišnji plan razvoja plinskog transportnog sustava Republike Hrvatske 2021. – 2030*. Zagreb, Hrvatska
56. SCHMIDT, O., GAMGHIR, A., STAFFELL, I., HAWKES, A., NELSON, J., FEW, S., 2017. *Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study*. International Journal of Hydrogen Energy, 42 (52), str. 30470-30492.
57. SIEMENS, 2020. *Hydrogen infrastructure – the pillar of energy transition*
58. STRELEC, V., et al., 2001. *Plinarski priručnik*, Zagreb, Energetika marketing
59. Uredba (EU) 2019/942 Europskog parlamenta i Vijeća od 5. lipnja 2019. o osnivanju Agencije Europske unije za suradnju energetske regulatora
60. Uredba (EU) 2021/1119 Europskog parlamenta i Vijeća od 30. lipnja 2021. o uspostavi okvira za postizanje klimatske neutralnosti i o izmjeni uredaba (EZ) br. 401/2009 i (EU) 2018/1999 („Europski zakon o klimi”)
61. Uredba (EU) br. 347/2013 Europskog parlamenta i Vijeća od 17. travnja 2013. o smjernicama za transeuropsku energetske infrastrukturu te stavljanju izvan snage Odluke br. 1364/2006/EZ i izmjeni uredaba (EZ) br. 713/2009, (EZ) br. 714/2009 i (EZ) br. 715/2009
62. Uredba (EU) 2021/1153 Europskog parlamenta i Vijeća od 7. srpnja 2021. o uspostavi Instrumenta za povezivanje Europe i stavljanju izvan snage uredaba (EU) br. 1316/2013 i (EU) br. 283/2014

63. Uredba (EZ) br. 715/2009 Europskog parlamenta i Vijeća od 13. srpnja 2009. o uvjetima za pristup mrežama za transport prirodnog plina i stavljanju izvan snage Uredbe (EZ) br. 1775/2005
64. Uredba Komisije (EU) 2015/703 od 30. travnja 2015. o uspostavi mrežnih pravila interoperabilnosti i razmjene podataka
65. Uredba Komisije (EU) 2017/460 od 16. ožujka 2017. o uspostavljanju mrežnih pravila o usklađenim strukturama transportnih tarifa za plin

WEB IZVORI:

66. AIB, 2022. *Guaranteeing the origin of European energy*. URL: <https://www.aib-net.org/> (13.01.2022.)
67. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 2022a. *Erneuerbare Energien*. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> (19.03.2022.)
68. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 2022b. *Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)*. URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Recht-Politik/Das_EEG/das_eeg.html (14.03.2022.)
69. CertifHy, 2022. *Certification Schemes*. URL: <https://www.certifyhy.eu/> (13.01.2022.)
70. CMS, 2022. *Hydrogen law nad Regulation in Germany*. URL: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/germany> (10.02.2022.)
71. DVGW, 2022. *Beschaffenheit von Erdgas*. URL: <https://www.dvgw.de/themen/gas/gase-und-gasbeschaffenheit/erdgas> (19.02.2022.)
72. EUR-Lex, 2016. *Pregovori UN-a o klimi: Kyotski protokol – drugo obvezujuće razdoblje*. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=LEGISSUM:2001_15 (02.12.2021.)
73. Europska komisija, 2019. *Clean energy*. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6723 (02.12.2021.)
74. Europska komisija, 2022. *REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition**. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131 (20.05.2022.)
75. Europski parlament, 2022. *Izješće o europskoj strategiji za vodik*. URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116_HR.html (12.01.2022.)

76. Europsko vijeće, 2021. *Pariški sporazum o klimatskim promjenama*. URL: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/> (02.12.2021.)
77. Europsko vijeće, 2022. *Fit for 55*. URL: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (20.05.2022.)
78. FNB Gas, 2022a. *Hydrogen network 2030: towards a climate-neutral Germany*. URL: https://fnb-gas.de/en/hydrogen-network/hydrogen-network-2030-towards-a-climate-neutral-germany/#_ftnref1 (27.03.2022.)
79. FNB Gas, 2022b. *Hydrogen network 2050: for a climate-neutral Germany*. URL: <https://fnb-gas.de/en/hydrogen-network/hydrogen-network-2050-for-a-climate-neutral-germany/> (27.03.2022.)
80. Gas for Climate, 2021a. *A path to 2050*. URL: <https://gasforclimate2050.eu/> (20.12.2021.)
81. HERA, 2020. URL: https://www.hera.hr/hr/docs/2020/Odluka_2020-12-18_01.pdf
82. INES, 2021. *INES comments on hydrogen storage demand according to ministry scenarios*. URL: <https://erdgasspeicher.de/en/ines-comments-on-hydrogen-storage-demand-according-to-ministry-scenarios/> (06.09.2022.)
83. National Grid, 2022. *The hydrogen colour spectrum*. URL: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum> (12.01.2022.)
84. Regatrace, 2022. *About Regatrace*. URL: <https://www.regatrace.eu/> (16.03.2022.)
85. The world of hydrogen, 2022. *Hydrogen infrastructure*. URL: <https://www.theworldofhydrogen.com/gasunie/infrastructure/> (12.01.2022.)
86. Trading Hub Europe, 2022. *Trading Hub Europe market area starts operations*. URL: <https://www.tradinghub.eu/en-gb/About-us/Newsroom/News/Details-en-GB/ArtMID/1412/ArticleID/25/Press-Release#> (26.07.2022.)

IZJAVA

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



Margarita Tomić



KLASA: 602-04/21-01/262
URBROJ: 251-70-12-21-2
U Zagrebu, 16.09.2022.

Margarita Tomić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/262, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 03.11.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

DEKARBONIZACIJA PLINSKOG TRANSPORTNOG SUSTAVA

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)