

UNIVERZA V LJUBLJANI
EKONOMSKA FAKULTETA

MAGISTRSKO DELO

PRIHODNOST VODIKA V EVROPSKI UNIJI

Ljubljana, september 2022

JURE LAKNER

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Jure Lakner, študent Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, avtor predloženega dela z naslovom Prihodnost vodika v Evropski uniji, pripravljenega v sodelovanju s svetovalcem prof. dr. Matejem Švigljem,

IZJAVLJAM

1. da sem predloženo delo pripravil samostojno;
2. da je tiskana oblika predloženega dela istovetna njegovi elektronski obliki;
3. da je besedilo predloženega dela jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih nalog Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, kar pomeni, da sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam oziroma navajam v besedilu, citirana oziroma povzeta v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih nalog Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani;
4. da se zavedam, da je plagiatstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Kazenskem zakoniku Republike Slovenije;
5. da se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predloženega dela dokazano plagiatstvo lahko predstavljalo za moj status na Ekonomski fakulteti Univerze v Ljubljani v skladu z relevantnim pravilnikom;
6. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v predloženem delu in jih v njem jasno označil;
7. da sem pri pripravi predloženega dela ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
8. da soglašam, da se elektronska oblika predloženega dela uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
9. da na Univerzo v Ljubljani neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve predloženega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja predloženega dela na voljo javnosti na svetovnem spletu prek Repozitorija Univerze v Ljubljani;
10. da hkrati z objavo predloženega dela dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v njem in v tej izjavi.

V Ljubljani, dne _____

Podpis študenta: _____

KAZALO

UVOD	1
1 PREDSTAVITEV VODIKA	3
1.1 Vodikova energija	3
1.2 Proizvodnja vodika	5
1.2.1 Metoda SMR za proizvodnjo vodika.....	8
1.2.2 Uplinjanje premoga in drugih ogljikovodikov	9
1.2.3 Elektroliza vode.....	10
1.2.4 Biološka proizvodnja vodika	12
1.3 Shranjevanje vodika	13
1.4 Distribucija vodika	15
1.5 Pretvorba vodika	16
1.5.1 Pretvorba vodika z izgorevanjem	16
1.5.2 Pretvorba vodika z vodikovimi gorivnimi celicami	16
1.6 Uporaba vodika	17
2 STROŠKOVNI VIDIK VODIKA	18
2.1 Uporabljene metode pri stroškovnih analizah	18
2.1.1 Opredelitev investicijskih stroškov	18
2.1.2 Naložbe v osnovna sredstva	18
2.1.2.1 Naložbe znotraj obrata	18
2.1.2.2 Naložbe izven obrata	19
2.1.2.3 Stroški gradnje, inženiringa in nepredvideni izdatki.....	19
2.1.3 Obratni kapital	20
2.1.4 Proizvodni stroški.....	20
2.1.4.1 Fiksni proizvodni stroški.....	21
2.1.4.2 Spremenljivi proizvodni stroški	23
2.1.5 Izravnani stroški	24
2.1.6 Celotni strošek proizvoda	25
2.2 Stroški proizvodnje modrega vodika	25
2.2.1 Investicijski stroški in LCOH modrega vodika	26
2.3 Stroški proizvodnje zelenega vodika	28

2.3.1	Investicijski stroški in LCOH zelenega vodika.....	29
2.3.2	Investicijski stroški in LCOE obnovljive električne energije	31
3	TRG VODIKA V EVROPSKI UNJI.....	33
3.1	Proizvodne zmogljivosti in povpraševanje po vodiku v Evropski uniji	34
3.1.1	Proizvodne zmogljivosti vodika v EU, EFTA in Združenem kraljestvu	34
3.2	Strategija in politika vodika v Evropski uniji.....	36
3.2.1	Okoljski zakonodajni akti.....	36
3.2.2	Strateški in politični vidiki vodika v Evropski uniji	38
3.3	Infrastruktura vodika v Evropski uniji.....	40
3.4	Uporaba vodika v Evropski uniji	43
3.4.1	Uporaba vodika v industrijskem sektorju.....	43
3.4.1.1	<i>Uporaba vodika v rafinerijskem sektorju</i>	<i>44</i>
3.4.1.2	<i>Uporaba vodika v sektorju proizvodnje jekla.....</i>	<i>44</i>
3.4.1.3	<i>Uporaba vodika v sektorju proizvodnje amonijaka.....</i>	<i>45</i>
3.4.1.4	<i>Uporaba vodika v kemičnem sektorju</i>	<i>45</i>
3.4.2	Uporaba vodika v transportnem sektorju	46
3.4.3	Uporaba vodika v energetske in stavbnem sektorju.....	47
4	TRG VODIKA V SLOVENIJI	48
4.1	Strategija vodika v Sloveniji.....	48
4.2	Infrastruktura in uporaba vodika v Sloveniji.....	50
4.2.1	Infrastruktura vodika v Sloveniji.....	50
4.2.2	Uporabnost vodika v Sloveniji.....	51
4.2.2.1	<i>Uporabnost vodika v industrijskem in stavbnem sektorju.....</i>	<i>51</i>
4.2.2.2	<i>Uporaba vodika v transportnem sektorju.....</i>	<i>52</i>
5	SWOT-ANALIZA TRGA VODIKA V EVROPSKI UNJI	52
5.1	Prednosti.....	53
5.1.1	Koristi za ohranjanje okolja	53
5.1.2	Raznovrstnost pri uporabi virov	54
5.1.3	Tehnološke prednosti	54
5.2	Slabosti.....	54
5.2.1	Visoki stroški.....	54
5.2.2	Nezadostna infrastruktura	55

5.3 Priložnosti	55
5.3.1 Družbenoekonomske priložnosti	55
5.3.2 Uporabnost vodika.....	56
5.3.3 Razvojne možnosti	57
5.4 Nevarnosti	58
5.4.1 Konkurenčnost drugih obnovljivih virov	58
5.4.2 Tehnološka negotovost	58
5.4.3 Nestabilnost trga z vodikom	58
5.4.4 Tveganja pri uvajanju vodika	59
SKLEP	59
LITERATURA IN VIRI	61
PRILOGE	69

KAZALO TABEL

Tabela 1: Fizikalne lastnosti vodika	4
Tabela 2: Primerjava različnih goriv z vodikom	5
Tabela 3: Primerjava goriv s specifično energijo in energetske gostoto	5
Tabela 4: Razčlenitev OPEX metode SMR s sistemom CCS proizvodnje modrega vodika.....	27

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer verige vodika od proizvodnje do uporabe	6
Slika 2: Poti pretvorbe energije z uporabo različnih metod proizvodnje vodika	7
Slika 3: Nameščeni elektrolizerji po regijah od leta 2015 in 2020	11
Slika 4: Nedokončani projekti elektrolizerjev v fazi gradnje od leta 2021 in 2030	11
Slika 5: Energijska gostota vodika v primerjavi z drugimi alternativnimi gorivi	14
Slika 6: Izravnani stroški vodika	21
Slika 7: Investicijski stroški modrega vodika.....	27
Slika 8: Primerjava LCOH modrega vodika	28
Slika 9: Investicijski stroški zelenega vodika.....	29
Slika 10: LCOH zelenega vodika, proizvedenega iz OVE	30
Slika 11: Investicijski stroški obnovljivih virov električne energije	31
Slika 12: Celotna proizvodna zmogljivost vodika v članicah držav EU, EFTA in Združenem kraljestvu za leto 2019	36

Slika 13: Zemljevid EHB	42
Slika 14: Poraba vodika v Mt po sektorjih v EU	43
Slika 15: SWOT-analiza trga vodika v Evropski uniji	53

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Klasifikacija elektrolize vode	1
Priloga 2: Prikaz biokatalizirane elektrolize	2
Priloga 3: Investicijski stroški modrega vodika	3
Priloga 4: Investicijski stroški zelenega vodika	4
Priloga 5: Investicijski stroški obnovljivih virov električne energije	5
Priloga 6: Podrobna SWOT-analiza trga vodika v Evropski uniji	6

SEZNAM KRATIC

angl. – angleško

ATR – (angl. autothermal reforming); avtotermična preobrazba

CAPEX – (angl. capital expenditure); investicijski izdatki

CCS – (angl. carbon capture and storage); zajem ogljika in njegovo shranjevanje

CCUS – (angl. carbon capture, utilization and storage); zajem ogljika, uporaba in njegovo shranjevanje

CO₂ – (angl. carbon dioxide); ogljikov dioksid

EFTA – (angl. The European Free Trade Association); Evropsko združenje za prosto trgovino

EHB – (angl. the European hydrogen backbone); evropska vodikovodna hrbtenica

ETS – (angl. emissions trading scheme); sistem trgovanja z emisijami

GW – (angl. gigawatt); gigavat

H₂ – (angl. hydrogen); vodik

kJ – (angl. kilojoule); kilodžul

kW – (angl. kilowatt); kilovat

kWh – (angl. kilowatt-hour); kilovatna ura

LNG – (angl. liquefied natural gas); utekočinjen zemeljski plin

LOHC – (angl. liquid organic hydrogen carrier); tekoči organski nosilec vodika

MJ – (angl. megajoule); megadžul

MW – (angl. megawatt); megavat

NADPH – (angl. nicotinamide adenine dinucleotide phosphate); nikotinamid adenin dinukleotid fosfat

Pa s – (angl. Pascal-second); paskal sekunda

POX – (angl. partial oxidation); delna oksidacija

RED – (angl. Renewable Energy Directive); Direktiva o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov

Sm³ – (angl. normal cubic meter); standardni kubični meter

SMR – (angl. steam methane reforming); parna preobrazba metana

TWh – (angl. terrawatt hour); teravatna ura

WACC – (angl. weighted average cost of capital); tehtani povprečni stroški kapitala

Wp – (angl. watt peak); vršna moč

Wt – (angl. theoretical energy consumption); teoretična poraba energije

UVOD

Vpliv človeka na podnebje je bil v zadnjem času prevladujoči vzrok za opazovanje globalnega segrevanja Zemlje. Površje Zemlje se je po navedbi IPCC (2018) od leta 1880 do 2012 segrelo za 0,85 °C. Če bomo želeli omejiti globalno segrevanje in obdržati dvig povprečne globalne temperature pod 2 °C, s tem da se globalna temperatura ne bi dvignila do 1,5 °C, bomo morali zmanjšati globalno raven toplogrednih plinov (v nadaljevanju TGP) za približno 45 % do leta 2030 in doseči ogljično nevtralnost do leta 2050 (IRENA, 2021a; IRENA, 2021b).

Evropska unija (v nadaljevanju EU) stremi k izpolnitvi cilja na področju globalnega segrevanja. Cilj je ogljična nevtralnost gospodarstva, ki kot posledico prinaša spremembe infrastrukture in zmožnost, da se doseže ogljična nevtralnost gospodarstva v čim krajšem možnem času, kajti ogljikov dioksid (v nadaljevanju CO₂) ostane prisoten v atmosferi desetletja, preden se naravno razkroji. Sedanja in prihajajoča politika, ki pospešuje postopno opuščanje uporabe premoga in ga nadomešča s stroškovno učinkovitejšim naravnim plinom ter obnovljivimi viri energije (v nadaljevanju OVE), je zato v prihodnosti neizogibna za zmanjševanje TGP v EU in prav tako na globalni ravni (European University Institute, 2020a; European University Institute, 2020b).

Za trajnostno Evropo in doseganje cilja zelenega dogovora EU bodo potrebne dodatne investicije. Po načrtu za trajnostno Evropo bo EU aktivirala približno tisoč milijard evrov za trajnostne naložbe v letih od 2021 do 2030 (European Commission, 2020b). Nekatere države članice EU imajo težave pri sprejemanju ukrepov, ki so potrebni za obvladovanje globalnega segrevanja. V državah, kjer do leta 2022 ni bilo hitrega in trajnega povišanja cen električne energije in zemeljskega plina, bo v prihodnje težje ohranjati javno podporo programu za ogljično nevtralnost. Poudarek EU je tako na politiki, ki temelji na trajnosti, konkurenčnosti in varnosti energentov (Evropska komisija, 2019).

Trenutno zviševanje cen energentov je spodbudilo države članice EU, da zmanjšajo oziroma začasno ustavijo plačilo prispevkov za OVE. Slovenija je aprila letos z Zakonom o nujnih ukrepih za omilitev posledic zaradi vpliva visokih cen energentov (ZUOPVCE), Ur. l. RS, št. 29/2022, porabnike za tri mesece začasno oprostila plačila prispevkov za omogočanje podpore proizvodnji energije v soproizvodnji z visokim izkoristkom in OVE.

Stroški energije pomembno vplivajo na konkurenčnost podjetij. Predvsem so to energetska intenzivna podjetja, kot so jeklarska, kovinarska, cementna in kemična podjetja, kjer strošek energije predstavlja od 20 do 40 % vseh stroškov. Pri tem ne smemo pozabiti na podjetja, za katera je zelo pomembna optimizacija stroškov. Primer takšnih podjetij so podjetja v avtomobilski panogi. V prihodnje bo pomembno, da se stroški energije ne povečujejo in tako ne prisilijo takšnih podjetij v preseljevanje svoje industrije izven EU, kjer izpusti TGP niso

obdavčeni. S tem se zmanjšanje količine globalnih izpustov TGP v prihodnje namreč ne bo nadaljevalo (European University Institute, 2020a).

Trenutno je EU v fazi prehoda od uporabe neobnovljivih virov energije na uporabo OVE. Pridobivanje električne energije iz OVE, ogljična nevtralnost transporta in pridobitev trajnostne energije so rdeča nit politike EU. Evropska komisija (2020b) je pred kratkim objavila strategijo za uporabo vodika za podnebno nevtralno Evropo. Vodik je bistvena sestavina za doseganje trajnostne prihodnosti. Pričakuje se, da bo imel vodilno vlogo pri zmanjševanju izpustov TGP in izboljšanju zanesljivosti oskrbe z energijo. Uporaba vodika postaja vse bolj razširjena tako v Evropi kot v svetu. Vodik je primeren za uporabo kot surovina, gorivo ali nosilec energije pri transportu in shranjevanju. Uporablja se v prometnem, elektroenergetskem, gradbenem in industrijskem sektorju. Vodik pri uporabi ne povzroča emisij CO₂ in je zato za prihodnost zmanjševanja globalnega segrevanja toliko bolj pomemben. V prihodnosti bo imel pomembno vlogo v gospodarstvenem in industrijskem sektorju, kjer bo pripomogel k zmanjšanju izpustov CO₂, in zaradi tega nosi pomemben delež pri zavezi EU za doseganje ogljične nevtralnosti do leta 2050 (Evropska komisija, 2020b; European University Institute, 2020c).

V prihodnje se pričakuje, da bo električna energija, pridobljena iz OVE, do leta 2050 v velikem deležu pripomogla k ogljični nevtralnosti. Vodik je ključna prednostna naloga pri doseganju zelenega dogovora EU, kajti vodik ima potencial za doseganje tega dogovora pri shranjevanju in prenosu energije iz OVE (Lacko, Vidmar, Vindišar & Pirnat, 2012). Prednost vodika je tudi v tem, da lahko nadomesti fosilna goriva v panogah, ki povzročajo velike izpuste TGP. Kot že omenjeno, so to panoge z velikimi energetske stroški, torej jeklarska, kemična, cementna in kovinarska panoga. Prav tako lahko nadomesti energente v prometnem sektorju, kjer je znižanje emisij TGP težje dosegljivo. Strateška vizija za podnebno nevtralno EU napoveduje rast deleža uporabe vodika z 2 % na 13 do 14 % do leta 2050 (Evropska komisija, 2019; Evropska komisija, 2020b).

V Sloveniji je uvajanje trajnostnih tehnologij počasno, nekoordinirano in finančno slabo podprto. Slovenija do leta 2020 ni dosegla zahteve, da se 25 % energije pridobiva iz OVE. Pri gradnji sončnih elektrarn, hidroelektrarn in vetrnic zaostajamo v primerjavi z drugimi državami članicami EU. Uvedba proizvodnje in distribucije vodika v Sloveniji bo zahtevala precejšnja finančna sredstva. Predpogoj za vpeljavo vodika v Sloveniji je zagotoviti dovolj proizvodnje elektrike, pridobljene iz OVE, pridobiti ustrezne licence za izgradnjo elektrolizerjev ter določiti ustrezne geografske lokacije za shranjevanje vodika v tekočem ali plinastem stanju (Novak, 2021).

Ključni namen magistrske naloge je proučiti trg vodika v EU. Raziskal sem, kakšna je prihodnost vodika v EU. Poleg trga vodika v EU predstavljam tudi trg vodika v Sloveniji. S pomočjo sekundarnih tujih in slovenskih virov sem temeljito proučil trg vodika v EU. Z magistrskim delom želim prikazati značilnosti vodika in stroškovni vidik različnih načinov

proizvodnje vodika. Z analizo ugotovitev različnih strokovnjakov prispevam k boljšemu razumevanju uporabe vodika pri doseganju ogljične nevtralnosti v EU.

Magistrsko delo je sestavljeno iz petih vsebinskih poglavij, ki so razdeljena na podpoglavja. Prvi dve poglavji predstavljata teoretično podlago magistrskega dela. V prvem poglavju podrobneje predstavim lastnosti vodika. V drugem poglavju s pomočjo tuje strokovne literature primerjam, katera proizvodnja vodika je najbolj stroškovno učinkovita in katera bo imela v prihodnosti primarno vlogo pri proizvodnji vodika. V tretjem in četrtem poglavju obravnavam trg vodika v EU in Sloveniji. V tretjem poglavju predstavim proizvodne zmogljivosti, povpraševanje, strategijo, politiko, infrastrukturo in uporabo vodika v EU. Četrto poglavje je namenjeno pregledu strategije, infrastrukture in uporabe vodika v Sloveniji. V petem poglavju s pomočjo SWOT-analize določim prednosti, slabosti, priložnosti in nevarnosti trga vodika v EU. Magistrsko delo zaključim s sklepnimi ugotovitvami.

1 PREDSTAVITEV VODIKA

Pričakuje se, da bo imel v prihodnje vodik ključno vlogo pri vzpostavitvi trajnostne ekonomije. Je ključna sestavina, ki bo imela vlogo pri zmanjševanju TGP (Evropska komisija, 2020b). V tem poglavju predstavim pomen vodika, njegove značilnosti in celoten proces od proizvodnje do končne uporabe vodika.

1.1 Vodikova energija

Vodik je kemijski element s simbolom H in je najlažji element z najpogostejšim izotopom, ki je sestavljen iz enega protona in elektrona. Ta element je glavna sestavina vode in ostalih organskih snovi. Vodik je močno prisoten na Zemlji kot tudi v vesolju. Atomi vodika tvorijo molekule H₂, ki so v primerjavi z večino drugih molekul manjše. Molekularna oblika vodika je brez barve, vonja in okusa. Vodik je 14-krat lažji od zraka in difundira hitreje kot katerikoli drug plin. Iz plinastega stanja kondenzira v tekoče stanje pri -253 °C , pri -259 °C pa iz tekočega stanja preide v trdno stanje. Vodik je pri normalni temperaturi nereaktiven, dokler pri tem ni na nek način dodatno aktiviran. Atom vodika je po drugi strani kemično zelo reaktiven in ga zato v naravi ne najdemo samega, ampak v kemičnih sestavinah. Visoke temperature (4726 °C) so potrebne, da se vodikov atom loči od molekularnega vodika. V naravi je tako vodik vezan na kisik ali ogljik. Za pridobitev vodika iz naravnih sestavin potrebujemo energijo. Vodik je tako treba obravnavati kot nosilec energije, sredstvo za shranjevanje in prenos energije, pridobljene iz primarnega vira energije (Gupta, 2009). Podrobnejše fizikalne lastnosti vodika so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: Fizikalne lastnosti vodika

Lastnosti	Vrednost	Enota
Molekularna teža	2,01594	g/mol
Gostota plina pri 0 °C in 1 atm.	0,08987	kg/m ³
Gostota trdne snovi pri -259 °C	858	kg/m ³
Gostota tekoče snovi pri -253 °C	708	kg/m ³
Temperatura taljenja	-259	°C
Temperatura vrelišča pri 1 atm.	-253	°C
Kritična temperatura	-240	°C
Kritičen tlak	12,8	atm.
Kritična gostota	31,2	kg/m ³
Toplota fuzije pri -259 °C	58	kJ/kg
Toplota izparitve pri -253 °C	447	kJ/kg
Toplotna prevodnost pri 25 °C	0,019	kJ/(ms °C)
Viskoznost pri 25 °C	0,00892	Pa s
Toplotna zmogljivost plina pri 25 °C	14,3	kJ/(kg °C)
Toplotna zmogljivost tekočine pri -256 °C	8,1	kJ/(kg °C)
Toplotna zmogljivost trdne snovi pri -259,8 °C	2,63	kJ/(kg °C)

Prerejeno po Othmer (2001).

Vodik je zelo vnetljiv plin v širokem temperaturnem in koncentracijskem spektru. Njegova učinkovitost izgorovanja je zelo visoka, vendar zaradi številnih tehnoloških izzivov prinaša težave z varnostjo pri proizvodnji, shranjevanju in transportu vodika kot energijskega goriva. Pri reakciji s kisikom vodik eksplozivno sprošča energijo v motorjih z notranjim izgorovanjem ali pa t. i. »tiho« reakcijo v gorivnih celicah. Edini stranski produkt te reakcije je voda. Vodik je na Zemlji na voljo le v kemičnih spojinah, najdenih v vodi, in fosilnih ogljikovodikih, kot so premog, nafta, zemeljski plin. Vodik najdemo tudi v biomasi (ogljikovi hidrati, beljakovine in celuloza). V vodiku najdemo podobne kemične povezave kot v drugih običajnih gorivih, kot so metan (zemeljski plin), utekočinjen naftni plin in tekoča goriva (bencin). V tabeli 2 prikazujem primerjavo različnih goriv z vodikom glede na kurilno vrednost, vžigno temperaturo in energijsko gostoto. Od znanih goriv ima vodik najvišjo vsebnost energije na enoto mase. V primerjavi z bencinom ima vodik na enako težo skoraj trikrat večjo vsebnost energije. Razlika med bencinom in vodikom, ki je pomembna v vsakdanjem življenju, na primer shranjevanje vodika kot goriva v avtomobilskem sektorju, je nizka volumetrična gostota vodika. V primerjavi z bencinom vodik potrebuje večji volumen za shranjevanje. Fizično stanje vodika predstavlja ovire pri vsakdanji rabi. Za tekoče stanje je pomembna temperatura, za plinasto stanje pa tlak, pod katerim je shranjen. Ena od pomembnih in zanimivih lastnosti vodika je elektrokemijska lastnost, ki se lahko uporabi v gorivnih celicah (Gupta, 2009).

Tabela 2: Primerjava različnih goriv z vodikom

Gorivo	Spodnja kurilna vrednost (MJ/kg)	Zgornja kurilna vrednost (MJ/kg)	Vžigna temperatura (°C)	Energijska gostota (MJ/m ³ – tekoče stanje)
Vodik	119,9	141,8	2207	8491
Propan	45,6	50,3	1925	23.488
Metanol	18,0	22,7	1870	15.800
Metan	50,0	55,5	1914	20.920
Bencin	44,5	47,3	2307	31.150
Dizel	42,5	44,8	2327	31.435

Prirejeno po College of the Desert (2014).

Vodik glede na svojo majhno energetska gostoto vsebuje veliko količino energije. V tabeli 3 je prikazana primerjava med vodikom in ostalimi znanimi gorivi glede na njihovo specifično energijo in energetska gostoto. Razvidno je, da vodik glede na svojo energetska gostoto proizvede največ specifične energije.

Tabela 3: Primerjava goriv s specifično energijo in energetska gostoto

Gorivo	Specifična energija (kWh/kg)	Energetska gostota (kWh/dm ³)
Vodik (200 barov)	33,3	0,53
Tekoči vodik	33,3	2,37
Zemeljski plin (200 barov)	13,9	2,3
Utekočinjen zemeljski plin	13,9	5,6
Bencin	12,8	9,5
Dizel	12,6	10,6
Premog	8,2	7,6
NH ₃ BH ₃	6,5	5,5
Metanol	5,5	4,4
Les	4,2	3,0
Elektrika (litij-ionske baterije)	0,55	1,69

Prirejeno po Edwards, Kuznetsov, David & Brandon (2008).

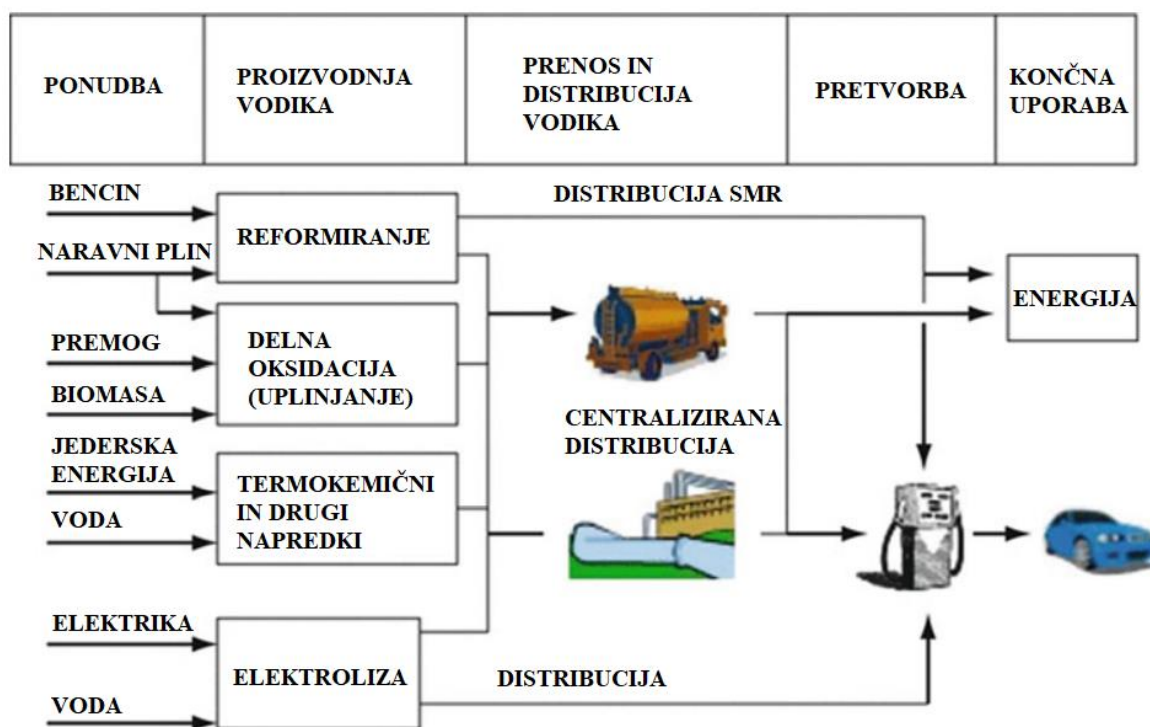
Preden vodik lahko služi kot univerzalni prenosnik energije, je treba rešiti vprašanja, ki se nanašajo na proizvodnjo, transport, skladiščenje, distribucijo in uporabo vodika.

1.2 Proizvodnja vodika

Vodik je bogat element, ki se trenutno proizvaja v molekularni obliki za široko paleto panožnih uporab. V zadnjih letih se vodik uporablja za stacionarno proizvodnjo energije v

sistemih gorivnih celic in za pogon električnih vozil na vodikove gorivne celice, vključno z avtobusi, viličarji in osebnimi vozili. Dobra lastnost vodika je, da ga je mogoče proizvajati na veliko različnih načinov pri uporabi različnih surovin. Vendar je treba vodik proizvesti z enim od možnih procesov in ga ne preprosto odkriti ter dostaviti na trg kot na primer zemeljski plin. V svetovnem merilu je bila proizvodnja vodika leta 2013 ocenjena na 22 milijonov metričnih ton. Po podatkih U. S. Department of Energy (2020a) pa je v letu 2020 ta številka narasla na 70 milijonov metričnih ton proizvodnje vodika. Od tega je bilo 76 % vodika proizvedenega iz zemeljskega plina s procesom parne preobrazbe metana (angl. steam methane reforming, v nadaljevanju SMR), 22 % prek uplinjanja premoga (angl. gasification of coal) in 2 % z metodo elektrolize vode. Glavne sedanje uporabe komercialno proizvedenega vodika so za rafiniranje nafte, kjer se vodik uporablja za hidroobdelavo surove nafte kot del procesa rafiniranja za izboljšanje razmerja med vodikom in ogljikom v gorivu. V večini se uporablja za proizvodnjo hrane – tukaj gre predvsem za hidrogeniranje, obdelavo kovin in proizvodnjo amonijaka za gnojila in druge panožne uporabe (Lipman & Weber, 2019; Kalamaras & Efstathiou, 2013). Slika 1 predstavlja pot vodika od proizvodnje do uporabe.

Slika 1: Primer verige vodika od proizvodnje do uporabe

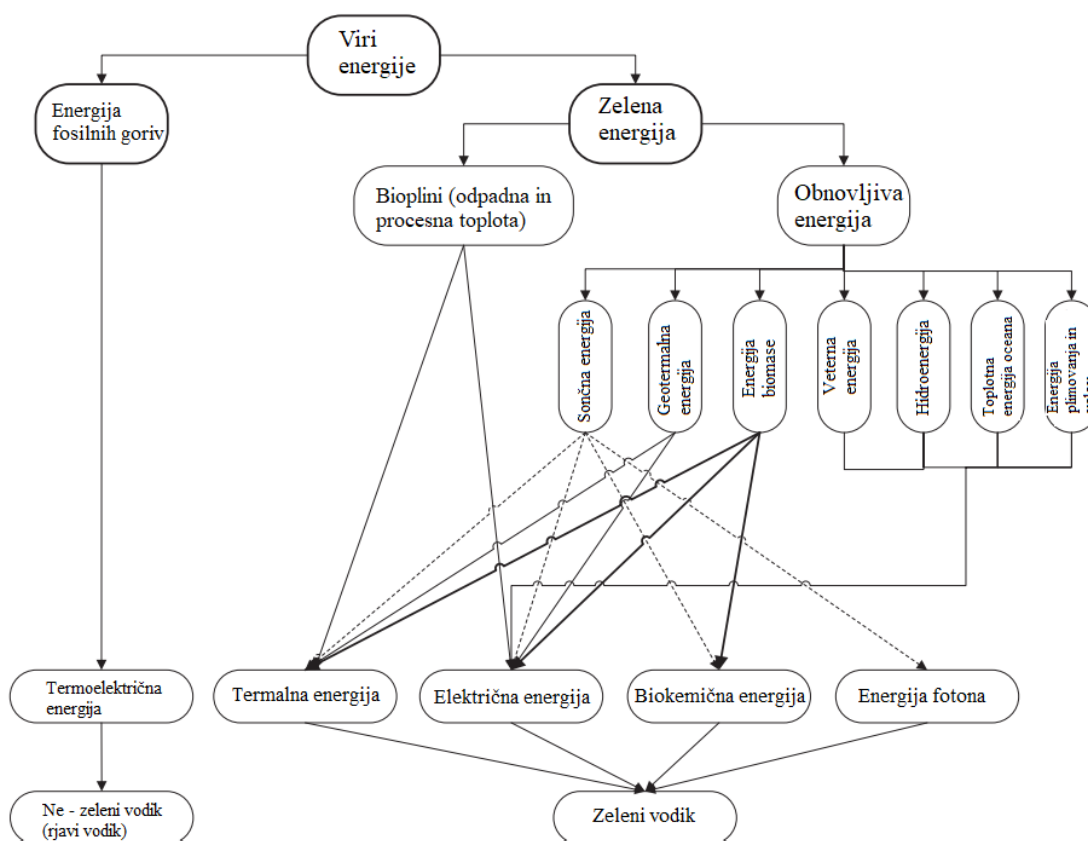


Prirjeno po Lipman & Weber (2019).

Slika 2 prikazuje poti pretvorbe energije z uporabo različnih metod proizvodnje vodika. Glavni viri energije za proizvodnjo vodika so toplotna, električna, biokemična energija in energija fotona. V osnovi lahko ločimo proizvodnjo vodika na sivi, modri, zeleni in turkizni vodik. Sivi vodik (angl. grey hydrogen) se pridobiva iz neobnovljivih virov energije s

procesom SMR in uplinjanjem premoga oziroma drugih ogljikovodikov. Modri vodik (angl. blue hydrogen) se pridobiva z enakimi metodami kot sivi vodik, le da se s pomočjo metode zajemanja in shranjevanja ogljika (angl. carbon capture and storage, v nadaljevanju CCS) zmanjša izpust CO₂. Vodik se šteje za modri vodik takrat, ko se pri proizvodnji modrega vodika s CCS-obrabi upošteva, da uhajanje metana ne sme presegati 1,5 % z 98 % zajemom CO₂ (IRENA, 2022; Kalamaras & Efstathiou, 2013). Možna je tudi naknadna uporaba CO₂. Metoda se imenuje zajemanje, uporaba in shranjevanje ogljika (angl. carbon capture, utilization and storage, v nadaljevanju CCUS). Na svetu je trenutno 16 obratov, ki proizvajajo vodik iz fosilnih goriv s sistemom CCUS. Omenjeni obrati letno proizvedejo več kot 0,7 milijona ton vodika in pri tem zajamejo približno deset milijonov ton izpusta CO₂. Od teh 16 obratov je deset obratov komercialnih, ki zajemajo nad 0,4 milijona ton CO₂ na leto. Štirje obrati so navzoči v naftnih rafinerijah in trije pri proizvodnji gnojil (slednji opravljajo proizvodnjo čistega vodika in zajemanje CO₂ za geološko shranjevanje oziroma prodajo in ne zajemajo obratov, ki proizvajajo amonijak) (IEA, 2021; Sankir & Sankir, 2017).

Slika 2: Poti pretvorbe energije z uporabo različnih metod proizvodnje vodika



Prirejeno po Dincer & Zamfirescu (2016).

Zeleni vodik (angl. green hydrogen) se pridobiva iz že znanih OVE. Pridobivanje zelenega vodika temelji na elektrolizi vode. Prav tako se zeleni vodik lahko pridobiva iz bioplinov. Trenutno je način proizvodnje vodika iz OVE stroškovno najdražji. Modri vodik je

stroškovno ugodnejši od zelenega vodika. V zdajšnjem času je modri vodik priljubljen, kajti uporablja fosilna goriva, zajema izpuste CO₂ in je v industriji stroškovno dostopen. Z letom 2000 je po svetu devet inštitucij začelo proizvajati vodik s procesom CCS. Od leta 2015 do 2020 so omenjene inštitucije shranile do pet milijonov ton CO₂ (Dincer & Zamfirescu, 2016). Turkizni vodik (angl. turquoise hydrogen) se pridobiva iz zemeljskega plina s postopkom pirolize. Če ta proces uporablja obnovljivi vir električne energije in ne pride do uhajanja emisij metana iz uporabljenega zemeljskega plina, se ta metoda šteje za ogljično nevtralno (European University Institute, 2020a).

Nova metoda, imenovana vodni vodik (angl. aqua hydrogen), omogoča proizvodnjo vodika iz neobnovljivih virov energije z ogljično nevtralnostjo. V primerjavi z modrim vodikom vodni vodik shranjuje izpuste CO₂ v zemlji. Vodik se pridobiva s pomočjo oljnega peska oziroma naravnega bitumna. Vbrizgavanje kisika v naftni pesek pod zemljo sproži spontano oksidacijo in toploto. Kemična reakcija dosega temperature preko 350 °C in tako pride do cepljenja molekul nafte in vode. Čisti vodik v plinastem stanju preide na površje, medtem ko CO₂ ostane v zemlji (Yu, Wang & Vredenburg, 2021).

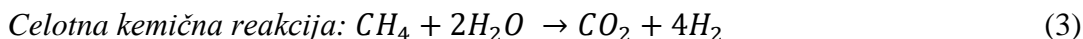
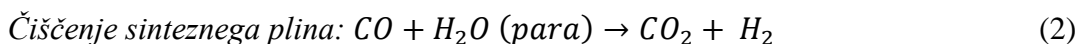
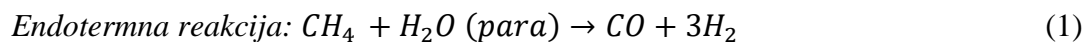
Dandanes je vodik večinoma proizveden za industrijske namene s pomočjo metode SMR. Manjši delež vodika je proizveden iz drugih ogljikovodikov v naftni rafineriji in prek elektrolize vode. Naslednje metode so najpogostejše pri proizvodnji vodika (Lipman & Weber, 2019; Kalamaras & Efstathiou, 2013):

- SMR,
- uplinjanje premoga in drugih ogljikovodikov (angl. gasification of coal and other hydrocarbons),
- elektroliza vode (angl. electrolysis of water),
- uplinjanje in piroliza biomase (angl. biomass gasification and pyrolysis),
- biološka proizvodnja (angl. biological production),
- fotoelektrokemične metode (angl. photo-electrochemical methods),
- visokotemperaturne termokemične metode (angl. high-temperature thermochemical methods),
- soproizvodnja na osnovi gorivnih celic (angl. fuel cell-based co-production).

1.2.1 Metoda SMR za proizvodnjo vodika

Najpogosteje uporabljena metoda proizvodnje vodika je SMR. Pri metodi SMR se uporablja zemeljski plin, drugi ogljikovodiki in ogljikovodiki, bogati z metanom (bioplini ali deponijski plini), ki nato reagirajo s paro v prisotnosti katalizatorja. Končna proizvoda metode SMR sta vodik in CO₂. Prvi proizvod je ogljikov monoksid z vodikom, nato pa se s pomočjo vodne pare dosežeta CO₂ in vodik. Vodna para se najprej pojavi pri visokotemperaturnem koraku pri približno 350 °C in nato pri nižji temperaturi med 190 in 210 °C. Za vsako molekulo dioksida se proizvedejo štiri molekule vodika, zaradi česar je

SMR sorazmerno nizkoogljični proces, če primerjamo notranje izgorevanje bencina v vozilih. Pri metodi SMR se proizvede od 70 do 75 % vodika, od 2 do 6 % metana, od 7 do 10 % ogljikovega monoksida in od 6 do 14 % CO₂. Učinkovitost metode SMR z uporabo zemeljskega plina sega do 74 %. V enačbah (1), (2) in (3) predstavljam celotno kemično reakcijo metode SMR (Lipman & Weber, 2019):



1.2.2 Uplinjanje premoga in drugih ogljikovodikov

Pri procesu delne oksidacije (angl. partial oxidation, v nadaljevanju POX), ki je bolj znana kot uplinjanje, se vodik lahko proizvaja iz vrste ogljikovodikov, vključno s premogom, težkimi ostanki nafte in drugimi rafinerijskimi proizvodi. Pri procesu POX se izvaja eksotermna reakcija. V praksi se velika količina pare meša z metanom, ki tako nadzoruje nastanek CO₂. Zaradi prisotnosti presežne pare poteka tudi nekatalitska parna preobrazba metana pri visoki temperaturi. Katalizirana različica POX, znana tudi kot avtotermična preobrazba (angl. autothermal reforming, v nadaljevanju ATR), uporablja posebno enoto za ločevanje kisika in ima pri delnem izgorevanju visokotemperaturni katalizator na osnovi niklja. Katalizator pri visoki temperaturi doseže ravnovesje zmesi z nizkim razmerjem med vodikom in CO₂ v primerjavi z metodo SMR (Basile & Iulianelli, 2014). Nastanek plina CO₂ je znotraj procesa, s katerim metoda ATR zajame več izpustov CO₂ kot metoda SMR. Razlika med metodama ATR in SMR je tudi v tem, da namesto pare, ki jo uporablja metoda SMR, metoda ATR uporablja kisik in pri začetnem procesu uporablja električno energijo kot vhodno gorivo. Velik delež proizvodnje svetovnega amonijaka in metanola že uporablja metodo ATR, vendar brez CCUS (IAE, 2021). Proces POX doseže temperaturo od 1200 °C do 1350 °C, kjer ogljikovodikovo gorivo reagira s kisikom, pri čemer nastane zmes ogljikovega monoksida in vodika. Proces je kemijsko zahteven, kajti v začetku zahteva visoko temperaturo za progresivno izhlapevanje surovin, pri čemer pride do različnih stranskih produktov, kot so fenoli, katran in drugi lahki ogljikovodiki. Temu procesu nato sledi reakcija voda – plin, kjer se iz ogljikovega monoksida in vode proizvede dodaten vodik, skupaj z ogljikovim dioksidom in metanom. Metoda uplinjanja ogljikovodikov v prihodnosti prinaša optimističen vidik zajemanja CO₂. To je mogoče z uporabo kalcijevega oksida kot veziva in rezultat tega je kalcijev karbonat, ki se nato sekvestrira. S to metodo lahko shranjujemo CO₂ in tako preprečimo, da bi prišel v ozračje. Ta metoda omogoča shranjevanje z ustreznim geološkim ali oceanskim rezervoarjem s procesom CCS (Lipman & Weber, 2019).

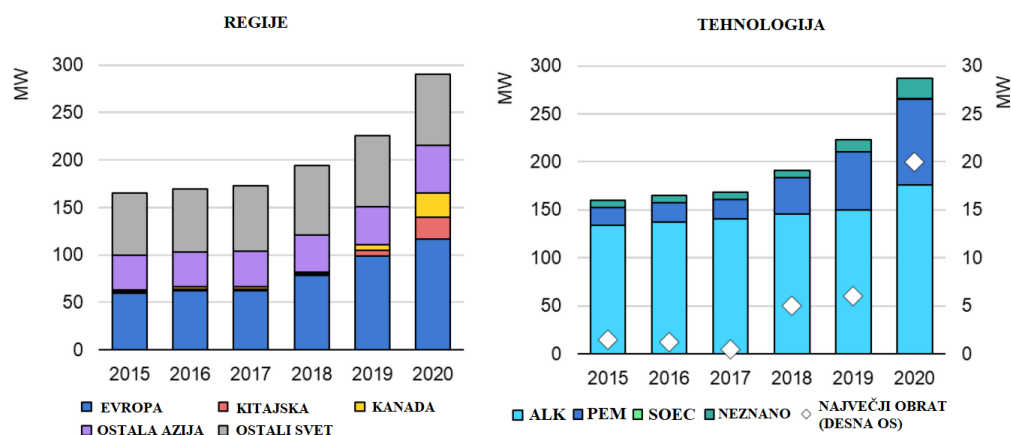
1.2.3 Elektroliza vode

Elektroliza vode je metoda proizvodnje vodika, pri čemer se molekule vode razdelijo na molekule vodika in kisika z uporabo električne energije. Po Lipman in Weber (2019) se kisik lahko uporabi za proizvodne namene, kot je na primer obogatitev vsebnosti kisika v rastlinjakih za proizvodnjo hrane. Naboji, ki jih prenašajo ionske vrste, kot so OH^- , H^+ in O^{2-} , prehajajo skozi ionski prevodni elektrolit, pri katerem se ohrani električna nevtralnost. Glede na ionski prevodni elektrolit obstajajo tri vrste elektrokatalizatorjev (Fang, Smith & Qi, 2015).

Najpogostejša komercialna uporaba elektrolize vključuje tri vrste: elektrolizo z alkalnim elektrolizerjem (angl. alkaline electrolyser, v nadaljevanju ALK), elektrolizer s protonsko izmenjevalno membrano (angl. proton exchange membrane electrolysis, v nadaljevanju PEM) in elektrolizno celico s trdnim oksidom (angl. solid oxide electrolysis cell, v nadaljevanju SOEC). SOEC lahko ustvari vodik z največjo učinkovitostjo (Yu, Wang & Vredenburg, 2021). Metoda proizvodnje vodika s PEM lahko dnevno proizvede do 900 kg vodika z visoko stopnjo čistosti (Lipman & Weber, 2019).

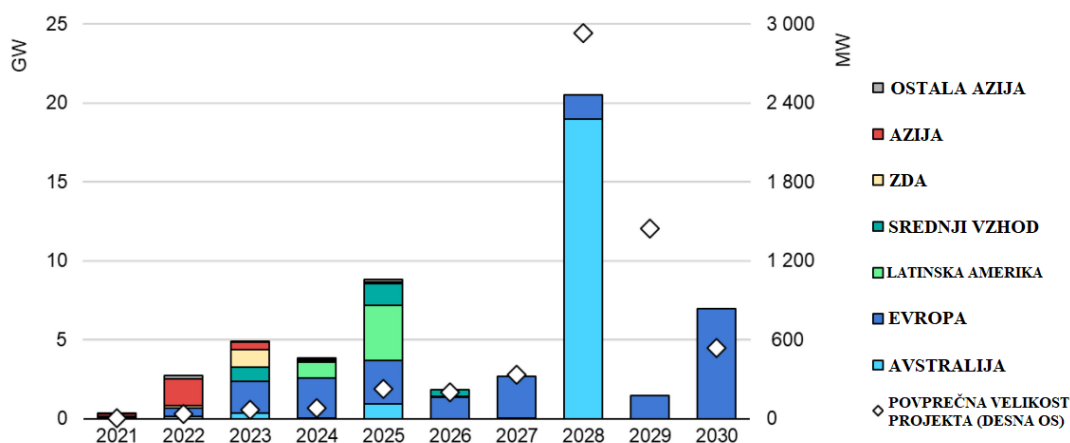
V letu 2020 je elektroliza predstavljala približno 0,03 % proizvodnje vodika za energijo in ostale kemične surovine. Globalno je nameščenih 290 megavatov (angl. megawatt, v nadaljevanju MW) zmogljivosti elektrolizerjev, od tega jih je 40 % nameščenih v Evropi, 9 % v Kanadi in 8 % na Kitajskem. Ostali elektrolizerji so nameščeni po ostalih svetovnih regijah. Ocenjujejo, da bo do leta 2030 zmogljivost elektrolizerjev narasla na 54 gigavatov (angl. gigawatt, v nadaljevanju GW) (glede na obrate v fazi gradnje in načrtov). Če bodo vsi še nedokončani načrti potrjeni, lahko ta številka doseže tudi 91 GW zmogljivosti do leta 2030. Trenutno je največji potencial v Evropi in Avstraliji z 22 GW in 21 GW zmogljivosti. Sledijo ji Latinska Amerika s 5 GW in Srednji vzhod s 3 GW zmogljivosti. Na sliki 3 prikazujem nameščene elektrolizerje po regijah od leta 2015 in 2020, na sliki 4 pa nove nameščene elektrolizerje, ki temeljijo na še nedokončanih projektih od leta 2021 in do leta 2030. Prikaz temelji na 350 projektih, ki so še v fazi gradnje oziroma v načrtovanju (IEA, 2021).

Slika 3: Nameščeni elektrolizerji po regijah od leta 2015 in 2020



Prirajeno po IAE (2021).

Slika 4: Nedokončani projekti elektrolizerjev v fazi gradnje od leta 2021 in 2030



Prirajeno po IAE (2021).

Pri klasifikaciji elektrolize vode je napetost celice U pomemben parameter, ki predstavlja porabo energije vodnih elektrolizerjev. Termodinamična razpadna napetost vode je 1,23 V pri 25 °C. Po Faradayevem zakonu je električna količina Q za proizvodnjo 1 mol H_2 (tj. 22,4 litra pri standardnih pogojih) $2 F$ (Faradayeva konstanta). Teoretično porabo energije W_t za proizvodnjo 1 m³ vodika prikazujem v enačbi (4). Tako je energetska učinkovitost elektrolize vode za proizvodnjo vodika približno 60 % (Fang, Smith & Qi, 2015). Slikovni prikaz klasifikacije elektrolize vode se nahaja v prilogi 1.

$$W_t = UQ = 1.23 \times \left(2 \times \frac{1000}{22,4} \times 96,485 \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{3600} \right) = 2,94 \text{ kWh/m}^3 H_2 \quad (4)$$

Problematika elektrolize se pojavi pri visokih stroških električne energije in investicijskih stroških. Razvoj metode elektrolize z visokotemperaturno elektrolizno celico s trdnim

oksidom bo v prihodnje prinesla pomemben okoljski doprinos. Ob upoštevanju zmanjšanja uporabe fosilnih goriv bo obnovljiva energija v prihodnosti glavni energetska vir. Vodik, proizveden s to metodo, bo v prihodnosti predstavljal pomembno vlogo v industriji in skladiščenju obnovljive energije (Fang, Smith & Qi, 2015).

1.2.4 Biološka proizvodnja vodika

Biološka proizvodnja vodika prinaša velik potencial. Proizvodnja vodika ima manjši vpliv na okolje kot druge že našteje metode. Pri bioloških metodah se bomo osredotočili na termokemični in biokemični proces.

Termokemični proces vsebuje bodisi uplinjanje bodisi pirolizo biomase. Rezultat je mešanica plinov, kot so vodik, ogljikov monoksid in kasneje pri parni preobrazbi poleg vodika CO₂ in metan. Ta postopek je enak kot pri uplinjanju ogljikovodikov in metodi SMR. Problematika pri metodi uplinjanja biomase je nastanek stranskega produkta – katrana. Katran je težko preobraziti v vodik. Nastanek katrana se zmanjšuje z uporabo dodatnih aditivov in skrbnim nadzorom operacijskih spremenljivk. Lažja metoda za proizvodnjo vodika iz bioloških virov pa so biološka olja, proizvedena iz pirolize biomase. Za pridobitev vodika in monoksida je postopek enak kot pri uplinjanju biomase. Razlika med metodama je enostavnejši transport bioloških olj kot biomase (Lipman & Weber, 2019).

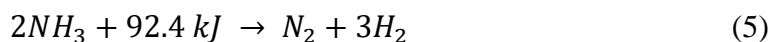
Biokemični proces proizvodnje vodika vsebuje širok spekter različnih metod. Te so (Silveira, 2017):

- fermentacijska proizvodnja vodika (angl. fermentative hydrogen production),
- encimska proizvodnja vodika (angl. enzymatic hydrogen generation),
- biokatalizirana elektroliza (angl. biocatalyzed electrolysis),
- proizvodnja vodika iz alg – fotobiološko cepljenje vode (angl. hydrogen production from algae – photobiological water splitting),
- proizvodnja vodika iz amonijaka (angl. hydrogen generation from ammonia).

Fermentacijska proizvodnja vodika je v primerjavi z drugimi metodami proizvodnje vodika relativno cenejša in enostavnejša. Metoda temelji na fermentaciji ostankov biomase. Prednost te metode je tudi v lokalni integraciji, kjer obstaja možnost prilagoditve različnih vrst surovin in uporabe ostankov fermentacije kot gnojila, pri čemer se tako zmanjšajo gospodarski in okoljski vplivi zaradi manjše uporabe fosilnih goriv za transportne namene. Fermentacija poteka v štirih korakih: hidroliza (angl. hydrolysis), acidogeneza (angl. acidogenesis), acetogeneza (angl. acetogenesis) in metanogeneza (angl. methanogenesis). Za encimsko proizvodnjo vodika je potrebna fosfoglukonantna pot (angl. pentose phosphate pathway), ki je običajno prisotna v večini organizmov. Njena oksidativna veja je sestavljena iz dveh encimov. To sta glukoza-6-P-dehidrogenaza in 6-fosfoglukonat-dehidrogenaza. Takšna encima skupaj proizvedeta dva mola nikotinamid adenin dinukleotid fosfata (angl. nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, v nadaljevanju NADPH) in dva mola riboza-5-

fosfata iz enega mola glukoza-6-fosfata. Neoksidativna veja izvaja enega in dva prenosa ogljika, ki pretvorita pentoze v fruktozo-6-fosfat in gliceraldehid-3-fosfat. Glede na to, da se fruktoza-6-fosfat lahko izomerizira v glukozo-6-fosfat s pomočjo izomerizacije fosfoheksoze (izomerija glukoza-6-fosfat), jih je nato mogoče reciklirati nazaj v NADPH za nadaljnjo proizvodnjo vodika. Z dodatkom hidrogenoze teoretično dobimo 12 molov H₂ na en mol glukoza-6-fosfata. Biokatalizirana elektroliza uporablja elektrokemično aktivne mikroorganizme, ki prenašajo elektrone iz notranjega v zunanji del celice in imajo sposobnost rasti na površini elektrode med uporabo kot sprejemniki elektronov za oksidacijo organskih spojin. Elektrokemični mikroorganizmi sproščajo elektrone na visoki energijski ravni, ki povzročijo nizek potencial na elektrodi, ki nato proizvaja vodik (Lipman & Weber, 2019; Silveira, 2017). Slikovni prikaz biokatalizirane elektrolize se nahaja v prilogi 2.

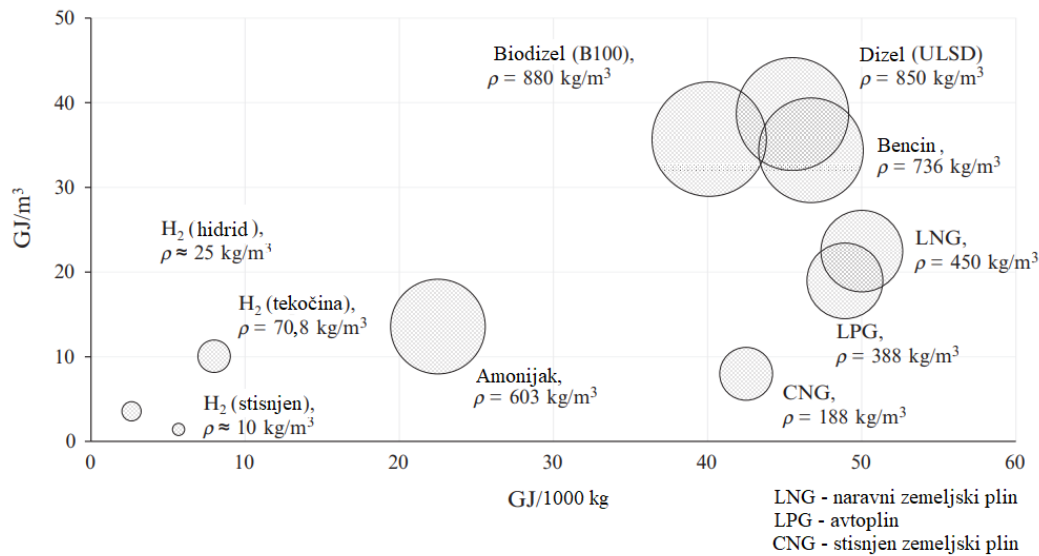
Med biološko proizvodnjo vodika spada tudi proizvodnja vodika iz alg. Ta proizvodnja velja za trajnostno in ugodno v primerjavi s termokemičnimi in elektrokemičnimi procesi, kajti prinaša čisti vodik (več kot 98 % čistosti vodika), uporablja sončne elektrarne in pri rasti alge porabljajo CO₂. Alge so zmožne porabiti desetkrat več CO₂ kot kopenske rastline. Najvišjo stopnjo proizvodnje vodika iz alg prinaša proizvodnja iz mikroalg, imenovanih *Chlamydomonas reinhardtii*. Ta vrsta zelene alge je sposobna hitre rasti z najpreprostejšim življenjskim ciklom. Za proizvodnjo vodika se uporablja tudi znana metoda – termična razgradnja amonijaka, pri čemer amonijak razpade na dušik in vodik. Enačba (5) opisuje katalitično razgradnjo amonijaka (Silveira, 2017).



1.3 Shranjevanje vodika

Vodik je najlažji element, ki zahteva velike količine, visok tlak, nizko temperaturo in napredne tehnike za shranjevanje. Shranjevanje vodika prinaša velike izzive glede varnosti shranjevanja, aplikacije in končne lokacije uporabe. Vodik je pri normalni atmosferi plin z nizko gostoto 0,0899 g/m³. Na sliki 5 je prikazana gostota vodika v primerjavi z drugimi alternativnimi gorivi (Dincer & Zamfirescu, 2016).

Slika 5: Energijska gostota vodika v primerjavi z drugimi alternativnimi gorivi



Prirejeno po Dincer & Zamfirescu (2016).

Iz prikaza na sliki 5 opazimo, da je energijska gostota vodika v vseh treh fizičnih stanjih manjša kot pri drugih alternativnih gorivih. 324 g vodika vsebuje enako količino kurilne vrednosti kot en kilogram bencina. Občutno razliko prinaša prostorninska vrednost. Prostornina enega kilograma bencina znaša 1,3 litra, 324 g vodika, shranjenega v plinastem stanju pri standardni temperaturi in pod standardnimi tlačnimi pogoji, doseže prostornino do 3932 litrov (Dincer & Zamfirescu, 2016).

Vodik je lahko shranjen na tri načine: v stisnjenem plinastem stanju (angl. compressed gas), tekočem stanju (angl. cryogenic liquid) in metal-hidridnem stanju (angl. hydrogen storage in metal hydrides). V stisnjenem stanju pri 700 barih ima stisnjen vodik za proizvodnjo le 15 % energijske gostote, ki zadostuje za številne aplikacije vključevanja vodika. V primerjavi s shranjevanjem vodika v tekočem stanju ima ta bistveno večjo energijsko gostoto glede na volumen. Glavna razlika je v mediju, kjer je vodik shranjen. Za tekoče stanje vodika je potreben poseben shranjevalnik, v katerem je možno shranjevati vodik pri nizki temperaturi ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). Od naštetih metod shranjevanja vodika je rezervoar, v katerem je shranjen tekoči vodik, najzahtevnejši. Ta medij shranjevanja vključuje izmenjevalnik toplote, ki je sestavljen iz 40 plasti kovinske folije in služi kot vakuumski super izolator. Pomemben segment tega medija je tudi varnostni ventil za odzračevanje vodika in preprečevanje povečanja tlaka plina. Ne glede na kompleksen dizajn medija za shranjevanje tekočega vodika pride do izparevanja vodikovega plina zaradi toplotnih izgub. Lažji način shranjevanja je medij, v katerem je shranjen plinasti vodik. Proces, ki se uporablja za izdelavo rezervoarja, se imenuje navijanje filamenta. Uporabljajo se aluminijasti ali plastični rezervoarji, obdani s steklenimi vlakni. Vodik je nato stisnjen s pomočjo kompresorja. Izdelava takšnega medija za shranjevanje je hitrejša in stroškovno ugodnejša kot pri izdelavi

medija za shranjevanje tekočega vodika. Poleg naštetih metod shranjevanja vodika lahko pri trdnem vodiku v kovinah dosežemo večje volumetrične energijske gostote. V primerjavi s shranjevanjem vodika v plinastem in tekočem stanju je shranjevanje vodika v trdnem kovinskem stanju najbolj varno zaradi shranjevanja v delovnem tlaku, ki je med enim in desetimi bari, ter temperaturo, ki lahko sega od 10 do 80 °C. Kemična reakcija med vodikom in kovino je eksotermna pri absorpciji oziroma endotermna pri desorpciji. Količina toplote je zadostna, da jo je mogoče opravljati ves čas, tudi med desorpcijo, če je potreben zadosten pretok vodika, ki je uporabljen pri polnjenju gorivnih celic. Najpogosteje uporabljene zlitine za shranjevanje vodika v metal-hidridnem stanju so titan, železo, aluminij in magnezij. Shranjevanje vodika je predvsem odvisno od njegove končne uporabe. Tekoči vodik se uporablja pri visokotehnoloških aplikacijah. Stisnjen plinast vodik se v večini primerov uporablja pri mobilnih aplikacijah, skratka pri transportu vozil. Trdni vodik v metal-hidridnem stanju je uporabljen za stacionarne aplikacije, ki se uporabljajo v industrijskih obratih (Khellaf, 2021).

1.4 Distribucija vodika

Širok spekter uporabe vodika zahteva različne tehnološke poti za distribucijo vodika. Vodik se lahko transportira v različnih oblikah: v obliki plina prek cevovodov, v visokotlačnih cevni priklonnikih, kot tekoči vodik v kriogenih rezervoarjih (tj. vodik, ohlajen na temperaturo -253 °C ali manj) in prek drugih kemičnih nosilcev vodika. Različni načini prevoza, skladiščenja in uporabe vodika zahtevajo različne tehnologije za uporabo vodika (U. S. Department of Energy, 2020a).

Najpogosteje se vodik v plinastem stanju prevaža v plinskih jeklenkah, v katerih je vodik stisnjen med 200 in 700 bari, s tovornjaki ali s cevni priklonnikom. Pogosto se prevaža tudi v tekočem stanju v kriogenih rezervoarjih. Stisnjen plinasti vodik je primeren za prevoz na kratke razdalje z majhno količino vodika. Razdalje za distribucijo stisnjenega plinastega vodika znašajo od 100 do 200 kilometrov. Za transport se uporabljajo posamezni valji, svežnji z večjim številom valjev ali dolge valjaste cevi, ki so nameščene na prikolicah. Običajno se prevaža do 6200 Sm^3 vodika oziroma 550 kilogramov stisnjenega vodika pod tlakom med 200 in 300 bari na tovornjakih z omejitvijo teže do 40 ton. Posebnost je prikolica, ki jo je izdelalo podjetje Linde Group. Ta lahko prevaža do 1100 kilogramov oziroma 13.100 Sm^3 stisnjenega vodika pri 500 barih. V Evropi je za najboljšo distribucijo vodika uporabljen transport s tovornjaki, ki prevažajo stisnjen vodik v plinskem stanju s cevni priklonniki (HyLAW, 2019). Za daljše razdalje in večje količine vodika je primeren vodik v tekočem stanju. V primerjavi s stisnjenim vodikom je en tovornjak zmožen prevažati do 3500 kilogramov tekočega vodika. Pri večjih razdaljah postane distribucija vodika s tovornjaki manj izvedljiva. Za večje razdalje se uporabljajo cevovodi, ki lahko potencialno transportirajo več tisoč ton vodika na dan. Razdalje cevovodov, primerne za vodik, so v primerjavi s cevovodi, ki prenašajo fosilne pline, majhne. Vodikovi cevovodi, ki zajemajo Azijo, Evropo in Severno Ameriko, znašajo 5000 kilometrov, medtem ko cevovodi fosilnih

plinov znašajo tri milijone kilometrov. Cevovodi za fosilna goriva so zmožni prenašati tudi zeleni vodik, vendar potrebujejo zamenjavo ventilov, regulatorjev, merilnih naprav in kompresorjev. Ta menjava zaradi neprimernih cevovodnih materialov ni možna povsod. Distribucija vodika je možna tudi prek ladijskega transporta. Ta omogoča prenos tekočega vodika, amonijaka, metanola, tekočih organskih vodikovih nosilcev (angl. liquid organic hydrogen carrier, v nadaljevanju LOHC) in ostalih sintetičnih tekočin (IRENA, 2019b).

1.5 Pretvorba vodika

Vodik je nosilec energije, kar pomeni, da je za uporabo te energije, ki jo nosi vodik, potrebna pretvorba vodika v električno ali toplotno energijo. Omenjeno pretvorbo lahko izvedemo z izgorevanjem s pomočjo turbin in z motorji na notranje izgorevanje ter z elektrokemičnim procesom s pomočjo vodikovih gorivnih celic.

1.5.1 Pretvorba vodika z izgorevanjem

Vodik se lahko pretvori v toploto na enak način kot zemeljski plin, dizelsko gorivo, bencin in druga sintetična goriva. Razlika je v tem, da pri izgorevanju vodika ne nastaja CO₂, ampak je stranski produkt voda. Primer vodika, uporabljenega kot gorivo, je v motorjih raketnih plovil. Prednosti uporabe vodika z izgorevanjem so prilagodljivost goriva, ki zmanjša uporabo fosilnih goriv z možnostjo izgorevanja vodika in mešanic fosilnih goriv, boljša varnost pri shranjevanju vodika in večja uporabnost elektrike, pridobljene z OVE. Tudi za proizvodnjo električne energije se uporabljajo vodikove turbine, ki jim svetovna industrija električne energije v zadnjem času namenja čedalje več pozornosti. Komerzialne vodikove turbine velikega razpona lahko uporabljajo mešanico vodikova in zemeljskega plina z do 30 % vodika v primerjavi z manjšimi zračno-plinskimi turbinami, ki lahko izkoristijo do 90 % vodika (U. S. Department of Energy, 2020a).

1.5.2 Pretvorba vodika z vodikovimi gorivnimi celicami

Vodikove gorivne celice čedalje bolj postajajo vodilen vir sodobne tehnologije v primerjavi z onesnažujočimi motorji na notranje izgorevanje. Vodikova gorivna celica je naprava, ki se med uporabo polni in proizvaja električno energijo z nizkotemperaturno elektrokemično reakcijo vodika in kisika iz zraka. Na trgu obstajajo različne vrste gorivnih celic, vendar so vse zasnovane iz dveh elektrod (anoda in katoda), ki sta ločeni s trdnim ali tekočim elektrolitom in membrano (Edwards, Kuznetsov, David & Brandon, 2008). Znane vodikove gorivne celice so membranska gorivna celica s protonsko izmenjavo (angl. proton exchange membrane fuel cell), trdna oksidna gorivna celica (angl. solid oksid fuel cell), gorivna celica s fosforno kislino (angl. phosphoric acid fuel cell), gorivna celica s staljenim karbonatom (angl. molten carbonate fuel cell) in alkalne gorivne celice (angl. alkaline fuel cell) (Basile & Iulianelli, 2014). Razlika med vodikovimi gorivnimi celicami in baterijami je v

tem, da vodikove gorivne celice neprekinjeno proizvajajo električno energijo, baterije pa jo zgolj shranjujejo. Ta proces neprekinjenega toka proizvodnje električne energije je mogoč le v primeru, da je na voljo gorivo, v tem primeru vodik in zrak. Stranski produkt, ki ga proizvedejo vodikove gorivne celice, je voda. Zaradi nizkotemperaturne reakcije vodikova gorivna celica ne proizvede nobenih dušikovih oksidov kot motorji na notranje izgorevanje. Obstajajo tudi gorivne celice, ki za gorivo uporabljajo ogljikovodike in je pri tem stranski produkt tudi CO₂, vendar je njegova količina v primerjavi z motorji na notranje izgorevanje znatno manjša. Če primerjamo izkoristek vodikove gorivne celice in bencinski motor na notranje izgorevanje, ima vodikova gorivna celica do 65 % izkoristek, medtem ko ima bencinski motor na notranje izgorevanje zgolj 25 % izkoristek. Vodikove gorivne celice se uporabljajo v transportnih vozilih in stacionarnih energijskih aplikacijah za oskrbo električnih omrežij, rezervno ali zasilno napajanje objektov in oskrbo objektov, ki niso povezani z električnim omrežjem (Edwards, Kuznetsov & Brandon, 2008; Felseghi, Carcadea, Raboca, Trufin & Filote, 2019; Lacko, Vidmar, Vindišar & Pirnat 2012).

1.6 Uporaba vodika

Vodik se uporablja v proizvodnji električne energije, industrijskem sektorju, proizvodnji, prometu in stavbnem sektorju. Z uporabo vodika v različnih panogah bo v prihodnosti prišlo do ekonomij obsega. Integracija vodika v različne gospodarske in industrijske namene izboljšuje ekonomičnost obstoječih in prihodnjih sistemov za proizvodnjo električne energije (U. S. Department of Energy, 2020a). Vodikove gorivne celice so ena izmed možnosti integracije vodika v današnjo tehnologijo. Prinašajo večji izkoristek in prispevajo k ogljični nevtralnosti. Aplikacija vodikovih gorivnih celic vključuje proizvodnjo električne energije, ki je lahko uporabljena v električnih distribucijskih omrežjih. Poleg omenjenega se ta električna energija lahko uporabi tudi v mikroomrežjih in za ogrevanje stavbnega sektorja. Vodikove gorivne celice bi nadomestile motorje na notranje izgorevanje predvsem v prometnem sektorju, ki se uporabljajo za napajanje osebnih vozil, avtobusov, tovornega prometa in raznovrstne strojne opreme (viličarji itd.). Uporaba vodikovih gorivnih celic pri sistemih za rezervno napajanje prinaša hiter zagon, dolgo neprekinjeno delovanje in manjšo porabo energije. Nadomestilo generatorjev na fosilna goriva prinaša zmanjšanje emisij, manjše vzdrževanje in manjšo hrupnost (Basile & Iulianelli, 2014). Uporaba vodika v kemičnih in ostalih industrijskih sektorjih pridobiva čedalje večjo pozornost, še zlasti v jeklarskem sektorju. Za pridobivanje jekla se uporablja premog in proizvodnja jekla po svetu prinaša od 7 do 9 % emisij TGP. Z uporabo vodika bi se ta odstotek bistveno zmanjšal. Aplikacija vodika v stacionarnih aplikacijah za proizvodnjo električne energije vključuje velike elektrarne, soprodukcijo toplotne energije in aplikacije za električno energijo v primeru izpada (U. S. Department of Energy, 2020a).

2 STROŠKOVNI VIDIK VODIKA

V nadaljevanju predstavljam stroškovni vidik vzpostavitve kemičnoindustrijskega obrata vodika. Osredotočam se na tri glavne vrste proizvodnih stroškov in v podpoglavjih predstavim različne metode, ki so uporabljene pri stroškovnih analizah. Na koncu poglavja opredelim različne metodološke analize stroškov za različne načine proizvodnje vodika.

2.1 Uporabljene metode pri stroškovnih analizah

V magistrskem delu se osredotočim na tri vrste stroškov pri analizi kemičnoindustrijskega obrata vodika. Stroški, ki so pomembni pri vzpostavitvi kemičnoindustrijskega obrata vodika, so investicijski stroški, fiksni stroški proizvodnje in spremenljivi stroški proizvodnje.

2.1.1 Opredelitev investicijskih stroškov

Številni avtorji (Towler & Sinnott, 2013; Peters & Timmerhaus, 2006) navajajo, da sta dve glavni komponenti investicijskih stroškov naložbe v osnovna sredstva in obratni kapital. Naložbe v osnovna sredstva so sestavljene predvsem iz gradnje in namestitve obrata ter skupnih stroškov načrtovanja. Avtorja Towler in Sinnott (2013) ločita štiri glavne vrste naložb v osnovna sredstva: stroške znotraj obrata, spremembe in izboljšave infrastrukture, znane kot naložbe izven obrata, stroške gradnje in inženiringa ter stroške nepredvidenih izdatkov.

2.1.2 Naložbe v osnovna sredstva

Vzpostavitev novega obrata zahteva oceno investicijskih stroškov. Ocena investicijskih stroškov je pomembna zaradi študije izvedljivosti, pravilne izbire opreme in zagotavljanja informacij za načrtovanje investicijskih zahtev. Naložbe v osnovna sredstva zajemajo stroške nakupa, dobave in namestitve proizvodne opreme, konstrukcij, opreme za nadzor okolja, stroške inženiringa, gradnje itd. Ostali stroški so podrobneje opisani v nadaljnjih podpoglavjih. Na splošno je ocena naložb v osnovna sredstva pomembna za razvoj celostne ekonomike procesa in ti podatki se uporabljajo pri amortizaciji, denarnih tokovih in donosnosti samega projekta (Southard & Green, 2019).

2.1.2.1 Naložbe znotraj obrata

Stroški obrata vključujejo začetne stroške nabave in namestitve celotne opreme, ki sestavljajo novi obrat. Neposredni stroški obrata po Towler in Sinnott (2013) vsebujejo naslednje postavke:

- celotna glavna oprema obrata in izdelava (reaktorji, toplotni izmenjevalniki, črpalke, kompresorji, motorji, ventilatorji, turbine, filtri itd.),
- prostorne strukture (cegovodi, ventili, konstrukcije, izolacija, barva, različna olja, katalizatorji, električne napeljave itd.),
- gradbena dela (ceste, temelji, stavbe in piloti, kanalizacije, nasipi itd.),
- celotno delo in namestitve.

Posredni stroški obrata po Towler & Sinnot (2013) vsebujejo naslednje postavke:

- gradbeni stroški in najem gradbene opreme, začasna oskrba z vodo in električno energijo,
- storitve na terenu (stroški specialistov, plačilo nadur in stroški, povezani s posledicami neugodnega vremena),
- gradbeno zavarovanje,
- prejemki in obremenitve dela, kot so socialna varnost, nadomestilo za delo itd.,
- splošne postavke (honorarji zastopnikov, pravni stroški, lokalni davki, pristojbine za patente, splošni stroški podjetja, uvozne dajatve itd.).

2.1.2.2 Naložbe izven obrata

Naložbe izven obrata vsebujejo opremo, storitve in strukture, ki niso neposredno vključeni v proizvodnjo izdelka, vendar so ključni za delovanja obrata. Pod takšne postavke spadajo glavne električne postaje s transformatorji, zunanje elektrarne s turbinskimi motorji in rezervnimi generatorji, vodne inštalacije (vodni kotli, kondenzacijski vodi, čistilne naprave, hladilni vodovodi, hladilni stolpi, vodovodne cevi, čistilne naprave za odpadno vodo, odvodavanje in kanalizacija), napajalni cevovodi, cisterne, laboratoriji z analitično opremo. Storitvene stroške izven obrata predstavljajo dodatna skladišča, železniški odcepi ter oprema za požarno zaščito, zaščito varnostnih sistemov in pomožnih stavb (Southard & Green, 2019). Predvsem naložbe izven obrata vsebujejo stroške komunalnih podjetij. Za te naložbe velja enak oziroma še večji nadzor kot pri naložbah znotraj obrata. Stroški izven obrata navadno predstavljajo od 20 do 50 % stroškov notranjega obrata, odvisno od obrata (Towler & Sinnot, 2013).

2.1.2.3 Stroški gradnje, inženiringa in nepredvideni izdatki

Stroški gradnje in inženiringa vsebujejo načrtovanje obratov, stroškovni inženiring, gradbeni inženiring, nabavo glavnih elementov za izgradnjo obrata, gradbeni nadzor in upravne stroške. Lahko rečemo, da so to stroški notranjih in zunanjih izvajalcev, ki so odvisni od obsega obrata. Stroški gradnje in inženiringa predstavljajo približno 30 % stroškov naložb znotraj obrata in 10 % stroškov naložb izven obrata. Stroški nepredvidenih izdatkov poleg napak pri izgradnji projekta pokrivajo manjše spremembe znotraj gradnje, spremembe cen na trgu (predvsem so to cene materialov), težave in spore s podizvajalci in navsezadnje

valutna nihanja. Stroški nepredvidenih izdatkov predstavljajo do približno 10 % stroškov naložb znotraj/izven obrata (Towler & Sinnot, 2013).

2.1.3 Obratni kapital

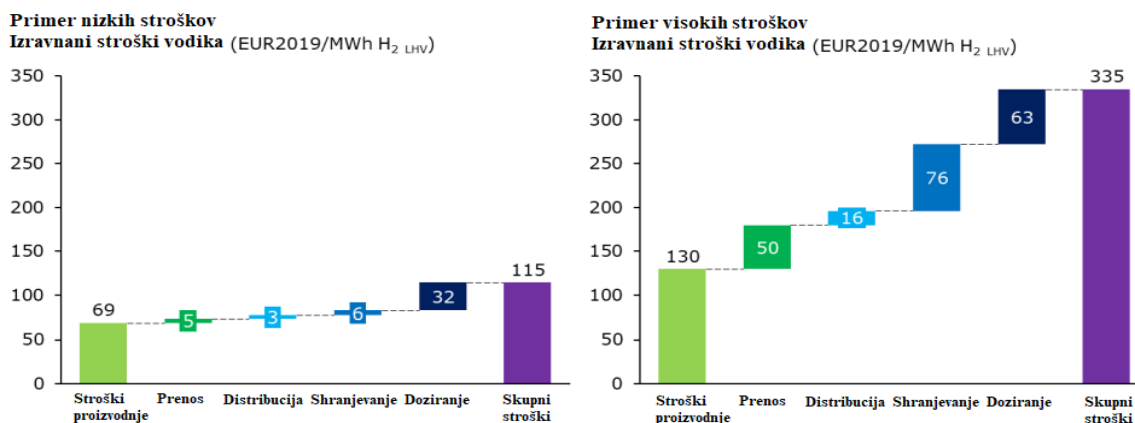
Avtorja Southard in Green (2019) navajata, da je obratni kapital sredstvo, ki je potrebno za vsakodnevno poslovanje podjetja. S prodajo končnega proizvoda se obratni kapital nenehno unovčuje in obnavlja. Ustrezen znesek obratnega kapitala služi tudi kot potrebna prožnost kritja stroškov v primeru nastale škode zaradi naravnih pojavov, nesreč, zamud, stavk itd. Obratni kapital kemičnoindustrijskega obrata vodika je sestavljen iz skupnega zneska denarja, vloženega v surovine in materiale na zalogi, dokončanih proizvodov na zalogi in stranskih proizvodov v postopku izdelave, denarnih sredstev za mesečna plačila stroškov poslovanja, terjatev za dobavljene, vendar še ne plačane izdelke, obveznosti in davčnih obveznosti ter zaloge rezervnih delov. Obratni kapital je potreben, dokler obrat deluje, in se ne zamenjuje z različnimi začetnimi investicijskimi stroški (Towler & Sinnot, 2013).

Obratni kapital se povrne ob koncu življenjske dobe obrata (po koncu zalog). Razmerje med obratnim kapitalom in celotnimi investicijskimi naložbami je odvisno od vrste obrata. Odstotek obratnega kapitala se lahko pri sezonskih obratih zaradi višjih zalog poveča za do 50 % celotnih kapitalskih naložb. Višje oziroma naraščajoče vrednosti obračanja obratnega kapitala prikazujejo uspešno vodenje podjetja (Towler & Sinnot, 2013; Peters & Timmerhaus, 2006).

2.1.4 Proizvodni stroški

Iz slike 6 je razvidno, da so stroški proizvodnje najvišji med končnimi stroški vodika. V primeru nizkih stroškov stroški proizvodnje predstavljajo 60 % končnih stroškov vodika. Stroški proizvodnje se v primeru visokih stroškov zmanjšajo, in sicer predstavljajo 38,8 % končnih stroškov vodika. Ostali manjši stroški so stroški dobave, ki vključujejo prenos, distribucijo, shranjevanje in doziranje vodika. V naslednjih dveh podpoglavjih podrobneje opredelim fiksne in spremenljive stroške proizvodnje.

Slika 6: Izravnani stroški vodika



Prirejeno po European Commission (2020a, str. 8).

2.1.4.1 Fiksni proizvodni stroški

Fiksni proizvodni stroški se glede na stopnjo proizvodnje ne spreminjajo. Pod fiksne stroške proizvodnje štejemo operativne stroške dela, stroške vzdrževanja, zemljišča, najemnine in lokalne davke na nepremičnine, zavarovanja, plačila obresti, licenčne pristojbine in splošne stroške za podjetja (Towler & Sinnott, 2013).

Plače delavcev se zaradi potrebne izkušenosti delavcev v kemičnoindustrijskem obratu vodika opredeljuje kot fiksne stroške proizvodnje, saj se zaradi usposobljenosti delavcev število zaposlenih ne spreminja veliko, ne glede na nihanje kratkoročnih sprememb na obratih. Stroški plač znašajo od 30 do 40 % operativnih stroškov dela, medtem ko stroški nadzora predstavljajo od 15 do 30 % operativnih stroškov dela, odvisno od zahtevnosti obrata (Southard & Green, 2019).

Avtorja Southard in Green (2019) navajata, da se lahko ocenijo letni stroški in stroški na enoto, ko je določeno število delavcev v izmeni. Z enačbo (6), ki jo je razvil Wessel (1952), predstavljam metodo ocenjevanja potreb po delovni sili za različne kemičnoindustrijske obrate.

$$\log Y = -0,783 \log X + 1.252 + B \quad (6)$$

Enačba je primerna za proizvodnjo od 2 do 2000 ton proizvedenega proizvoda na dan. Y predstavlja operativno delo upravljavca (h/tono), X predstavlja zmogljivost obrata (ton/dan) in B konstanto, ki je odvisna od vrste procesa. Konstanta B ima razpon od 0,132, ki predstavlja serijske procese z minimalno zahtevo dela, +0, ki predstavlja proces s povprečnimi zahtevami dela, in 0,167, ki predstavlja dobro nadzorovan proces. Enostavnejši način ocenjevanja potreb po delu sta odkrila avtorja Ulrich in Vasudevan (2004) s pomočjo

poteka diagramov in slik procesa. Pri njuni metodi se upoštevajo razpored in vrsta opreme, število enot in količina opreme za nadzor procesa.

Stroški vzdrževanja spadajo med fiksne proizvodne stroške ne glede na stopnjo proizvodnje, kajti obrat je treba vzdrževati, če deluje s polno zmogljivostjo, oziroma se stroški vzdrževanja povečujejo, ko obrat deluje z manjšo stopnjo zmogljivosti. Vsebujejo stroške zamenjave in popravil opreme ter strošek dela, ki je potreben za vzdrževanje del. V primerjavi s prejšnjim stoletjem, ko so imela podjetja veliko število zaposlenih za vzdrževalna dela, v sedanjem času vzdrževalna dela izvajajo zunanji izvajalci (angl. outsourcing). Avtorja Towler in Sinnot (2013) navajata, da so stroški vzdrževanja ocenjeni kot del naložb znotraj obrata. Pri obratih, ki vsebujejo tekočine ali pline, se ti stroški pričenejo pri 3 %. Za obrate pri obdelavi trdnih snovi ali večjo mehansko opremo znašajo 5 % ali več naložb znotraj obrata. Podobnega mnenja sta avtorja Southard in Green (2019), ki navajata, da vzdrževalni stroški segajo od 6 do 10 % naložb v osnovna sredstva.

Večina kemičnoindustrijskih obratov vodika je zgrajenih na najetih zemljiščih. Finančno je enostavneje najeti zemljišče kot pa vezati sredstva za nakup zemljišča. Poleg najema zemljišč pa je dosti obratov zgrajenih na že prej uporabljenih podobnih obratih, kajti lokalne vlade spodbujajo podjetja za gradnjo obratov na opuščeni lokacijah. S tem podjetja zmanjšajo delež komunalnih storitev in infrastrukturnih stroškov. Stroški najema zemljišča oziroma stavb so odvisni od lokacije, vendar stroški najema znašajo približno od 1 do 2 % naložb v osnovna sredstva. Če je zemljišče kupljeno, so stroški zemljišča vključeni v naložbe v osnovna sredstva. Zemljišč, ki so usredstvena, ni mogoče amortizirati, temveč se stroški sanacije obračunajo po zaključku projekta. Obrate se lahko financira tudi z dolžniškim financiranjem (obveznice ali posojila), ki predstavlja plačilo obresti in spada pod stalne stroške projekta. V tem primeru imajo upniki prednostno pravico do dobička kot delničarji, kar pomeni, da se plačilo dolga izvede kot strošek proizvodnje, ne pa kot odložena plačila iz zadržanega dobička. Zaradi specializiranega dela in večje tveganosti za nevarnosti je treba kemičnoindustrijske obrate vodika zavarovati za kritje odgovornosti tretjih oseb in morebitno nastalo škodo. Podjetja plačujejo zavarovalne premije glede na predhodno uspešnost oziroma oceno tveganja, ki pa običajno znašajo približno 1 % naložb v osnovna sredstva. Tehnologija proizvodov je pogosto patentirana. Stroški licenčnih pristojbin vsebujejo patente in licenčne pristojbine. Lastniki patentov pogosto vključijo pristojbine za licenčnino. Če licenčnine za patente niso vključene v ceno proizvoda, se o njej pogajata imetnik patenta in podjetje, ki želi uporabljati to tehnologijo. Cena licenčnine se razlikuje glede na razpoložljivost alternativnih rešitev in obojestranskih želja. Licenčnina je lahko določena kot odstotek prihodkov, vendar se najpogosteje uporabljajo stalne stopnje na kilogram (standardna merska enota), ki temelji na proizvodni zmogljivosti (Towler & Sinnot, 2013).

Towler in Sinnot (2013) navajata tudi splošne stroške podjetij, ki spadajo pod razdelek fiksnih proizvodnih stroškov. To so stroški raziskav in razvoja, ki zajemajo razvoj novih proizvodov, testiranj itd. Stroški raziskav in razvoja so odvisni od panoge obrata. Okoli 1 %

prihodkov znašajo stroški raziskav in razvoja za sektorje goriv in petrokemije, medtem ko za biotehnoška in farmacevtska podjetja stroški raziskav in razvoja znašajo do 15 % prihodkov podjetja. Drugi splošni stroški podjetij so prodaja in oglaševanje proizvoda. Stroški oglaševanja in prodaje zajemajo stroške delavcev, oglaševalske stroške, kot so promocijski materiali, potovanja do ključnih strank, raziskav trga itd. Blago v razsutem stanju (zrnja, suhi tovor), ki je proizvedeno po standardu ASTM (angl. American society for testing and materials), ima skoraj ničelne stroške oglaševanja in prodaje, medtem ko za ostale proizvode prodajni in oglaševalski stroški znašajo do 5 % celotnih proizvodnih stroškov. Zadnji razdelek splošnih stroškov zajemajo stroški administracije. Ti obsegajo splošno upravljanje, oddelke za nabavo in javna naročila, finančne oddelke, oddelke za človeške vire, oddelke za informativno tehnologijo, oddelke za računovodstvo, korporativno komuniciranje itd. Ti stroški so odvisni od prihodkov in števila zaposlenih v podjetju. Ocena administrativnih stroškov, ki temelji na številu zaposlenih, znaša 65 % stroškov dela, ki vsebuje tudi nadzorne in splošne stroške.

2.1.4.2 Spremenljivi proizvodni stroški

Spremenljivi proizvodni stroški v kemičnoindustrijskem obratu vodika so tisti proizvodni stroški, ki so primarno sorazmerni s stopnjo proizvodnje. Najpogostejši spremenljivi proizvodni stroški so stroški surovin in stroški komunalnih storitev. Med spremenljive proizvodne stroške štejemo tudi stroške potrošnega materiala in stroške odlaganja odpadkov.

Načeloma je strošek za surovine največja stroškovna postavka pri izdelavi proizvoda. Za večino kemičnoindustrijskih obratov strošek surovin predstavlja od 80 do 90 % proizvodnih stroškov. V primeru, da se te surovine reciklirajo in uporabijo odpadni materiali, ti stroški na koncu znatno upadejo. Komunalni stroški obratov zajemajo stroške goriv, vode, ogrevalnih tekočin, električne energije in ostale potrebne storitve za delujočo proizvodnjo. Glavni dejavnik komunalnih stroškov je strošek goriv in strošek električne energije. Komunalni stroški običajno predstavljajo manj kot 15 % proizvodnih stroškov. Potrošni materiali v kemičnoindustrijskem obratu predstavljajo materiale, ki se uporabljajo v postopku izdelave proizvodov. Načeloma so to različne vrste kislin, baz, topil, katalizatorjev itd. Zaradi uporabe se ti materiali sčasoma razgradijo oziroma razpadejo in jih je zaradi tega treba zamenjati. Na primer cene najcenejših katalizatorjev se gibljejo okoli enega ameriškega dolarja za kilogram materiala. Zaradi višjih cen redkih in žlahtnih kovin se podjetja poslužujejo najema katalizatorjev. Ti se po porabi vrnejo proizvajalcu, ki jih obnovi z žlahtnimi kovinami. Količina uporabljenih potrošnih materialov v obratih ne prinaša toliko visokih stroškov celotnih stroškov proizvodnje. Znašajo okoli 3 % celotnih proizvodnih stroškov, vendar so ti odvisni od kompleksnosti obratov. Podjetja s kompleksnimi obrati zasnujejo sisteme za ravnanje, shranjevanje, merjenje in odstranjevanje redkih potrošnih materialov. Nekatere materiale in stranske produkte v proizvodnji končnega proizvoda je zaradi nemogočega recikliranja treba odstraniti. Za odstranitev marsikaterih materialov podjetja potrebujejo dodatno obdelavo. Odpadni materiali lahko povrnejo energijo obratom

tako, da se iz njih proizvede toplota. Takšni odpadki so ogljikovodiki, in sicer odpadna olja, uporabljena topila in odpadni plini (Towler & Sinnott, 2013; Peters & Timmerhaus, 2006). Vrednost toplote odpadnih materialov se lahko oceni z enačbo (7), ki jo navajata avtorja Towler in Sinnott (2013).

$$P_{W_{FV}} = P_F \times \Delta H^{\circ}_C \quad (7)$$

$P_{W_{FV}}$ predstavlja strošek odpadkov kot gorivo (denarna enota/kg), P_F predstavlja ceno goriva (denarna enota/GJ) in ΔH°_C predstavlja toploto izgorevanja (GJ/kg). Stroški odstranjevanja odpadkov so zaradi lokacije in zmožnosti obratov spremenljivi. Nevarne odpadke, ki jih podjetja ne morejo sežigati, odstranimo s pomočjo zunanjih izvajalcev, ki se ukvarjajo z naravnimi odpadki in imajo za to potreben specializiran obrat. Višina stroškov se spremeni, če je treba zaradi sežiga nevarnih odpadkov vgraditi dodatne čistilne sisteme za izpuste (Towler & Sinnott, 2013).

2.1.5 Izravnani stroški

Izravnani strošek neke energije predstavlja kazalnik za analiziranje ekonomske učinkovitosti in konkurenčnosti tehnologije. S pomočjo kazalnika izravnanih stroškov lahko kvantitativno merimo ekonomsko ustreznost določene tehnologije. Pogosto se ta kazalnik uporablja za ocenjevanje konkurenčnosti električne energije, proizvedene iz različnih virov. Pri konceptu izravnanih stroškov električne energije (angl. levelized cost of electricity, v nadaljevanju LCOE), ki meri strošek proizvodnje električne energije na enoto energije, se pri vodiku uporablja podoben kazalnik. Izravnani strošek vodikove energije (angl. levelized cost of hydrogen energy, v nadaljevanju LCOH) meri stroške proizvodnje vodika na eno enoto vodika (Fan, Yu, Li, Xu & Zhang, 2022; Ramsden, Steward & Zuboy, 2009).

Avtorji Fan, Yu, Li, Xu in Zhang (2022) navajajo, da je vrednost kazalnika za izravnane stroške vodika določena s točko, v kateri sta diskontirana vrednost vsote prihodkov in diskontirana vrednost vsote stroškov enaki. Enačbi (8) in (9) predstavljata izračun LCOH.

$$\sum_{t=0}^n \frac{P_t \times Q_{ht}}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^N \frac{COST_t}{(1+r)^t} \quad (8)$$

P_t je cena vodika na trgu v letu (t), Q_{ht} predstavlja proizvodnjo vodika v letu (t), $COST_t$ pa je strošek projekta v letu (t). N je življenjska doba projekta, r pa je diskontna stopnja. Če je P_t konstanten, lahko enačbo (8) zapišemo kot enačbo (9).

$$LCOH = P_t = \frac{COST_{Initial} + \sum_{t=1}^N \frac{COST_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{Q_{ht}}{(1+r)^t}} \quad (9)$$

V tem primeru $COST_{Initial}$ predstavlja naložbo v osnovna sredstva projekta proizvodnje vodika. Iz enačbe (9) razberemo, da je LCOH enak razmerju med sedanjimi vrednostmi vsote vseh stroškov v življenjskem ciklu projekta in sedanji vrednosti proizvodnje vodika.

2.1.6 Celotni strošek proizvoda

Skupni proizvodni stroški so seštevek stroškov surovin ter posrednih in neposrednih stroškov. Kot sem že navedel, ti stroški spadajo med fiksne in spremenljive stroške proizvodnje. Celotni strošek proizvoda pa poleg že naštetih stroškov zajema še stroške pakiranja in odpreme. Stroški odpreme se lahko razlikujejo glede na način pakiranja in dobave. Lahko se pošiljajo v embalažah, cisternah, cevovodih itd. Skupno omenjeni stroški predstavljajo prevoz v obratu do skladišča končnih uporabnikov (Southard & Green, 2019).

Celotni stroški poslovanja zajemajo celotne stroške proizvoda in splošne režijske stroške. Splošni režijski stroški zajemajo vzdrževanje celotnih prodajnih oddelkov, oddelkov inženiringa, razvojnih zmogljivosti in upravnih oddelkov. Za vsak proizvod se določi ustrezen strošek, ki se giblje od 6 do 15 % letnega prihodka proizvoda (Southard & Green, 2019).

2.2 Stroški proizvodnje modrega vodika

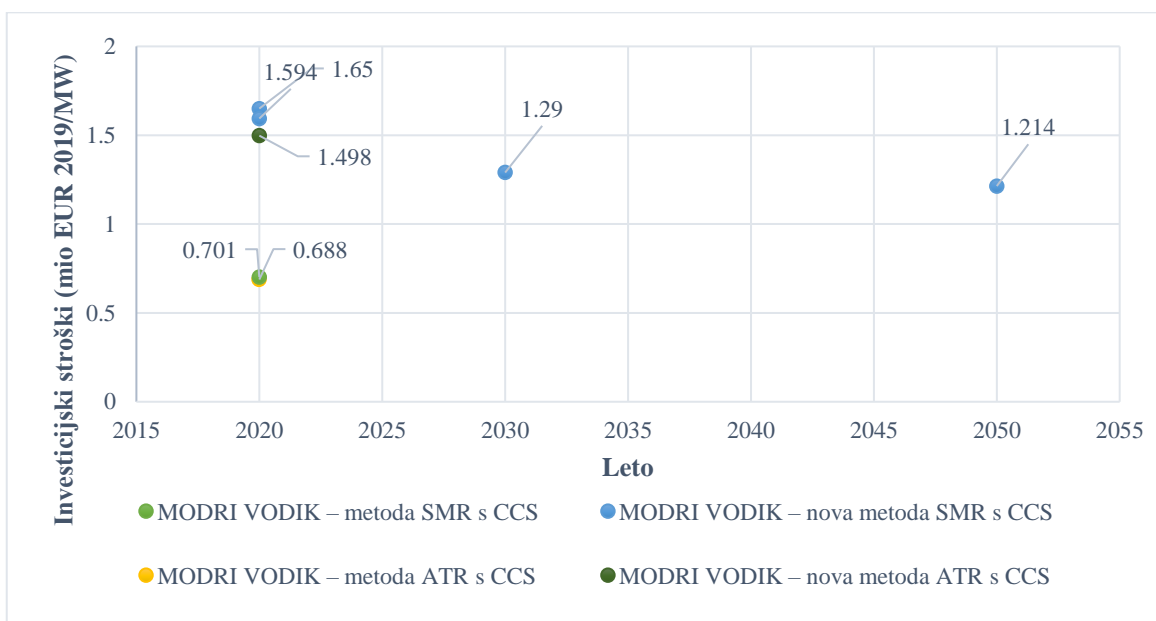
V EU se večina vodika, tj. 64 % celotne proizvodne zmogljivosti, proizvede lokacijsko (lastna proizvodnja) v velikih industrijskih obratih, 21 % vodika je proizvedenega kot stranski produkt industrijskega procesa. Preostalih 15 % celotne proizvodne zmogljivosti proizvodnje vodika se proizvede centralno in se dobavlja na povpraševana mesta (vodik za prodajo). Sivi vodik je proizveden iz fosilnih goriv z načinom SMR in uplinjanjem premoga. V letu 2021 je ta način proizvodnje vodika predstavljal 95 % oskrbe z vodikom v EU. Ostalih 5 % se proizvede kot stranski proizvod v kemični industriji, predvsem z metodo elektrolize (European Commission, 2020a). Proizvodnja sivega vodika povzroča precejšen ogljični odtis. Metoda SMR pri proizvodnji vodika proizvede od 9 do 11 kilogramov CO₂ na en kilogram vodika, medtem ko metoda uplinjanja premoga proizvede od 18 do 20 kilogramov CO₂ na en kilogram vodika. V naslednjih podpoglavjih opredelim stroške proizvodnje modrega vodika. Za razliko od sivega vodika modri vodik proizvede od 0,4 do 4,5 kilograma CO₂ na en kilogram proizvedenega vodika (IRENA, 2022).

Panoga vodika se sooča z enakimi problemi, kot se je v preteklosti soočala panoga utekočinjenega zemeljskega plina (angl. liquefied natural gas, v nadaljevanju LNG). Panoga LNG se je v začetku soočala s problemom, kako zmanjšati cenovno tveganje izvoznikov in količinska tveganja končnih kupcev. Trgi LNG so imeli na začetku zagotovljene odjemalce z dolgoročnimi dvostranskimi pogodbami, ki so temeljile na treh temeljnih klavzulah. Prva klavzula je bila »vzemi ali plačaj«, s katero so končni kupci plačevali minimalne količine LNG ne glede na to, ali so jih potrebovali ali ne. Druga klavzula je zajemala »nadomestne vrednosti« LNG. Cene LNG niso temeljile na stroških proizvodnje, stroških dobave in stopnji dobička, ampak so bile vezane na cene konkurenčnih goriv (v tem primeru na ceno nafte). Zadnja klavzula je določala namembnost, ki je kupcu preprečevala, da bi kupljeno količino LNG preprodal tretjim osebam. Tako je trg z LNG postal večji in bolj predvidljiv (Energy Charter Secretariat, 2007).

2.2.1 Investicijski stroški in LCOH modrega vodika

Investicijski stroški za vzpostavitev infrastrukture za trgovino z vodikom na splošno prinašajo veliko tveganje na obeh straneh oskrbovalne verige. Zajemajo tveganje toka blaga, ki poteka od dobaviteljev in proizvodnje vodika prek distribucijskih kanalov do končnega kupca. Zaradi visokih investicijskih vrednosti oskrbovalne verige vodika sta potrebna zmanjševanje investicijskih tveganj s pomočjo konzorcijev ter visoka stopnja državne udeležbe in mednarodnega usklajevanja. Ključen vidik pri kemičnoindustrijskih obratih vodika je stabilnost toka prihodkov. Brez zadostnega toka prihodkov ni mogoče povrniti začetnih investicijskih stroškov, ki so nastali pri vzpostavitvi vodikovega obrata. Poleg stroškov SMR vodika in naprav za skladiščenje (rezervo) plinov je treba upoštevati tudi infrastrukturo za dobavo in skladiščenje modrega vodika (IRENA, 2022). Na sliki 7 prikazujem oceno investicijskih stroškov modrega vodika za leta 2020, 2030 in 2050. Modri vodik kategoriziram glede na metodi SMR in ATR. Obe metodi zajemata sistem CCS. Uporabljam podatke za metodo SMR s CCS in novo metodo ATR s CCS proizvodnje modrega vodika, ki sem jih pridobil iz različnih virov literature. Starim obratom proizvodnje vodika z metodami SMR in ATR so naknadno dodali sistem CCS, medtem ko ga pri novih metodah ta sistem že vključuje. V izračunih stroškov so upoštevani investicijski izdatki (angl. capital expenditure, v nadaljevanju CAPEX), strošek proizvodnje in strošek integracije sistema. Pri tem stroški kapitala niso vključeni (European Commission, 2020a). Podatki o investicijskih stroških modrega vodika se nahajajo v prilogi 2.

Slika 7: Investicijski stroški modrega vodika



Prirejeno po ASSET (2018), IEA (2019) in Jakobsen & Åtland (2016).

Investicijski stroški stare metode SMR in ATR so v letu 2020 primerljivi. Investicijski stroški so z novo metodo (z integriranim sistemom CCS) znatno višji od metode SMR z dodatno nadgradnjo sistema CCS. Iz slike 7 je razvidna cena padajočega trenda v nadaljnjih dvajsetih letih investicijskih stroškov nove metode SMR s sistemom CCS.

CAPEX po metodi SMR proizvodnje vodika sestavljajo proizvodni obrat, vgradnja in inženiring ter sistem CCS (naprava za zajemanje CO₂, strošek prenosa in vbrizgavanja CO₂ in stroški vrtnine). Operativne izdatke (angl. operating expense, v nadaljevanju OPEX) modrega vodika sestavlja pet glavnih parametrov: naravni plin, električna energija, sistem operativnih stroškov, davki na izpust CO₂ in OPEX sistema CCS. V tabeli 4 prikazujem razčlenitev OPEX modrega vodika z metodo SMR s sistemom CCS. V tabeli niso upoštevani davki na izpust CO₂ (Jakobsen & Åtland, 2016).

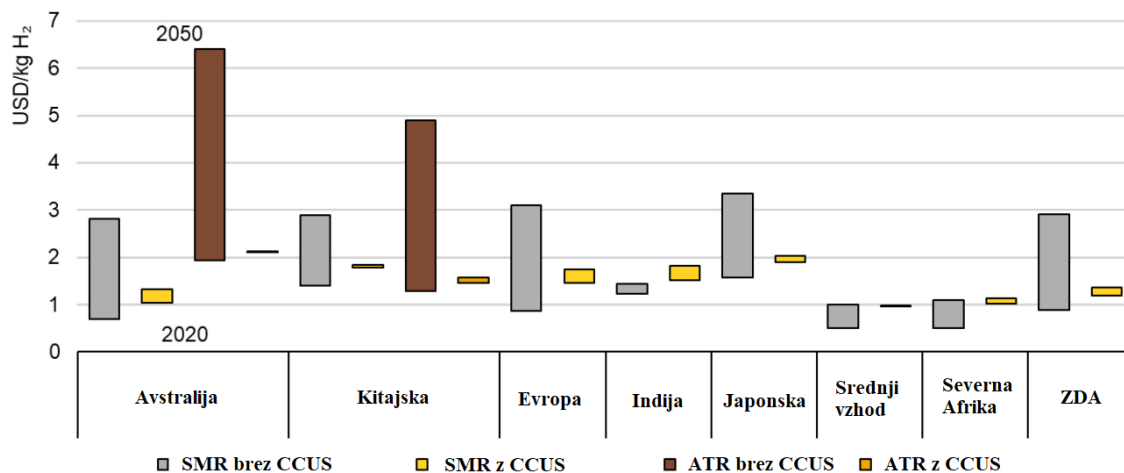
Tabela 4: Razčlenitev OPEX metode SMR s sistemom CCS proizvodnje modrega vodika

Spremenljivke	Delež operativnih stroškov (v %)
Zemeljski plin	70
Sistem OPEX	15
Električna energija	13
Sistem CCS (OPEX)	Manj kot 0,1

Prirejeno po European Commission (2020a).

Na sliki 8 prikazujem primerjavo LCOH modrega vodika med Avstralijo, Kitajsko, Evropo, Indijo, Japonsko, Srednjim vzhodom, Severno Afriko in Združenimi državami Amerike.

Slika 8: Primerjava LCOH modrega vodika



Opomba: Spodnje vrednosti LCOH temeljijo za leto 2020, zgornje za leto 2050.

Prirejeno po IAE (2021).

Za regije z nizkocenovnimi viri domačega premoga in zemeljskega plina (Rusija, Bližnji vzhod, Severna Afrika in Združene države Amerike) je proizvodnja modrega vodika s sistemom CCUS trenutno cenovno najugodnejša. Cena modrega vodika, proizvedenega iz zemeljskega plina s sistemom CCUS (odvisna od lokalnih cen zemeljskega plina), je v letu 2020 znašala od enega do dva ameriška dolarja na en kilogram vodika. Cena modrega vodika, proizvedenega iz zemeljskega plina brez sistema CCUS, pa je bila nižja za 50 centov ameriškega dolarja. Zaradi predvidenega dvigovanja davkov na izpuste CO₂ (od pet do deset odstotkov) bodo cene modrega vodika v prihodnosti narasle (IAE, 2021).

2.3 Stroški proizvodnje zelenega vodika

Proizvodnja zelenega vodika je popolnoma ogljično nevtralna. Ta proizvodnja temelji na elektrolizi z glavnim virom električne energije, ki je pridobljen iz OVE. Kot že omenjeno, je elektroliza vode elektrokemični proces, ki razdeli vodo na vodik in kisik. Pri opredelitvi stroškov proizvodnje zelenega vodika se bom osredotočil na tri različne tehnologije elektrolizerjev, in sicer na tehnologije ALK, PEM in SOEC.

Največji je delež uporabe elektrolizerjev s tehnologijo ALK, ki znaša 61 % celotne elektrolize. Sledi ji tehnologija PEM z 31 %. Tehnologija elektrolizerja s SOEC in preostala tehnologija elektrolizerjev znaša 8 % celotne elektrolize. Sistem tehnologije PEM zahteva manjše prostorsko-površinske kapacitete kot tehnologija ALK elektrolizerja. Zaradi tega bo tehnologija elektrolizerja ALK potencialno privlačnejša od tehnologije elektrolizerja PEM. Materiali pri tehnologiji PEM, ki se uporabljajo pri elektrodah (platina, iridij) in bipolarnih ploščah (titan) ter membranski materiali so dragi in zato prinašajo višje stroške na kilovatno uro (v nadaljevanju kWh) kot tehnologija ALK. Stroški katalizatorjev PEM se gibljejo okoli

1750 ameriških dolarjev na kWh. Stroški elektrolizerja s tehnologijo ALK so manjši, in sicer od 1000 do 1400 ameriških dolarjev na kWh (IAE, 2021).

2.3.1 Investicijski stroški in LCOH zelenega vodika

Na sliki 9 je prikazana ocena investicijskih stroškov zelenega vodika za leto 2020, 2030 in 2050. Osredotočil sem se na tri najpogostejše tehnologije elektrolizerjev, in sicer ALK, PEM in SOEC. Prav tako kot pri podatkih modrega vodika so v izračunih stroškov upoštevani investicijski izdatki (angl. capital expenditure, v nadaljevanju CAPEX), strošek proizvodnje in strošek integracije sistema. Pri tem stroški kapitala niso vključeni (European Commission, 2020a). Podatki o investicijskih stroških zelenega vodika se nahajajo v prilogi 3.

Slika 9: Investicijski stroški zelenega vodika



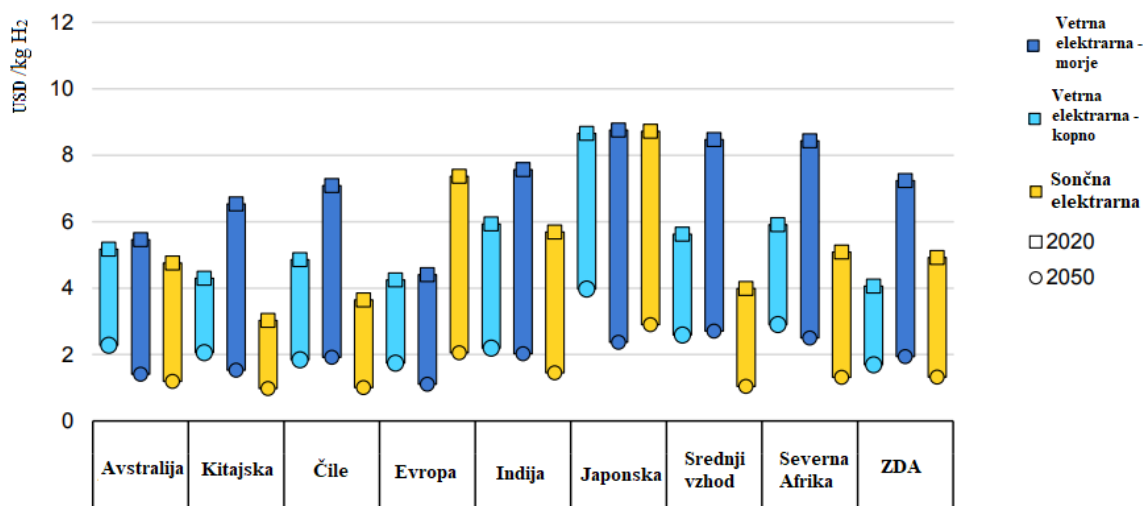
Prirejeno po IAE (2019), IRENA (2018) in Schmid (2017).

Investicijski stroški so v današnjem času s pridobivanjema vodika s tehnologijo elektrolizerja SOEC najvišji. Sledita ji tehnologiji elektrolizerja PEM in ALK. Prav tako kot pri modrem vodiku napovedani investicijski stroški tehnologij proizvodnje zelenega vodika z leti upadajo. Napovedi za tehnologijo elektrolizerja SOEC v letu 2050 predstavljajo oceno upada investicijskih stroškov za 82 %. V primerjavi z modrim vodikom se bodo investicijski stroški zelenega vodika približali ravni investicijskih stroškov modrega vodika. Navedena je posledica nižjih cen OVE, nižjih cen tehnologij elektrolizerjev in iniciativ za ogljično nevtralnost (European Commission 2020a; IAE, 2021).

Na sliki 10 je prikazana primerjava LCOH zelenega vodika med Avstralijo, Kitajsko, Čilom, Evropo, Indijo, Japonsko, Srednjim vzhodom, Severno Afriko in Združenimi državami

Amerike. Električna energija, pridobljena iz sončne elektrarne, postaja najugodnejši OVE na lokacijah z odličnimi sončnimi pogoji (države Srednjega vzhoda). Cena vodika, proizvedenega s tehnologijo elektrolizerja in OVE sončne elektrarne na Srednjem vzhodu, po ceni električne energije 17 ameriških dolarjev na MWh (CAPEX znaša 320 ameriških dolarjev na kilovat (v nadaljevanju kW)), znaša manj kot 1,5 ameriškega dolarja na kilogram vodika. Takšna cena vodika je primerljiva s ceno vodika, pridobljenega s tehnologijo SMR z vgrajenim CCUS. V EU bo takšna cena vodika, ki se pridobi na način elektrolize in vetrnih elektrarn na morju, primerljiva šele v letu 2050. Cena električne energije, pridobljene z vetrno elektrarno v Severnem morju, je leta 2020 znašala 60 ameriških dolarjev na MWh. Vodik, pridobljen z elektrolizo in z OVE vetrne elektrarne na morju, je tako znašal 4,5 ameriškega dolarja na kilogram vodika. Z zmanjšanjem stroškov vetrnih elektrarn na morju (večje turbine z večjo zmogljivostjo) bi lahko v prihodnje cena zelenega vodika znašala od 2 do 1,5 ameriškega dolarja na kilogram vodika. Do leta 2050 se bodo stroški OVE in stroški elektrolizerja znižali. Cena vodika bo lahko znašala okoli enega ameriškega dolarja na kilogram vodika (CAPEX znaša 250 ameriških dolarjev na kW) (IAE, 2021).

Slika 10: LCOH zelenega vodika, proizvedenega iz OVE



Opomba: Spodnje vrednosti LCOH veljajo za leto 2050, zgornje za leto 2020.

Prirejeno po IAE (2021).

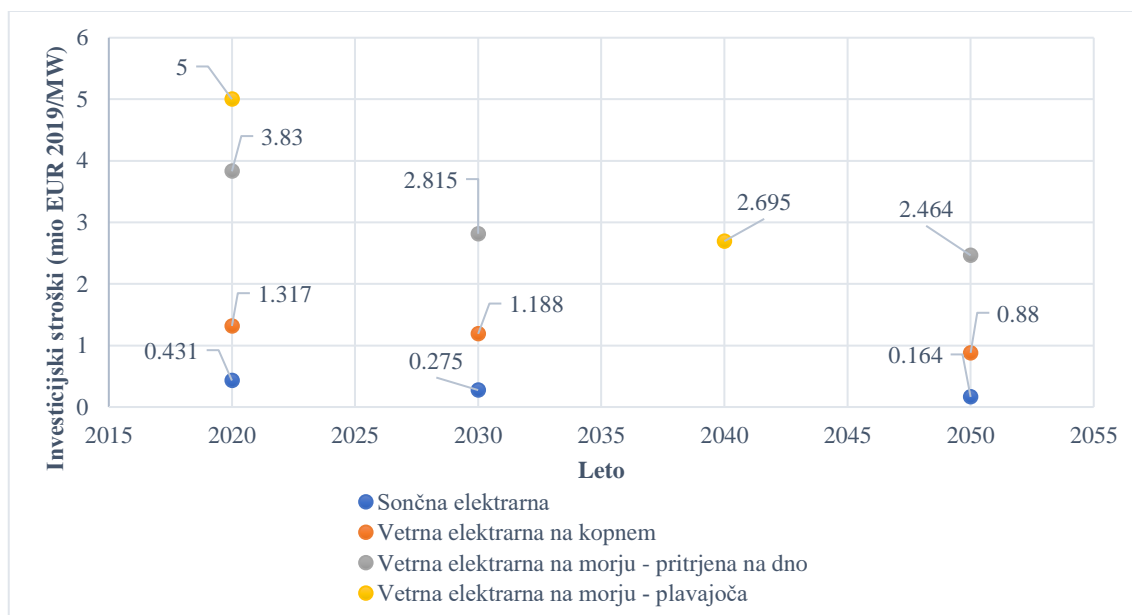
Zeleni vodik bo sčasoma začel konkurirati modremu vodiku. V državah, kot so Kitajska, Indija in Brazilija, bo zeleni vodik ugodnejši zaradi nizkih cen elektrolizerjev, cenejših OVE in visokih cen zemeljskega plina. Zaradi visokega dviga cen zemeljskega plina je bil zeleni vodik v Evropi leta 2021 ugodnejši od sivega vodika. Če bo zeleni vodik v prihodnje želel doseči ugodnejšo raven kot ostali načini proizvodnje vodika, bo to predvsem odvisno od povpraševanja na trgu, predvsem na trgih, ki ne bodo ponujali dodatnih alternativnih tehnologij proizvodnje vodika. Zeleni vodik bo zaradi iniciativ ogljične nevtralnosti dosegel dvig povpraševanja po letu 2035. Povečalo se bo tudi čezmejno trgovanje zelenega vodika.

Leta 2050 naj bi bili dve tretjini zelenega vodika uporabljeni lokalno, s preostalo tretjino zelenega vodika pa naj bi se trgovalo čezmejno (IRENA, 2022).

2.3.2 Investicijski stroški in LCOE obnovljive električne energije

Na sliki 11 so prikazani investicijski stroški obnovljivih virov električne energije, in sicer sončne elektrarne, vetrne elektrarne na kopnem, vetrne elektrarne na morju, ki so pritrjene na dno morja, in zasidrane plavajoče vetrne elektrarne. Pri izračunu LCOH največji delež stroškov prinašajo stroški surovin (elektrika, toplota, zemeljski plin) in dobavni stroški vodika (transport, shranjevanje, distribucija). Pri zelenem vodiku je električna energija iz OVE ključna sestavina, zato so za obravnavo stroškov pomembni investicijski stroški obnovljivih virov električne energije. Najvišje investicijske stroške predstavljajo plavajoče vetrne elektrarne na morju. Plavajoče vetrne elektrarne na morju so novejša tehnologija, ki v prihodnjih letih obeta do skoraj 50 % zmanjšanje investicijskih stroškov. Po višini investicijskih stroškov sledita vetrna elektrarna na morju in vetrna elektrarna na kopnem. Podatki o investicijskih stroških obnovljivih virov električne energije se nahajajo v prilogi 3.

Slika 11: Investicijski stroški obnovljivih virov električne energije



Prerejeno po IRENA (2019), PNEC (2019) in Vartiainen, Masson, Breyer, Moser & Román Medina (2019).

Sončna elektrarna je v primerjavi z vetrno elektrarno še vedno ugodnejša. Je tudi najcenejši vir električne energije. Od leta 2006 do 2018 so se cene solarnih panelov in sistemov za sončno elektrarno zmanjšale za 80 do 90 %. Trg sončnih elektrarn se je od leta 2006 do 2018 povečal za 46 %. Tudi to je pripomoglo k zmanjšanju cen sončnih elektrarn. V letu 2017 je CAPEX sončne elektrarne znašal manj kot 0,80 ameriškega dolarja na eno enoto vršne moči

(angl. watt peak, v nadaljevanju Wp). Kasneje v letu 2019 je CAPEX sončne elektrarne znašal nekaj manj kot 50 centov ameriškega dolarja na eno enoto Wp. LCOE sončne elektrarne v Evropi je leta 2019 znašal med 24 evrov in 42 evrov na MWh. V primerjavi s povprečno ceno električne energije na trgu, ki je leta 2018 znašala med 47 evrov in 57 evrov na MWh, je cena sončne elektrarne cenejša od povprečne cene električne energije na evropskem trgu. Leta 2030 bo LCOE sončne elektrarne v Evropi znašal med 14 evrov in 24 evrov na MWh. V letu 2050 pa se bo LCOE sončne elektrarne znižal na ceno od 9 do 15 evrov na MWh. Sončna elektrarna bo tako postala najcenejša oblika proizvodnje električne energije (Vartiainen, Masson, Breyer, Moser & Román Medina, 2019; Vartiainen in drugi, 2021).

Na koncu leta 2018 je vetrni sektor na kopnem vseboval 542 GW obratujoče kapacitete vetrne energije. Vetrna energija se je tako s kumulativno stopnjo letne rasti (angl. compound annual growth rate) od leta 2000 povečala za več kot 21 %. Na globalni ravni so se skupni stroški vzpostavitve vetrnih elektrarn na kopnem zmanjšali za 22 %. Primerjava med letoma 2017 in 2018 je prinesla 6 % znižanje stroškov, predvsem zaradi rasti trgov na Kitajskem in v Indiji, za katera velja, da imata nizko stroškovno stopnjo izgradnje vetrnih elektrarn na kopnem. Skupni stroški izgradnje obratov naj bi v letu 2030 znašali od 800 do 1350 ameriških dolarjev na kW in v letu 2050 od 650 do 1000 ameriških dolarjev na kW. V letu 2018 so ti stroški znašali 1497 ameriških dolarjev na kW. Evropa je bila v letu 2010 dominantna na področju vetrnih elektrarn na kopnem s 47 % svetovnih obratujočih vetrnih elektrarn na kopnem. V letu 2018 je Kitajska prehitela Evropo in sedaj razpolaga s tretjino svetovnih obratujočih vetrnih elektrarn na kopnem. S tem je Kitajska postavila največji trg vetrne energije na kopnem. V Evropi naj bi bilo do leta 2050 potencialno 13.900 GW zmogljivosti vetrnih elektrarn na kopnem. Največji potencial imajo severne in centralne države v EU, poleg omenjenih držav tudi Združeno kraljestvo. Evropa je isto leto vložila največ sredstev v financiranje novih vetrnih elektrarn, in sicer 29,4 milijarde ameriških dolarjev. Od tega je EU v povprečju vložila 1,54 milijona ameriških dolarjev na MW v vetrne elektrarne na kopnem in 2,57 milijona ameriških dolarjev na MW v vetrne elektrarne na morju. Trenutno je izravnani strošek vetrne elektrarne na kopnem konkurenčen fosilnim gorivom. Celotni globalni povprečni LCOE vetrne elektrarne na kopnem je v letu 2018 znašal 0,056 ameriškega dolarja na kW. V letu 2030 naj bi ta znašal od 0,03 do 0,05 ameriškega dolarja na kW, v letu 2050 pa od 0,02 do 0,03 ameriškega dolarja na kW. Ta podatek nam pove, da se bo vetrna elektrarna na kopnem približala sončni elektrarni in bo tako eden izmed najcenejših virov električne energije (IRENA, 2019a).

Vetrne elektrarne na morju pripomorejo k nadomestku vetrnih elektrarn na kopnem, ki povsod zaradi goste poseljenosti ljudi niso mogoče. Poleg dodatne električne energije, ki jo doprinesejo vetrne elektrarne na morju, je izkoristek elektrarne zaradi vetra na morju, ki je močnejši in enakomernjši, boljši. Vetrne elektrarne na morju tako znatno pripomorejo k zmanjšanju izpustov CO₂. Vetrne elektrarne na kopnem so v zadnjih treh letih dosegle znaten porast, ki je bil omogočen zaradi hitrega razvoja, izboljšane dobavne verige, logistične

sinergije in zmanjšanja stroškov na evropskem trgu s pomočjo političnih in finančnih iniciativ. Pričakovana je rast zmogljivosti vetrnih elektrarn na morju. Namesto pičlih 23 GW zmogljivosti naj bi v letu 2030 vetrne elektrarne na morju dosegle zmogljivost do 228 GW in v letu 2050 zmogljivost do 1000 GW. Pričakovano je, da bodo v letu 2050 vetrne elektrarne na morju predstavljale 17 % celotne zmogljivosti vetrne energije, ki naj bi znašala 6044 GW. Od leta 2000 do leta 2018 so vetrne elektrarne na morju dosegle 38,5 % sestavljene stopnje letne rasti. V prihodnjih treh desetletjih se pričakuje 11,5 % sestavljene stopnje letne rasti (IRENA, 2019b). Trenutno se 90 % vetrnih elektrarn na morju nahaja v Severnem morju in Atlantskem oceanu. V letu 2018 je bilo dodanih 4,5 GW zmogljivosti novih vetrnih elektrarn na morju, od tega pripada 37 % Kitajski, 29 % Združenemu kraljestvu, 22 % Nemčiji in 12 % preostalim državam. V letu 2050 bo Azija tista celina, ki bo dominirala z več kot 600 GW zmogljivosti vetrnih elektrarn na morju. Globalno so se skupni stroški izgradnje obratov vetrnih elektrarn na morju po letu 2000 zaradi premika obratov v globlje vode povečali. V letu 2000 so ti stroški znašali 2500 ameriških dolarjev na kW. Kasneje, od leta 2011 do 2014, so se ti stroški zaradi zgoraj omenjene pozicije vetrnih elektrarn povišali na 5400 ameriških dolarjev na kW. V letu 2018 so ti stroški padli na 4350 ameriških dolarjev na kW. Iz slike 12 je razvidno, da bodo stroški sčasoma padali zaradi ekonomije obsega, manjših stroškov izgradnje (predvsem Kitajska) ter zaradi političnih in finančnih iniciativ. Tehnološki napredki, ki povečujejo dejavnike zmogljivosti vetrnih elektrarn ter zmanjšujejo stroške namestitve, obratovanja in vzdrževanja, prispevajo k zmanjšanju projektne tveganja. Globalni povprečni LCOE vetrne elektrarne na morju je v letu 2018 znašal 0,127 ameriškega dolarja na kWh, kar prinaša 20 % upad v primerjavi z letom 2010. V letu 2030 naj bi LCOE vetrne elektrarne na morju znašal od 0,05 do 0,09 ameriškega dolarja na kWh, v letu 2050 pa od 0,03 do 0,07 ameriškega dolarja na kWh. V prihodnosti bodo vetrne elektrarne na morju zaradi upada LCOE konkurenčne električni energiji, proizvedeni iz fosilnih goriv (IRENA, 2019b).

3 TRG VODIKA V EVROPSKI UNIJI

Zeleni in modri vodik, torej čisti in nizkoogljični vodik, prispevata k zmanjšanju emisij TGP tako, da postopoma nadomeščata nosilce energije na podlagi fosilnih goriv. Razvoj uporabe vodika bo odvisen od več dejavnikov. Najpomembnejši dejavniki so ustvarjanje in rast trga za čisti vodik, zniževanje stroškov proizvodnje čistega vodika in vzpostavitev vodikove infrastrukture za prenos in skladiščenje vodika. Stroški zelenega vodika so odvisni od višine investicij v elektrolizerje in stroškov električne energije OVE. V prihodnje se tudi pričakuje, da se bodo cene elektrolizerjev zmanjševale zaradi množične proizvodnje in ekonomije obsega (IRENA, 2020).

Piebalgs, Jones, Reis, Soroush in Glachant (2020) navajajo, da je za stroškovno učinkovito zasnovo energetskih inovacij ključno uravnoteženo ravnovesje med razvojem in raziskavami novih tehnologij. Pomemben dejavnik je tudi privlačnost trga, s katerim se zagotavlja

podpora ključnim infrastrukturnim projektom in vzpostavlja povpraševanje po proizvodnih subvencijah in javnih naročilih.

Zaradi omejene ponudbe zelenega vodika, ki je trenutno še v začetni fazi, ga je treba uporabljati tam, kjer ni nizkoogljičnih alternativ. Ponudba zelenega vodika je trenutno še v omejenih količinah z visokimi stroški, zato ima na trgu modri vodik prednostno funkcijo pri rasti vodikovega trga. Energetski analitiki opozarjajo na povečano proizvodnjo zelenega vodika, ki je trenutno v razvojni fazi in bi tako lahko znatno povečala operativne stroške s tem, da bi prisilila v obratovanje elektrolizerje v času visokih cen električne energije. Domača proizvodnja zelenega vodika v EU ne bo zadostovala za zadovoljitev naraščajočega povpraševanja. V začetni fazi bo potreben uvoz zelenega in modrega vodika, ki bo zapolnil primanjkljaj. To prinaša nova trgovska in tehnološka partnerstva med državami, ki so odvisne od fosilnih goriv, vendar imajo dovolj OVE (Erbach & Jensen, 2021).

V nadaljevanju predstavim trg vodika v EU. Osredotočim se na proizvodne zmogljivosti, povpraševanje, strategijo, infrastrukturo in uporabo vodika v EU.

3.1 Proizvodne zmogljivosti in povpraševanje po vodiku v Evropski uniji

V letu 2021 podatki kažejo, da vodik predstavlja okoli 2 % porabe energije v EU. Pretežno se vodik uporablja kot surovina v industrijskih procesih, predvsem pri rafiniranju nafte, proizvodnji amonijaka, metanola in goriva za vesoljska plovila (Erbach & Jensen, 2021).

Ob koncu leta 2019 je v državah članicah EU, državah članicah Evropskega združenja za prosto trgovino (v nadaljevanju EFTA) (Islandija, Lihtenštajn, Norveška in Švica) in v Združenem kraljestvu delovalo 536 obratov za proizvodnjo vodika s skupno proizvodno zmogljivostjo 12,1 milijona ton na leto. Če ne upoštevamo vodika, ki je proizveden kot stranski proizvod, se proizvodna zmogljivost zmanjša na 10,5 milijona ton letno proizvedenega vodika in na 504 delujoče obrate. Povprečna izkoriščenost proizvodnih zmogljivosti vodika je v letu 2019 znašala 80 %. V strategiji Evropske komisije (2020b) je zapisan cilj, da bo v letu 2030 proizvedena zmogljivost vodika iz OVE znašala 10 milijonov ton. Podobna količina proizvedenih zmogljivosti vodika iz OVE je do sedaj nastajala več desetletij. Takšna strategija nakazuje na napredek proizvodnje vodika v EU. Največjo količino proizvodnje vodika v EU, EFTA in Združenem kraljestvu dosegajo Nemčija, Nizozemska, Španija in Poljska. Naštete države prispevajo 50 % celotne proizvodne zmogljivosti vodika na evropskem območju (Hydrogen Europe, 2021; Hydrogen Europe, 2020).

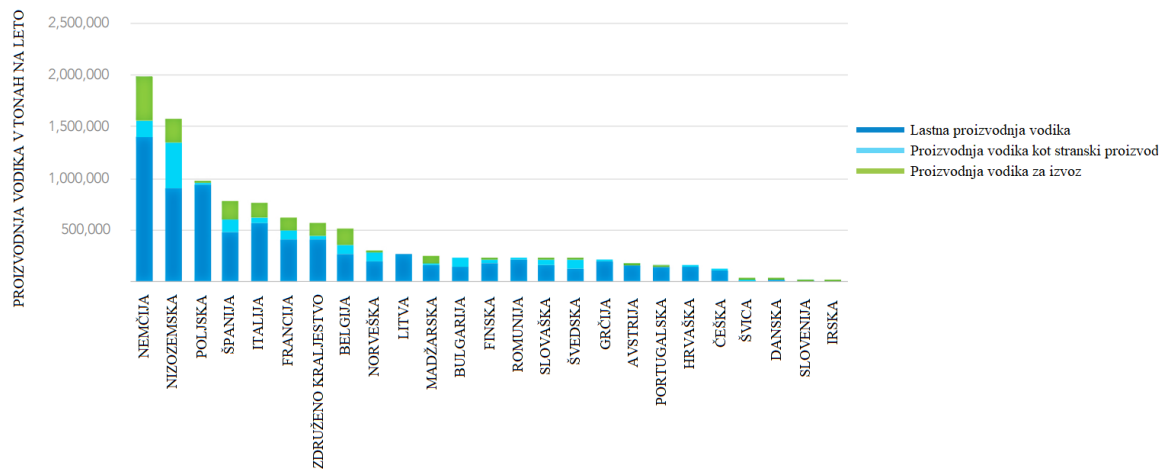
3.1.1 Proizvodne zmogljivosti vodika v EU, EFTA in Združenem kraljestvu

Različni scenariji prikazujejo, da bosta zeleni in modri vodik tista, ki bosta doprinesla k ogljični nevtralnosti Evrope (IRENA, 2022; Hydrogen Europe, 2021). Wang in drugi (2021)

soglašajo, da bo pričakovana proizvedena količina zelenega in modrega vodika v Evropi v prihodnje prinesla povečanje porabe zmogljivosti električne energije iz OVE. Elekترarne obnovljivih virov električne energije bi tako potrebovale pospešitev proizvodnje v prihajajočih letih. Opozarjajo tudi na nadaljnji razvoj konkurenčnega in integriranega trga vodika v Evropi, za katerega je treba boljše upoštevati količino nameščenih zmogljivosti vetrnih in sončnih elektrarn za zeleni vodik. Treba bo tudi upoštevati potencialne zmogljivosti proizvodnje modrega vodika z navedbo delov Evrope, kjer bi lahko namestili nove obrate za proizvodnjo modrega vodika.

Najpogostejša metoda proizvodnje vodika z največjim deležem v Nemčiji je lastna proizvodnja vodika na samem kraju (angl. on-site captive hydrogen production). Konec leta 2019 je bilo za lastno porabo proizvedenih 7,6 milijona ton vodika na leto (v 157 obratih), kar predstavlja dve tretjini celotne letne zmogljivosti proizvodnje vodika. Od tega gre 3,4 milijona ton vodika za amonijak in rafinerijo, 0,7 milijona ton je namenjenega metanolu in drugim kemikalijam. Ostala zmogljiva kapaciteta pripada obratom za namensko uporabo vodika. Druga največja proizvodnja vodika je proizvodnja vodika kot stranski produkt drugih procesov (angl. hydrogen production as a by-product). Celotna proizvodnja vodika kot stranski produkt predstavlja 1,5 milijona ton na leto, kar pomeni 14 % celotne proizvedene zmogljivosti vodika v Evropi. Največji delež vodika, ki je proizveden kot stranski produkt postopka rafiniranja, predstavlja 0,65 milijona ton na leto. Ta je proizveden v rafinerijah katalitske preobrazbe. Poleg že naštetih proizvodnje vodika proizvodnja vodika za izvoz predstavlja velik (14 %) delež zmogljivosti proizvodnje vodika. Za proizvodnjo vodika, ki se izključno uporablja za izvoz, je v Evropi leta 2019 obratovalo 106 obratov in s tem prispevalo 1,5 milijona ton zmogljivosti proizvodnje vodika. Obrate proizvodnje vodika, ki so namenjeni izvozu, delimo na dve podkategoriji: obrate, ki oskrbujejo velike odjemalce in ostalim malim odjemalcem nudijo le višek proizvodne zmogljivosti vodika, in obrate, ki oskrbujejo več manjših odjemalcev. Na evropskem trgu vodika za izvoz so vodilna štiri velika podjetja: Air Liquide, Air Products, Linde in Messer. Njihova proizvodnja vodika predstavlja 81 % zmogljivosti vseh obratov proizvodnje vodika za izvoz (Hydrogen Europe, 2021; FCH 2 JU, 2021a). Na sliki 12 je prikazana celotna proizvodna zmogljivost vodika v Evropi glede na države članice.

Slika 12: Celotna proizvodna zmogljivost vodika v članicah držav EU, EFTA in Združenem kraljestvu za leto 2019



Prirejeno po *Hydrogen Europe (2021)*.

Iz slike 12 je razvidno, da je med evropskimi državami vodilna Nemčija. Sledijo ji Nizozemska, Poljska, Španija, Italija, Francija in Združeno kraljestvo, ki proizvedejo nad 500 ton vodika na leto. V vseh državah članicah EU, EFTA in Združenem kraljestvu je vodilna lastna proizvodnja vodika. Nizozemska med vsemi državami v Evropi največji delež vodika proizvede kot stranski proizvod, sledita ji Nemčija in Španija. Nemčija je vodilna med državami pri proizvodnji vodika za izvoz, sledijo ji Nizozemska, Španija, Francija, Belgija in Združeno kraljestvo. Poljska ima zanemarljivo majhno proizvodnjo vodika za izvoz, vendar ima velik delež lastne proizvodnje vodika.

3.2 Strategija in politika vodika v Evropski uniji

Politika EU se predvsem na področju energetike, industrije, mobilnosti, varstva okolja in obdavčitve emisij CO₂ preoblikuje tako, da ekonomska politika odvrča vire in nosilce energije, ki povzročajo emisije CO₂. V tem poglavju bo predstavljen pregled politike, zakonodaje in strategije vodika v Evropi.

3.2.1 Okoljski zakonodajni akti

Uredba (EU) 2021/1119 Evropskega parlamenta in sveta z dne 30. junija 2021 o vzpostavitvi okvira za doseganje podnebne nevtralnosti in spremembi uredb (ES) št. 401/2009 in (EU) 2018/1999 (evropska podnebna pravila), Ur. l. EU, št. L 243/1, določa zavezujoč cilj ogljične nevtralnosti v EU do leta 2050. V njem je določen nov cilj za zmanjšanje neto emisij CO₂ za vsaj 55 % do leta 2030. Prejšnje ravni so znašale 40 %. Določa tudi, da mora biti prehod na ogljično nevtralnost nepovraten. Za doseganje določenih ciljev je vodik nepogrešljiv element. V uredbi (EU, št. L 243) se je zeleni vodik uvrstil med nosilce energije, ki bodo doprinesli k zavezujočim in nepovratnim ciljem ogljične nevtralnosti. Svet Evropske

komisije (2021) je 14. julija 2021 predstavil temeljno spremembo zakonodajnega pravnega reda EU z naslovom Sveženj »Pripravljeni na 55«. Sveženj ukrepov se nanaša na številne gospodarske vidike EU, kot so področja energetike, industrije in mobilnosti. V nadaljevanju predstavim ukrepe, ki se najbolj navezujejo na prihodnost vodika v EU.

Direktiva (EU) 2018/2001 Evropskega parlamenta in sveta z dne 11. decembra 2018 o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov (prenovitev), Ur. l. EU, št. L 328/82, zvišuje splošni cilj za obnovljive vire energije v EU z 32 % na 40 %. Direktiva (EU) 2001/2018 vsebuje nekaj ključnih vidikov, ki so pomembni za vodik:

- minimalni zavezujoči cilj za uporabo obnovljivega vodika v industriji: 50 % porabe vodika je treba doseči z obnovljivimi gorivi nebiološkega izvora;
- minimalni zavezujoči cilj za uporabo obnovljivih virov nebiološkega izvora, ki je uporabljen v prometnem sektorju (vključno z obnovljivim vodikom): vsaj 2,6 % skupne porabe energije v prometnem sektorju;
- uvedbe posebnih določb za vključevanje OVE v sektorju ogrevanja in hlajenja določajo, da bo za vse države članice EU postalo zavezujoče izhodišče, s katerim bodo morale povečati uporabo energije iz OVE pri ogrevanju in hlajenju za okvirno 1,3 odstotne točke na povprečni letni ravni. Takšno povečanje bo mogoče doseči na več načinov, uporaba obnovljivega vodika za ogrevanje pa je lahko eden izmed načinov.

Če bodo te direktive o spodbujanju uporabe OVE in direktive o energijski učinkovitosti učinkovite, lahko letno pričakujemo rast povpraševanja po zmogljivosti zelenega vodika za 4,9 milijona ton.

EU za OVE z Direktivo RED vključuje sektorje v okviru trgovanja z emisijami (v nadaljevanju ETS). Višji davki na CO₂ bodo prispevali k vzpostavitvi učinkovitejšega trga, ki bo sprožil prehod na »čiste« emisije v številnih sektorjih (proizvodnja amonijaka, jekla, cementa itd.). Ta spodbuda bo povečala tudi uporabo zelenega vodika v sektorjih, ki jih zajema ETS. Cilj mehanizma za ogljično prilagoditev na mejah je, da se vzpostavi politika oblikovanja cen ogljika, ki bo pri uvozu iz sektorjev (jeklo, aluminij, cement, gnojila itd.) zmanjšala tveganje selitve virov CO₂ (Hydrogen Europe, 2021; Enerdata, 2014).

Revizija trenutne Direktive sveta 2003/96/ES z dne 27. oktobra 2003 o prestrukturiranju okvira Skupnosti za obdavčitev energentov in električne energije, Ur. l. EU, št. 405, je spodbudila prehod na OVE. Revizija ima cilj, da se obdavči vrsto energenta in ne količine. Energenti so pri določeni najnižji trošarinski stopnji, ki jih določijo države članic EU, uvrščeni v različne davčne kategorije. Davčne kategorije so razvrščene glede na okoljsko ustreznost. Ta sprememba odraža boljši okoljski vpliv posameznih goriv in doprinese k lažji izbiri goriv, za katera se podjetja odločijo. Revizija prinaša lažje razvrščanje energentov za namene obdavčitve, ki zagotavljajo večje obdavčitve za goriva, ki največ škodujejo okolju. Predlog revizije predvideva preferenčno davčno stopnjo za obnovljive in nizkoogljične vodikove vire za prihodnjo dobo desetih let. Za konvencionalna fosilna goriva (kurilno olje,

bencin, netrajnostna biogoriva), ki se uporabljajo kot pogonsko gorivo, velja najvišja minimalna stopnja 10,75 evra na gigajoule (v nadaljevanju GJ) in 0,9 evra na GJ za ogrevanje. Za zemeljski plin, utekočinjen naftni plin in neobnovljiva goriva iz nebiološkega izvora, ki se uporabljajo kot pogonsko gorivo, velja najvišja minimalna stopnja 7,17 evra na GJ in 0,6 evra na GJ za ogrevanje (stopnja velja pred obdavčitvijo po enaki stopnji kot za konvencionalna fosilna goriva). Najnižja stopnja obdavčitve pripada električni energiji, in sicer je najvišja minimalna stopnja 0,15 evra na GJ (ne glede na njeno uporabo in prvoten vir). Napredna trajnostna biogoriva in bioplina so prav tako obdavčeni po najnižji stopnji obdavčitve energije, med njimi je tudi obnovljivi oziroma zeleni vodik (Hydrogen Europe, 2021; Enerdata, 2014).

3.2.2 Strateški in politični vidiki vodika v Evropski uniji

EU v večini za proizvodnjo električne energije uporablja fosilna goriva, v največji meri zemeljski plin in premog. Zaradi uporabe fosilnih goriv se v ozračje izpusti od 70 do 100 milijonov ton CO₂ na leto. Vodik še vedno predstavlja majhen delež (%) pri proizvodnji energije v primerjavi s fosilnimi gorivi (Evropska komisija, 2020b; Enerdata, 2014). V nadaljevanju tega poglavja predstavim strategijo in politiko EU za vodik v prihajajočih letih.

Direktiva (EU) 2018/2001 Evropskega parlamenta in sveta z dne 11. decembra 2018 o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov (prenovitev), Ur. l. EU, št. L 328/2018, določa pravno zavezujočo opredelitev za spodbujanje OVE. Določa zavezujoč cilj EU za celoten delež OVE v bruto končni porabi energije v EU do leta 2030. Direktiva zajema pravila o finančni podpori za električno energijo, ki se pridobi iz OVE, njeno samooskrbo ter uporabo obnovljive energije v sektorju ogrevanja in hlajenja ter v transportnem sektorju. Cilj EU je, da države članice skupaj zagotovijo, da delež OVE v bruto končni porabi energije EU leta 2030 znaša najmanj 32 %. V tem cilju je upoštevan tudi vodik, pridobljen iz OVE.

Direktiva 2014/94/EU Evropskega parlamenta in sveta z dne 22. oktobra 2014 o vzpostavitvi infrastrukture za alternativna goriva, Ur. l. EU, št. L 307/2014, določa skupen okvir ukrepov za vzpostavitev minimalnih zahtev za izgradnjo infrastrukture za alternativna goriva, vključno s polnilnimi mesti za električna vozila ter oskrbovalnimi mesti za zemeljski plin v EU. Pri alternativnih gorivih je upoštevan tudi vodik. Med drugim določa tudi cilje za zmanjševanje odvisnosti od nafte in ublažitev negativnega vpliva na promet in okolje.

Direktiva Evropskega parlamenta in sveta 98/70/ES z dne 13. oktobra 1998 o kakovosti motornega bencina in dizelskega goriva ter spremembi Direktive 93/12/EGS, Ur. l. EU, št. L 350/1993, posredno spodbuja uporabo vodika, kajti zahteva, da dobavitelji goriv do 31. decembra 2020 zmanjšajo izpuste toplogrednih plinov za 6 % na enoto energije v celotnem življenjskem ciklu. Direktivo (98/70/ES) dopolnjuje Direktiva sveta (EU) 2015/652 z dne 20. aprila 2015 o določitvi metod izračuna in zahtev glede poročanja na podlagi Direktive 98/70/ES Evropskega parlamenta in sveta o kakovosti motornega bencina in dizelskega goriva, Ur. l. EU, št. L 107/2015, ki določa metode izračuna in zahteve glede poročanja na

podlagi direktive (98/70/ES). Določa faktor učinkovitosti električnega pogonskega sklopa na vodikove gorivne celice na 40 % in določa intenzivnost toplogrednih plinov zelenega in modrega vodika.

Cilj strategije za vodik za podnebno nevtrarno Evropo (Evropska komisija, 2020a; Evropska komisija, 2020b) je pospešiti razvoj zelenega vodika in mu zagotoviti temeljno vlogo pri ogljični nevtralnosti do leta 2050. Za doseg tega cilja strategija EU predvideva postopno vpeljavo, ki bo v začetku vključevala projekte modrega vodika. Strategija temelji na treh strateško časovnih fazah od leta 2020 do leta 2050, ki jih bomo v nadaljevanju tega poglavja predstavili. Strategija opozarja na obstoječe stanje in ugotavlja, da ima zeleni vodik danes majhno vlogo v celotni oskrbi z energijo. Problematika se pojavi v stroškovni učinkovitosti, obsegu proizvodnje, infrastrukturi in varnosti. Evropska komisija meni, da je sodelovanje med celotno dobavno verigo ter javnim in zasebnim sektorjem bistvenega pomena za zagotovitev regulativnega okvira, ter opozarja na naložbe v raziskave in uvajanje vodika, ki so potrebne za razširitev vodika. Vzpostavitev evropskega zaveznitva za čisti vodik bo združevala industrijo, javne organe in civilno družbo. Strategija vodika za podnebno nevtrarno Evropo usklajuje naložbe za povečanje obsega proizvodnje in povpraševanje po čistem vodiku ter jasno zagotavlja ustrezne prednosti in dostop do financiranja projektov zelenega vodika ter potreb po skladnosti med evropskimi skladi in financiranje Evropske investicijske banke. Pričakuje se, da bo evropsko zaveznitvo za čisti vodik pripravilo ustrezen naložbeni načrt in da bo zagotovilo ustrezno usklajevanje politik. Glede politike strategija poudarja, da je treba zagotoviti gotovost pri usmeritvi politike in jasnost potrebnih naložb. V strategiji so opredeljene tri strateške faze, ki določajo postopen pristop.

Začetna faza, ki predstavlja strategijo do leta 2024, poudarja povečanje proizvodnje elektrolizerjev z zmogljivostjo najmanj 6 GW in proizvodnje najmanj enega milijona ton obnovljivega vodika za razogljičenje sedanje proizvodnje vodika (kemična panoga) in lažjo uporabo vodika v končni rabi. Postavitve elektrolizerjev poleg tistih v že postavljenih rafinerijah, jeklnah in kemičnih obratih bodo v prihodnje zmanjševale stroške dobave. Ključni ukrepi politike so načrtovanje velikih vetrnih in sončnih elektrarn (na gigavatni ravni) ter prometne infrastrukture in določitev regulativnih okvirov za zagotovitev trajnostnega in likvidnega trga vodika s pomočjo premoščanja stroškovnih vrzeli med konvencionalnimi rešitvami in nizkoogljičnim vodikom. Druga faza, ki predstavlja strategijo od leta 2025 do 2030, določa, da bo vodik postal nepogrešljiv del energetike. Strategija do leta 2030 poudarja namestitve elektrolizerjev z zmogljivostjo 40 GW in proizvodnjo obnovljivega vodika do deset milijonov ton. Zeleni vodik bo postajal čedalje bolj stroškovno učinkovit v primerjavi z modrim vodikom. Zeleni vodik bo tako sčasoma prevzel funkcijo pri usklajevanju elektroenergetskega sistema, katerega primaren vir so OVE. Vodik se bo v prihodnjih letih uporabljal za dnevno ali letoletno shranjevanje kot rezerva in za zagotavljanje izravnave, ki omogoča dostopnost energije v različnih regijah z infrastrukturo za shranjevanje in prenos vodika. S tem se bo v prihodnje izboljšala zanesljivost oskrbe. V drugi strateški fazi se bodo v EU razvile t. i. »vodikove doline«, ki bodo odvisne od lokalne

proizvodnje vodika na podlagi decentralizirane proizvodnje obnovljive energije in lokalnega povpraševanja ter vodika s prenosom na kratke razdalje. Takšen primer lokacije vodika bo v prihodnje poleg že znane uporabe vodika (industrija, promet) primeren tudi za stavbno oskrbo s toploto. Povečanje infrastrukture v prometnem (logističnem) sektorju bo ključnega pomena zaradi velikega potenciala obnovljive energije v drugih državah članicah (prenos vodika med državami članicami). Več o infrastrukturi vodika bo podano v naslednjem poglavju. Politika bo stremela k odprtemu in konkurenčnemu trgu vodika v EU z neoviranim čezmejnimi trgovanjem in učinkovitim razdeljevanjem razpoložljivih količin vodika med sektorji. Tretja strateška faza, ki bo potekala od leta 2030 in 2050, prinaša dobo, kjer zeleni vodik oskrbuje sektorje, v katerih je težko priti do razogljichenja. Poudarek bo na električni energiji iz obnovljivih virov. Zaradi povečane uporabe zelenega vodika se bo morala zmogljivost električne energije iz OVE povečati. Četrtna električne energije iz obnovljivih virov bo namenjena zelenemu vodik (Evropska komisija, 2020b).

Svet Evropske unije (2020) je sprejel tudi sklep »Pot do trga vodika za Evropo«, s katerim je Evropsko komisijo pozval, naj še naprej razvija in izvaja strategijo vodika v EU. V sklepih poudarja obnovljivi vodik za razogljichenje, obnovo in konkurenčnost. Evropsko komisijo poziva, da se razvija potencial v EU za proizvodnjo vodika iz stroškovno učinkovitih obnovljivih virov električne energije in da se začrtajo cilji časovnega načrta, s katerimi bi do leta 2024 postavili elektrolizerje za zeleni vodik z močjo najmanj 6 GW in do leta 2030 z močjo najmanj 40 GW. Prednost ima elektrifikacija iz OVE. V sklepu navaja priložnost za izboljšanje energetske varnosti EU z zmanjšanjem odvisnosti od uvoza in diverzifikacijo uvoznih možnosti. Na koncu sklepa Svet Evropske unije (2020) poziva k pobudi 2 x 40 GW industrijskega združenja s »Hydrogen Europe«, ki namerava v EU namestiti 40 GW zmogljivosti zelenega vodika in poleg omenjenega še 40 GW zmogljivosti v Ukrajini in Severni Afriki.

3.3 Infrastruktura vodika v Evropski uniji

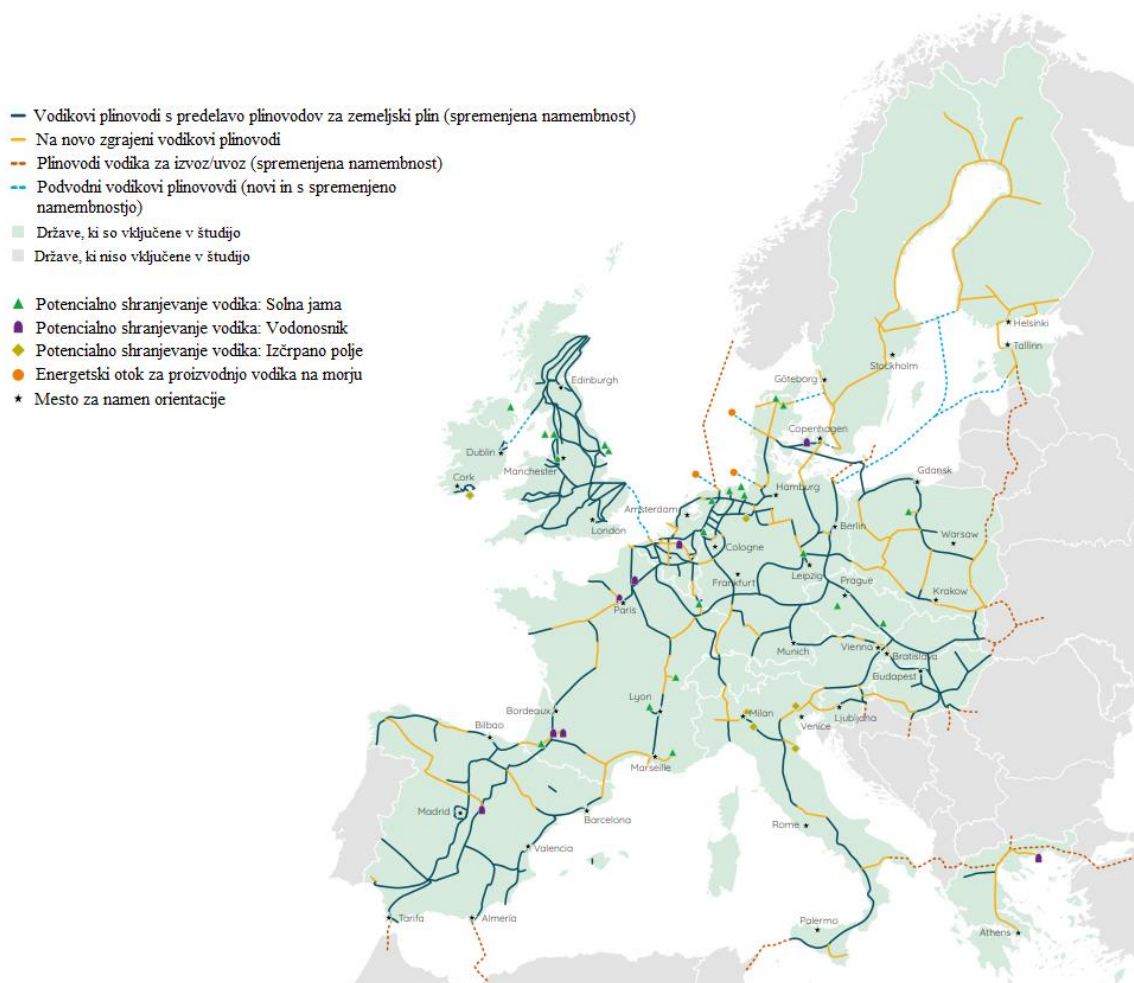
V Evropi je treba razviti osnovno infrastrukturo za prenos vodika od proizvodnje do končne porabe. Trenutno se trguje in distribuira s tisočimi tonami vodika v Evropi, vendar bo v prihodnje zaradi povečane proizvodnje in porabe vodika treba ustvariti vodikovo cevovodno omrežje, ki bo zmožno prenašati velike količine vodika pri nizkih stroških. Tako kot pri distribuciji zemeljskega plina bo vodik potreboval podobno infrastrukturo. Poleg distribucije vodika s tovornjaki in ladjami je potreben prenos prek cevovodov. Vmesni korak distribucije vodika po cevovodih poteka prek plinovodov, vendar bo v prihodnje potrebna svojevrstna infrastruktura, ki bo prenašala samo vodik. V tem podpoglavju bomo opisali tri največje iniciative na ravni EU, ki bodo v prihodnje temelj infrastrukture v EU (Hydrogen Europe, 2021; Caglayan, Heinrichs, Robinius & Stolten, 2021).

T. i. iniciativa »Evropska vodikovodna hrbtenica« (angl. European hydrogen backbone, v nadaljevanju EHB) je s 23 operaterji plinske strukture objavila študijo z namenom ocene

povpraševanja, ponudbe in učinkovitosti distribucijskih poti za transport vodika. Trenutno je to najobsežnejša pobuda na področju infrastrukture vodika. Študija zajema 19 članic držav EU, Združeno kraljestvo in Švico. Študija predvideva uporabo zelenega in modrega vodika. EHB v svoji študiji predvideva, da bo do leta 2030 zgrajeno 11.600 kilometrov dolgo omrežje cevovodov za prenos vodika. Sprva bo to omrežje cevovodov za prenos vodika povezovalo že omenjene »vodikove doline«, do leta 2040 pa naj bi razvoj doprinesel vseevropsko omrežje z 39.700 kilometri, pri čemer bo 69 % omrežja predstavljalo že obstoječe omrežje in 31 % novih cevovodov za prenos vodika (Jens, Wang, Van der Leun, Peters & Buseman, 2021). Na sliki 13 je slikovni prikaz EHB. Večina začetne infrastrukture bo razvite v industrijskih »grozdih«, pristaniščih in mestih na severu Evrope, in sicer v Belgiji, na Nizozemskem in na severozahodu Nemčije. Do leta 2030 se načrtujejo tudi druge namembnosti, predvsem v Franciji (Dunkerque, dolina reke Sene od Le Havra do Pariza, Lyon, Lacq, Marseille), Španiji (dežele Baskija, Asturija, Kastilja in Leon, Aragonija in povezava med Barcelono in Valencio), v Italiji od Sicilije do Milana (vnovič uporabljena infrastruktura), na Danskem, Finskem in Švedskem pa predvsem z novo infrastrukturo. Po letu 2030 bo vodikovo omrežje cevovodov zajemalo tudi nacionalno raven s prenosom vodika med državami članicami. Omrežje se bo povežalo s severozahodno Evropo, Skandinavijo ter francoskim in nemškim omrežjem. Povezale se bodo države med Francijo, Španijo in Italijo prek Slovenije z Avstrijo, Madžarsko in Slovaško.

Do leta 2040 bo EHB zajemala vseevropsko infrastrukturo za prenos vodika po cevovodih. Raztezala se bo od Sicilije do severne Švedske in od Galicije do vzhodne Finske. Omrežje EHB bo sprejemalo tudi dotok vodika iz Turčije na jugovzhodu, Ukrajine na vzhodu, Norveške na severu in Maroka, Alžirije ter Tunizije na jugu. Podjetja, ki poslujejo s plinsko infrastrukturo, ocenjujejo, da bodo investicije za širitev omrežja EHB do leta 2040 znašale od 43 do 81 milijard evrov. Večina, in sicer od 63 do 77 % investicijskih sredstev bo namenjenih cevovodom za prenos vodika, ostalih 37 do 23 % pa bo namenjenih za kompresijsko opremo pri prenosu vodika po cevovodih. Izravnane stroške prenosa vodika so ocenili na 0,11 do 0,21 evra na kilogram vodika pri razdalji 1000 kilometrov. Ocenjeni stroški CAPEX za spremembo namembnosti cevovodov za vodik znašajo 0,4 milijona evrov na kilometer pri cevovodih s premerom od 71,12 centimetra do 93,98 centimetra, kar prinaša 18 % stroškov novega cevovoda, ki znaša 2,2 milijona evrov na kilometer. Iz tega lahko sklepamo, da je sprememba namembnosti cevovoda za vodik stroškovno učinkovitejša kot izgradnja novega. Inicijativa EHB neposredno vpliva na uresničitev ogljične nevtralnosti evropske industrije. Omrežje bo povezovalo sektorje v Severnem in Baltskem morju, ki bodo predvidoma imeli težave pri porabi velikih količin obnovljivih virov električne energije (Jens, Wang, Van der Leun, Peters & Buseman, 2021).

Slika 13: Zemljevid EHB



Prيرهjeno po Jens, Wang, Van der Leun, Peters & Buseman (2021).

Nizozemska je med prvimi državami v Evropi pri razvoju vodikovega sektorja. V poročilu HyWay 27 (2021) so potrdili pomen vodika za ogljično nevtralno gospodarstvo in vpliv razvoja nacionalnega prenosa vodika, ki bi na Nizozemskem pridobil pomemben vidik energetskega sistema. Ocenjujejo, da bo vodik v kratkem času pomemben za industrijo, dolgoročno pa bo pridobil širši pomen, in sicer na področju mobilnosti, stavb in v elektroenergetskem sektorju. V poročilu navajajo, da se tudi nizozemsko obstoječe omrežje, ki je namenjeno prenosu zemeljskega plina, uporabi za prenos vodika, ocenjujejo regulativne zahteve trga vodika in pripravljajo načrt za zagon dobavne verige. To poročilo je bilo namenjeno ministrstvu za gospodarstvo in podnebno politiko na Nizozemskem, ki je kasneje rezultate poročila sprejelo in se odločilo za spremembo namembnosti obstoječega omrežja za prenos zemeljskega plina. Ministrstvo za gospodarstvo in podnebno politiko je pozvalo družbo Gasunie, da prične z razvojem nacionalnega omrežja za prenos vodika. V začetku bo, kot v ostalih državah Evrope, na vrsti sprememba namembnosti omrežja za prenos zemeljskega plina, nato pa je namen planskega načrta, da se do leta 2030 na Nizozemskem doseže 1400 kilometrov novega cevovoda za prenos vodika. V letih od 2024 do 2026 bo poudarek na razvoju omrežja v industrijskih »grozdih«, ki bodo letno porabili do 1,3 milijona

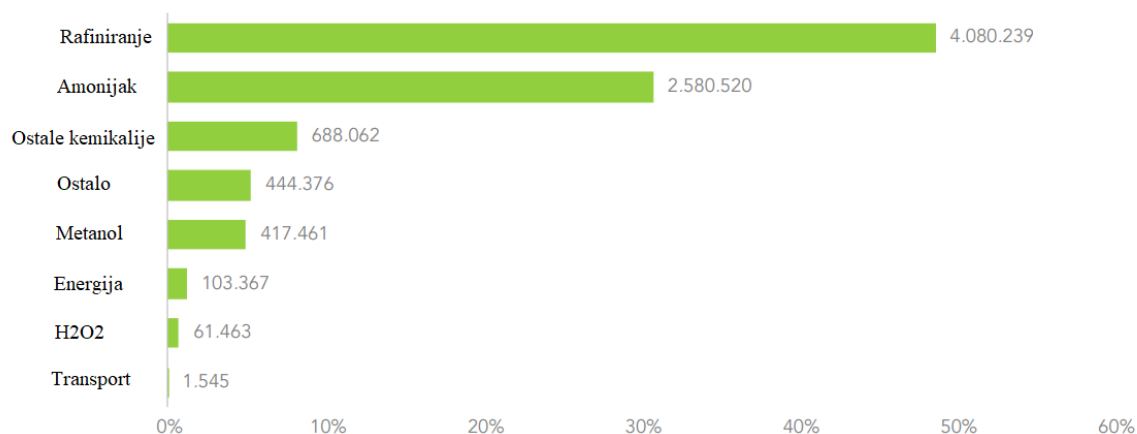
ton vodika. Kasneje v letih od 2026 do 2028 sledi povezava med industrijskimi »grozdi« med Zeelandom, Rotterdamom, Amsterdamom in Limburgom. Povezava nizozemskega omrežja za prenos vodika iz EHB sledi v letih od 2028 do 2030.

Nemčija je prvotni načrt za vodikovo infrastrukturo predstavila v FNB Gas (2021c), kjer je pojasnila varen, trajnosten in stroškovno učinkovit načrt za oskrbo s plinom v prihodnosti. V času od leta 2020 do 2030 Nemčija predvideva vzpostavitev omrežja za prenos vodika z dolžino 5900 kilometrov, ki bo povezovalo proizvodnjo in končno uporabo vodika v državi. Celotna razdalja cevovodov za prenos vodika v letu 2050 naj bi znašala 13.300 kilometrov, od katerih bo 11.000 kilometrov cevovodov spremenjene namembnosti. Nemčija bi za novo infrastrukturo do leta 2050 namenila dobrih 18 milijard evrov (FNB Gas, 2021a; FNB Gas, 2021b).

3.4 Uporaba vodika v Evropski uniji

V tem podpoglavju se bom osredotočil na uporabo vodika v industrijskem sektorju (proizvodnja amonijaka, težkih kemikalij, železa, jekla in v rafinerijah), transportnem sektorju (gorivo), energijskem sektorju in stavbnem sektorju (stavbno ogrevanje). Na sliki 14 prikazujem porabo vodika po sektorjih v EU. Največji delež porabe vodika v EU predstavlja rafiniranje, najmanjši pa transport.

Slika 14: Poraba vodika v Mt po sektorjih v EU



Prirejeno po Hydrogen Europe (2021).

3.4.1 Uporaba vodika v industrijskem sektorju

Industrijski procesi so energetske zelo intenzivni. V EU industrijski sektor predstavlja 20 % emisij CO₂, pri čemer je v letu 2017 industrijski sektor izpustil 877 milijonov ton CO₂. Največji izpust CO₂ predstavljajo kemični in petrokemični izdelki, železo, jeklo in

nekovinske surovine, kot je na primer cement. Večina emisij izvira iz izgorevanja nafte, zemeljskega plina in trdih goriv za pridobivanje toplote (parni procesi) (Wang in drugi, 2021). Emisije CO₂ nastanejo pri proizvodnji izdelka zaradi kemičnih oziroma fizikalnih procesov. Wang in drugi (2021) v svoji študiji napovedujejo, da se bo povpraševanje po modrem in zelenem vodiku v sektorjih, kjer se vodik uporablja kot surovina (sektorji pridelave železa, jekla, goriva in kemikalij), v letu 2030 povečalo na 293 teravatnih ur (v nadaljevanju TWh), v letu 2040 na 836 TWh in do leta 2050 na 1200 TWh. V sektorjih visokotemperaturne industrije, kjer bi vodik lahko nadomestil sedanjo uporabo zemeljskega plina, pričakujejo rast povpraševanja v letu 2030 na 56 TWh, v letu 2040 na 165 TWh in do leta 2050 na 217 TWh.

3.4.1.1 Uporaba vodika v rafinerijskem sektorju

Rafinerijski sektor je največji sektor porabe vodika v EU in znaša 49 % skupne porabe vodika. Vodik se v rafinerijah uporablja za hidrotretiranje in hidrokreking. Hidrotretiranje se uporablja pri procesu rafiniranja dizelskega goriva in se nanaša na več procesov, kot so hidrogeniranje, hidrodenuitrifikacija, hidrodemetalizacija in hidrosulfurizacija. Hidrokreking pa vključuje pretvorbo dolgih in nenasičenih produktov v izdelke z manjšo molekulsko maso. Trenutno je v EU in Združenem kraljestvu 85 rafinerij, ki skupaj proizvedejo 14,5 milijona sodov nafte na dan. V prihodnje biološka, sintetična in reciklirana goriva ne bodo dosegla sedanjih rafinerijskih zmoglosti. Sčasoma se bo povpraševanje po vodiku v rafinerijah zmanjšalo na nič zaradi opuščanja uporabe fosilnih goriv. Trenutna poraba sivega vodika v rafinerijah je 138 TWh na leto. V letu 2030 naj bi bilo povpraševanje po vodiku 35 % oziroma 40 TWh modrega in zelenega vodika in v letih 2040 naj bi prišli na 100 % uporabo modrega in zelenega vodika v rafinerijskem sektorju. Za leto 2050 velja napoved, da se bo uporaba fosilnih goriv izničila. Poraba vodika za rafinerije je za leto 2030 ocenjena na 175 TWh na leto, v letu 2040 na 495 TWh na leto, v letih 2050 pa naj bi povpraševanje po vodiku naraslo na 691 TWh na leto. V to je všteto, da se bodo fosilna goriva nadgradila na biokerozin, sintetični kerozin in goriva iz različnih kemikalij (Jens, Gräf & Schimmel 2021; Wang in drugi 2021).

3.4.1.2 Uporaba vodika v sektorju proizvodnje jekla

Sektor proizvodnje jekla je trenutno v Evropi največji povzročitelj izpustov CO₂ in predstavlja 22 % vseh industrijskih emisij CO₂ ter 4 % skupnih emisij CO₂ v Evropi. V Evropi je 59 % primarne proizvodnje jekla in 41 % sekundarne. Primarna proizvodnja jekla predstavlja integrirano proizvodnjo jekla s plavžno pečjo ali osnovno kisikovo pečjo (angl. blast furnace or basic oxygen furnace), pri kateri se uporablja železo, koks in premog. Sekundarna proizvodnja jekla je sestavljena iz elektroobločne peči, ki uporablja reciklirano jeklo kot surovino in elektriko kot glavni vir energije (potrebuje tudi zemeljski plin ali premog za vsebnost ogljika). V EU in Združenem kraljestvu je 30 podjetij s primarno proizvodnjo jekla od leta 2010 do 2018 povprečno proizvedlo 100 milijonov ton jekla na

leto. Sekundarne proizvodne zmogljivosti 130 podjetij pa so od leta 2010 do 2018 povprečno znašale 70 milijonov ton jekla na leto. Novi postopek proizvodnje jekla, ki temelji na vodiku, bo v prihodnje zmanjšal več kot 95 % emisij CO₂. Neposredna redukcija železove rude (angl. direct reduction of iron ore) uporablja vodik kot redukcijsko sredstvo za železovo rudo, pri čemer nastane neposredno reducirano železo, ki se lahko spremeni v vroče briketirano železo (angl. hot briquetted iron). Ta postopek nadomešča primarno proizvodnjo jekla. Postopek redukcije železove rude potrebuje 56,3 kilograma vodika na tono surovega jekla. Če predpostavljamo, da povprečna primarna jeklarna proizvede 3,75 milijona ton jekla na leto, povpraševanje po vodiku predstavlja 7,05 TWh na leto. Če želimo zmanjšati emisije CO₂ v sekundarni proizvodnji jekla, to lahko storimo z zamenjavo električne energije z obnovljivo električno energijo. Zemeljski plin lahko nadomestimo z biometanom ali sintetičnim metanom, ki pa posledično poveča potrebe po vodiku (Jens, Gräf & Schimmel 2021; Wang in drugi 2021).

3.4.1.3 Uporaba vodika v sektorju proizvodnje amonijaka

Amonijak je poglavitna kemikalija pri izdelavi gnojil in tudi kot gradnik drugih kemikalij za gnojenje (amonijev nitrat). Okoli 90 % svetovne proizvodnje amonijaka je namenjene za proizvodnjo gnojil. Proizvodnja amonijaka je drugi največji porabnik vodika v EU. Proizvodnja amonijaka v Evropi znaša 19.132 tisoč ton na leto (v nadaljevanju kt na leto), od tega je največ amonijaka proizvedenega v Nemčiji, in sicer 3130 kt na leto, na Poljskem 2250 kt na leto in na Nizozemskem 2140 kt na leto. Trenutna proizvodnja amonijaka v ozračje spusti 1,83 tone emisij CO₂ na tono proizvedenega amonijaka, kar predstavlja 1,3 % celotnih emisij CO₂ v EU. Za zmanjšanje izpustov emisij CO₂ je treba trenutno proizvodnjo vodika (za proizvodnjo amonijaka), ki se proizvede prek metode SMR, dopolniti z metodo CCS, nadomestiti z elektrolizo ali nadomestiti z biometanom. Metoda CCS pri proizvodnji vodika bi pri proizvodnji amonijaka zmanjšala izpuste CO₂ za 95 %. Elektroliza (zeleni vodik) bi bila alternativa, ki bi zamenjala metodo SMR. Za proizvodnjo ene tone amonijaka bi elektroliza vode potrebovala 10,8 MWh električne energije. Brez spremembe v procesu pa bi biometan zamenjal metodo SMR, ki bi ji doprinesla ogljično nevtralnost. Proizvodnja amonijaka v EU je v letu 2019 znašala 19.132 kt na leto. Pri tej proizvodnji amonijaka se porabi 113 TWh vodika na leto. V prihodnjih letih bo sivi vodik nadomestil modri vodik v začetni fazi in zeleni vodik v kasnejši in trajnostni fazi. Povpraševanje po modrem in zelenem vodiku za proizvodnjo amonijaka je za leto 2030 ocenjeno na 7 TWh na leto, za leto 2040 je ocenjeno na 53 TWh na leto in do leta 2050 naj bi povpraševanje po modrem in zelenem vodiku za proizvodnjo amonijaka znašalo 113 TWh na leto (Jens, Gräf & Schimmel 2021; Wang in drugi 2021).

3.4.1.4 Uporaba vodika v kemičnem sektorju

Kemikalije, proizvedene v parnih krekingih, kjer se ogljikovodiki z dolgimi verigami razbijejo v ogljikovodike s kratkimi verigami, so znane kot etilen, propilen butadien in

benzen. Ogljikovodiki z daljšimi verigami so nafta, kurilno olje in plini, kot so etan, butan in propan. Etilen in propilen sta izdelka, s katerima se pogosto trguje in se uporabljata za proizvodnjo plastike ter za številne druge izdelke. V EU in Združenem kraljestvu je trenutno 55 kemijskih obratov s povprečno zmogljivostjo 0,5 milijona ton na leto na obrat. Največji kemijski obrat za proizvodnjo etilena se nahaja v Antwerpu s proizvodno zmogljivostjo 1,25 milijona ton etilena na leto. Samo ta regija prinaša 23 % celotne kapacitete etilena v EU. Nemčija, Nizozemska in Belgija so največji proizvajalci etilena, in sicer proizvedejo 42 % celotne proizvodnje etilena v EU. Proizvodnja takšnih kemikalij v EU prinaša 18 % celotnih emisij CO₂. Za zmanjšanje izpustov CO₂ v kemičnem sektorju bi bilo treba spremeniti surovine (uporaba biosintetične nafte ali kemično reciklirane surovine, kot je pirolizno olje) ali pa kemijski obrat krekinga dopolniti z električno energijo, ki pa je trenutno še v razvoju. Povpraševanje po vodiku za proizvodnjo takšnih kemikalij naj bi v letu 2030 znašalo 67 TWh na leto, za leto 2040 je povpraševanje po vodiku ocenjeno na 163 TWh na leto in do leta 2050 naj bi se povpraševanje po vodiku za proizvodnjo kemikalij, kot sta etilen in propilen, povečalo na 291 TWh na leto (Jens, Gräf & Schimmel 2021; Wang in drugi 2021).

3.4.2 Uporaba vodika v transportnem sektorju

Transportni sektor je v EU drugi največji onesnaževalec okolja in predstavlja 25 % vseh emisij CO₂. Ostali sektorji so v času od leta 1990 zmanjšali odstotek izpusta emisij CO₂, transportni sektor pa je izpuste emisij CO₂ povečal za 33 %. V transportnem sektorju je zmanjševanje emisij CO₂ možno prek uporabe nizkoogljčnih goriv in tehnoloških inovacij. Pri razogljičenju transportnega sektorja moramo biti pozorni na dva različna načina polnjenja. Pri lahkih vozilih na kratke razdalje je zmanjšanje emisij CO₂ lažje in to lahko dosežemo z elektrifikacijo. Težje razogljičenje je pri prevoznih sredstvih, ki prevažajo težke tovore in se uporabljajo za daljše razdalje. Tam je razogljičenje zahtevnejše. Vodik bo imel vodilno vlogo pri razogljičenju transportnega sektorja, kjer je težje elektrificirati transportna sredstva. V to rubriko spadata letalstvo in težki cestni promet. Napovedi za porabo vodika v letalskem in težkem cestnem prometu so 22 TWh za leto 2030, 140 TWh za leto 2040 in 285 TWh za leto 2050. Za leto 2030 je napovedana poraba vodikovih gorivnih celic za transport tovornjakov 5 %, za leto 2040 30 %, za leto 2050 pa 55 %. Poraba vodikovih celic v avtobusnem prevozu bo nekoliko manjša, in sicer predvidoma 4 % leta 2030, 21 % leta 2040 in 25 % leta 2050. Za tranzicijo tovrnega prometa bo ključen biometan, ki bo pripomogel k ogljični nevtralnosti. Na daljši rok pa bosta vodik in elektrika tista elementa, ki bosta pripomogla k ogljični nevtralnosti transporta. Tako bo treba v začetku vzpostaviti omrežje za prenos biometana do polnilnic, sčasoma pa bo treba vzpostaviti omrežja tudi za prenos vodika in vzpostavitev polnilnih postaj za vodik. Napovedi za leto 2050 pravijo, da bo evropski ladijski promet v celoti poganjala električna energija. Znotraj EU bo polovica ladijskega prometa poganjala električna energija, polovica pa bioplin. Letalstvo bo leta 2040 potrošilo 9 TWh vodika in leta 2050 68 TWh. Poraba vodika v letalstvu tako predstavlja 1 % povpraševanja po energiji v letu 2040 in 9 % v letu 2050 (Jens, Gräf & Schimmel 2021; Wang in drugi 2021).

3.4.3 Uporaba vodika v energetske in stavbnem sektorju

Energetski sektor v EU se razvija hitro in učinkovito. Od leta 1990 je intenzivnost emisij CO₂ pri proizvodnji električne energije upadla za 45 %. V največji meri je k temu pripomogla proizvodnja električne energije iz obnovljivih virov in postopno zmanjševanje proizvodnje električne energije iz premoga. Po letu 2015 se je delež električne energije iz obnovljivih virov podvojil, proizvodnja električne energije iz premoga pa se je prepolovila. Obnovljivi viri električne energije so v letu 2020 predstavljali 38 % porabe električne energije v primerjavi z letom 2018, ko je ta predstavljala 32 %. Nameščena zmogljivost električne energije iz vetrnih elektrarn je v letu 2019 predstavljala 185 GW, zmogljivost sončnih elektrarn pa 103 GW. V letu 2018 je v EU med povpraševanjem po končni energiji električna energija predstavljala 21 %. V prihodnje bodo v EU proizvodnjo električne energije sestavljale vetrne, sončne, hidro- in jedrske elektrarne. Po napovedi študije avtorjev Peters in drugi (2020) bo v EU in Združenem kraljestvu leta 2030 proizvodnja električne energije predstavljala 3700 TWh, leta 2040 bo predstavljala 4200 TWh in leta 2050 bo električna energija predstavljala zmogljivost 4600 TWh (brez upoštevanja električne energije, proizvedene za proizvodnjo vodika). Električna energija iz vodika bo po napovedih predstavljala 0,2 % celotne električne energije leta 2030, leta 2040 bo predstavljala 4 % in leta 2050 bo proizvodnja električne energije, proizvedena iz vodika, predstavljala 7 % celotne proizvodnje električne energije (Jens, Gräf & Schimmel 2021; Wang in drugi 2021).

Stavbna poslopja so v EU odgovorna za približno 40 % skupne porabe energije in proizvedejo 36 % celotnih emisij CO₂ v EU in Združenem kraljestvu. Ti odstotki se nanašajo na uporabo in obratovanje stavb v energetske in ogrevalnem sektorju. EU in Združeno kraljestvo imata več kot 300 milijonov stavb s skupno površino 25 milijard m². Od teh stavb 77 % predstavljajo stanovanjski objekti, preostalih 23 % predstavljajo storitvene stavbe (trgovinska poslopja, bolnišnice, pisarne itd.). V splošnem bo zmanjšanje emisij CO₂ zaradi ogrevanja stavb rezultat kombinacije zmanjšanja potreb po toploti (zmanjšanje toplotnih izgub), prezračevanja in zmanjšanja emisij CO₂ na enoto zagotovljene temperature. Razogljičenje stavbnega sektorja bo možno z uporabo različnih tehnologij. Povpraševanje po vodiku v stavbnem sektorju je odvisno od stopnje prenove stavb in relativnega deleža vpeljave biometana in mešanic vodika, ki se uporablja za ogrevanje. V prihodnosti bo hibridno ogrevanje s plinskimi priključki (obnovljivi in nizkoogljični plin) in priključki daljinskega ogrevanja (angl. district heating) ter uporabo električne energije (toplotne črpalke) prispevalo k zmanjševanju stroškov za potrošnike in hitrejšemu upadanju izpustov emisij CO₂. V letu 2050 bo letno povpraševanje po plinu iz OVE znašalo 600 TWh. Zaradi povečanja porabe biometana je napovedano, da bo v letu 2050 povpraševanje po vodiku znašalo 150 TWh (Jens, Gräf & Schimmel 2021; Wang in drugi 2021).

4 TRG VODIKA V SLOVENIJI

V tem poglavju bo govora o trgu vodika v Sloveniji. Predstavil bom, kakšno strategijo ima Slovenija v prihodnjih letih na področju vodika in kakšno infrastrukturo ter uporabo vodika imamo v Sloveniji.

4.1 Strategija vodika v Sloveniji

Uredba (EU) 2018/1999 Evropskega parlamenta in sveta z dne 11. decembra 2018 o upravljanju energetske unije in podnebnih ukrepov, spremembi uredb (ES) št. 663/2009 in (ES) št. 715/2009 Evropskega parlamenta in sveta, direktiv 94/22/ES, 98/70/ES, 2009/31/ES, 2009/73/ES, 2010/31/EU, 2012/27/EU in 2013/30/EU Evropskega parlamenta in sveta, direktiv sveta 2009/119/ES in (EU) 2015/652 ter razveljavitvi Uredbe (EU) št. 525/2013 Evropskega parlamenta in sveta, Ur. l. EU, št. L328/2018m določa, da morajo države članice pripraviti in predložiti Evropski komisiji končen celovit nacionalni energetski in podnebni načrt za obdobje od leta 2020 do 2030 (v nadaljevanju NEPN) ter dolgoročno podnebno strategijo znižanja emisij CO₂ do leta 2050. NEPN je strateški dokument, ki določa naslednje cilje: razogličanje, energetska učinkovitost, energetska varnost, notranji trg energij, raziskave, inovacije in konkurenčnost.

V zadnjih letih v Sloveniji občutimo pozitivne spremembe na poti k zmanjšanju obremenitve okolja. Emisije TGP so se ob manjši gospodarski aktivnosti med krizo zmanjšale, vendar je raven emisij na enoto bruto domačega proizvoda (v nadaljevanju BDP) še vedno višji od povprečja EU. V letu 2018 je prometni sektor predstavljal največji, 33,3 % delež izpusta emisij TGP, sledila ji je proizvodnja električne energije in toplote z 29,7 %, industrijski sektor s 17,2 %, kmetijski sektor z 9,8 %, široka raba in odpadki pa so predstavljali 10 % delež emisij TGP. V vseh sektorjih so se glede na leto 2005 emisije TGP zmanjšale, le v prometnem sektorju so se povečale za 32 % (Life Climate Path 2050, 2021).

V NEPN so določeni cilji, ki prispevajo k izboljšanju energetske in snovne učinkovitosti v petih razsežnostih energetske unije. Te razsežnosti so blaženje podnebnih sprememb in prilagajanje nanje, zmanjšanje emisij TGP iz OVE, učinkovita raba energije, energetska varnost in notranji trg energije ter raziskave, inovacije in konkurenčnost. Cilji razsežnosti blaženja podnebnih sprememb in prilagoditve nanje predpostavljajo, da je treba glede na leto 2005 do leta 2030 znižati emisije TGP za 20 % v sektorjih, ki niso vključeni v shemo trgovanja z emisijami. Cilj razsežnosti blaženja podnebnih sprememb in prilagoditve nanje zagotavlja tudi, da sektorji rabe zemljišč, spremembe rabe zemljišč in gozdarstvo (v nadaljevanju LULUCF) do leta 2030 ne bodo proizvedli emisij TGP. Za zmanjšanje uporabe fosilnih goriv in odvisnosti od njih mora Slovenija do leta 2030 postopoma opuščati rabo premoga za vsaj 30 %, prepovedati prodajo in vgradnjo novih kotlov za kurilno olje (do leta 2023) in podpreti izvedbo pilotnih projektov za proizvodnjo 10 % sintetičnega metana ali vodika iz obnovljivih virov energije. Cilj razsežnosti OVE določa, da se do leta 2030 doseže

vsaj 27 % delež obnovljivih virov v končni rabi energije. Med večjimi poudarki cilja za energetska učinkovitost Slovenije sta energetska varnost in notranji trg energije. Cilj zastavlja, da se v Sloveniji zagotovi finančne, tehnične in človeške vire za pospešitev celotnega razvoja omrežja električne energije, kar bo omogočilo boljšo zmogljivost in odpornost proti motnjam. Cilj omogoča prožnost virov in hitrejše vključevanje e-mobilnosti, toplotnih črpalk in naprav za proizvodnjo ter shranjevanje električne energije iz obnovljivih virov. Preostali cilji razsežnosti energetske varnosti in notranjega trga energije v Sloveniji zahtevajo, da se zagotovi zanesljivo in konkurenčno oskrbo z energijo ter ohrani visoko raven elektroenergetske povezanosti z mejnimi državami. Cilj vključuje, da se do leta 2030 na področju fosilnih goriv uvozna odvisnost do leta 2030 zmanjša in tako poveča oskrba z električno energijo s slovenskimi viri na 75 % z nadaljevanjem izkoriščanja jedrske energije in ohranjanjem odličnosti pri obratovanju jedrskih objektov. Nadaljnji razvoj sistemskih storitev, tehnologij, infrastrukture in storitev za shranjevanje energije ter vzpostavitve razvojno naravnanih regulatornih okvirov so razsežnosti cilja za energetska konkurenčen trg v Sloveniji. Cilji Slovenije pri razsežnosti raziskav, inovacij in konkurenčnosti zajemajo povečanje finančnega vlaganja v raziskave in razvoj (najmanj 3 % BDP do leta 2030), povečanje vlaganja v človeške vire, podporo podjetjem za učinkovit prehod v ogljično nevtrarno gospodarstvo in spodbudo ciljnim raziskovalnim projektom ter multidisciplinarnim raziskovalnim programom (Vlada Republike Slovenije, 2020).

Zgoraj naštetih cilji, ki vključujejo zmanjšanje uporabe fosilnih goriv v Sloveniji, prispevajo k vpeljavi vodika v naše gospodarstvo. V skladu z NEPN Republike Slovenije ima vodik pomembno vlogo pri vključevanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov in krepitvi razpoložljivosti plinske oskrbe ter prispeva k doseganju cilja za ogljično nevtrarno Slovenijo. Vodik iz OVE se lahko uporablja za shranjevanje električne energije, proizvedene v obdobjih nizkega povpraševanja. Vodik je tako primeren za sezonsko skladiščenje OVE in za kratkoročno skladiščenje za zagotavljanje izravnave v elektroenergetskem sistemu. Plinovod je prav tisto omrežje, ki je primerno za shranjevanje vodika. Slovenija razmišlja o razogljichenju svoje oskrbe s plinom, s katerim bo v omrežje zemeljskega plina dodala zeleni vodik. Zeleni vodik se v Sloveniji obravnava kot alternativa konvencionalnim fosilnim gorivom in Vlada Republike Slovenije (2020) ocenjuje, da se bo v letu 2040 najmanj 7 % porabe goriva zagotovilo z vodikom (predvsem v prometnem sektorju). Slovenija bo v prihodnjih letih upoštevala priporočila Evropske komisije za začetek postopnega nadomeščanja zemeljskega plina s plini iz OVE, in sicer s sintetičnim plinom, vodikom in biometanom. Trenutno je Slovenija v celoti uvozna odvisna od zemeljskega plina, kajti v Sloveniji ni proizvodnje za tovrstne pline. Slovenija bo podpirala izvajanje pilotnih projektov za proizvodnjo vodika iz električne energije iz obnovljivih virov. Tako se pričakuje, da bo leta 2030 10 % nacionalne porabe plina izhajalo iz OVE. Vodik lahko ustreza kot povezava med sektorji električne energije, ogrevanja, hlajenja in sektorja plina, ker podpira vključevanje večjih količin električne energije, pridobljene iz OVE v sistem in s tem povečuje prožnost sistema ter prispeva k zanesljivosti in razogljichenju plinskega

sektorja. V ta namen Slovenija načrtuje vzpostavitev namenskih zmogljivosti za pretvorbo električne energije iz OVE s pomočjo vodika v obnovljive pline (FCH 2 JU, 2020a).

4.2 Infrastruktura in uporaba vodika v Sloveniji

Za leto 2030 je napovedano, da bo v Sloveniji potencial proizvodnje električne energije iz OVE večji kot pa pričakovano povpraševanje po njej (FCH 2 JU, 2020a). Takšna napoved ustvarja možnost, da se v Sloveniji namestijo dodatne zmogljivosti za proizvodnjo električne energije iz obnovljivih virov, ki se lahko uporabijo za proizvodnjo vodika z metodo elektrolize. V prihodnosti Slovenije obstaja možnost za izgradnjo namenskih obnovljivih virov električne energije, saj naj bi Slovenija do leta 2030 izkoristila le 13 % tehnološkega potenciala za proizvodnjo električne energije iz OVE. V prihodnosti Slovenije bo možnost uporabe pretvorbe energije v vodik kot ponudnik prožnosti elektroenergetskega sistema do leta 2030 še vedno omejena, ker bo imel slovenski energetska sistem manjšo nameščeno moč spremenljive proizvodnje električne energije iz OVE, kot pa bo njena povprečna poraba. V nadaljevanju na to vpliva tudi visoka zmogljivost medsebojnega povezovanja trgov električne energije, predvsem zaradi večjega italijanskega trga (FCH 2 JU, 2020a; FCH 2 JU, 2021b).

4.2.1 Infrastruktura vodika v Sloveniji

V NEPN (2020) so ocenjene specifikacije prenosa obnovljivega vodika v omrežju zemeljskega plina. Glede na nizko kapaciteto plinskega omrežja bi bilo treba kakršnokoli pretvorbo omrežja skrbno načrtovati in se osredotočiti na stroškovno učinkovite odseke. Slovenija ima poleg omenjenega omejeno ustreznost uporabe CCS. Slovenija ima dosti potencialno primernih lokacij za shranjevanja CO₂, vendar je napredek pri uporabi CO₂ v industrijskih procesih še omejen. Trenutno v Sloveniji ni solnih skladišč (solne jame), ki bi bile primerne za shranjevanje zemeljskega plina in vodika (FCH 2 JU, 2020a). V prihodnosti bi lahko italijansko vodikovo omrežje s Slovenijo povezoval potencial oskrbe z vodikom med Afriko in Ukrajino. Nastalo vodikovo omrežje med Avstrijo, Madžarsko in Hrvaško bi Slovenija v prihodnosti povezala z EHB med državami jugovzhodnega in severovzhodnega dela EU (Wang in drugi, 2021).

Slovenski operater prenosnega plinskega omrežja Plinovodi, d. o. o., upravlja omrežje s 1195 kilometri. Ta mreža zemeljskega plina je namenjena domači uporabi in obenem izvaja tranzitno vlogo med Avstrijo, Hrvaško in Italijo. Omrežje uporablja podvojeno glavno »hrbtenico« od Ljubljane, ki se razteza proti vzhodu in severu. Zaradi terminala za LNG na Hrvaškem in načrtovane nove povezave z Madžarsko se bo v prihodnje tranzitna vloga spremenila. Tako se bo lahko del omrežja »hrbtenice« plinovoda uporabil za prenos vodika. Ocenjuje se, da se bo v prihodnjih letih v Sloveniji povečalo število sončnih elektrarn. V Sloveniji je približno tretjina električne energije proizvedene iz premoga. Termoelektrarne bi lahko v prihodnosti zamenjala plinska elektrarna in to bi bila nadaljnja priložnost za

uporabo vodika. Z razpoložljivim omrežjem zelenega vodika, ki poteka prek avstrijskega omrežja, bi lahko oskrbovali slovenske uporabnike v industrijskem in električnem sektorju (Jens, Wang, Van der Leun, Peters & Buseman, 2021).

V Sloveniji so se štiri slovenske družbe (Plinovodi, ELES, Holding Slovenske elektrarne in Hidroelektrarne na Spodnji Savi) združile in pričele projekt z naslovom SLOP₂G. Ta projekt je prvi konkreten projekt pri vpeljavi vodika v elektroenergetski sistem. SLOP₂G združuje dve energetski lokaciji, na katerih se bo presežna električna energija in električna energija iz obnovljivih virov pretvorila v zeleni vodik, ta pa se bo nato s postopkom metanizacije pretvoril v sintetični metan. Obe lokaciji bosta nudili vbrizgavanje prek vodika in sintetičnega metana v prenosno plinovodno omrežje, ki je povezano z industrijskimi in komercialnimi uporabniki. Ta projekt bo tudi nudil optimalizacijo virov električne energije, ki je potrebna za proizvodnjo zelenega vodika in sintetičnega metana v povezavi z zemeljskim plinom. S tem projektom bodo vzpostavili platforme za trgovanje z obnovljivimi plini. Projekt vključuje tudi certificiranje izvora zelenih plinov (HSE, 2022).

4.2.2 Uporabnost vodika v Sloveniji

V tem poglavju se bom osredotočil na aplikacijo vodika v slovenskem industrijskem, stavbnem in transportnem sektorju. V Sloveniji ima vpeljava vodika iz OVE potencial v industrijskem in prometnem sektorju.

4.2.2.1 Uporabnost vodika v industrijskem in stavbnem sektorju

Vpeljava vodika v slovensko industrijo prinaša priložnosti za nadomeščanje zemeljskega plina in znižanje emisij TGP visokotemperaturne proizvodnje toplote. Uporaba zemeljskega plina v slovenskem industrijskem sektorju predstavlja tretjino celotne rabe energije. Po podatkih iz leta 2017 je zemeljski plin predstavljal 34 % porabo energije v slovenskem industrijskem sektorju. Povprečna evropska poraba zemeljskega plina v industrijskem sektorju je istega leta znašala 32 %. Visokotemperaturna procesna toplota v slovenskem industrijskem sektorju zajema približno 30 % rabe energije. Vodik je nosilec energije z nizkim oziroma brezogljičnim odtisom, ki bi z vpeljavo prispeval k zmanjšanju emisij TGP. Trenutno v Sloveniji še ni večjih obratov, ki bi zajemali uporabo vodika v slovenskem industrijskem sektorju (FCH 2 JU, 2020a).

V Sloveniji je bilo leta 2020 končni rabi energije v gospodinjstvu namenjenih približno 45.000 TJ, od tega je bilo 62 % rabe energije namenjene za ogrevanje prostorov. Zemeljski plin predstavlja le 10 % rabe energije v stavbnem sektorju in 15 % za ogrevanje stavb. V Sloveniji se še vedno 20 % energije za ogrevanje stavb ustvarja iz kurilnega olja. Na srednji in dolgi rok je vodik tisti nosilec energije, ki bi lahko razbremenil povpraševanje po takšni energiji. Vodik bo imel tudi vlogo pri daljinskem ogrevanju, ki v Sloveniji znaša 7 % povpraševanja po toploti (FCH 2 JU, 2020a; SURS 2021).

4.2.2.2 Uporaba vodika v transportnem sektorju

Slovenija ima velik potencial za vpeljavo vodika v prometni sektor. Pripomogel bo k razogljičenju tega sektorja, kajti kot v ostalih državah članicah EU je prometni sektor velik porabnik fosilnih goriv. V Sloveniji fosilna goriva v transportnem sektorju predstavljajo 98 % delež goriv v rabi energije v cestnem prometu leta 2017 (20.651 GWh). V prometnem sektorju je leta 2020 v Sloveniji 29 % (6280 GWh) celotne porabe energije odpadlo na tovornjake, avtobuse in gospodarska vozila. V primerjavi z evropskim povprečjem je delež v Sloveniji za tri odstotne točke manjši. V Sloveniji je implementacija elektrifikacije v tem segmentu cestnega prometa še vedno izziv, zato lahko vodik v prihodnjih letih igra pomembno vlogo pri razogljičenju prometnega sektorja. Fosilna goriva (dizel) so prisotna tudi v železniškem prometu. Dizelski vlaki v Sloveniji predstavljajo približno tretjino (109 GWh) porabe energije v železniškem prometu. Ladijski sektor predstavlja priložnost za vpeljavo vodika, saj v Sloveniji ladijski promet predstavlja 8 % delež (1793 GWh) celotno porabljene energije v prometnem sektorju. Trenutno letalski prometni sektor v Sloveniji ne predstavlja znatnega deleža povpraševanja po energiji v prometnem sektorju. Ocenjuje se, da se bo ta delež v prihodnjih dvajsetih letih znatno povečal in bo vodik tudi v letalskem sektorju pritegnil več pozornosti (FCH 2 JU, 2020a).

5 SWOT-ANALIZA TRGA VODIKA V EVROPSKI UNIJI

V tem poglavju predstavljam SWOT-analizo trga vodika v EU. Prvotno je bila SWOT-analiza zasnovana za poslovno in trženjsko analizo organizacij, vendar so jo sčasoma široko sprejeli tudi na drugih raziskovalnih področjih (Chen, Kim & Yamaguchi, 2014). SWOT-analiza se pogosto uporablja za ovrednotenje projektov, politik, poslov in strateških načrtov. Pripomore k razumevanju prednosti, slabosti, priložnosti in nevarnosti, ki so povezane s projekti ali v našem primeru s trgom vodika v EU. Prednosti in slabosti se navezujejo na notranje okolje, medtem ko se priložnosti in nevarnosti navezujejo na zunanje okolje (Qaiser, 2021). Prednosti (elementi, ki jih je treba izkoristiti in nadgraditi) in slabosti (področja, ki potrebujejo podporo in pomoč) neke organizacije oziroma trga se ocenjujejo z ovrednotenjem njenih virov in zmogljivostjo, medtem ko se proučevanje okolja organizacij ali trga ovrednoti s priložnostmi (področja, na katerih je treba izkoristiti prednosti) in nevarnostmi (elementi, ki ovirajo razvoj). SWOT-analiza je bila do sedaj uspešno uporabljena v sektorjih energetike (analiza trajnostnega energetskega razvoja), na področju oskrbe z električno energijo, pri regionalnem energetskega načrtovanju ter razvoju plina in bioenergij (Scipioni, Manzardo & Ren, 2017; Büyükoçkan, Havle & Feyzioğlu, 2021; Hazzan, Metzuyanım, Zahav, Tal & Dori, 2018).

Na sliki 15 je prikazana SWOT-analiza trga vodika v EU, ki jo bom podrobneje predstavil v podpoglavjih, ki sledijo.

Slika 15: SWOT-analiza trga vodika v Evropski uniji

PREDNOSTI	PRILOŽNOSTI
<p>P₁: Koristi za ohranjanje okolja</p> <p>P₂: Raznoverstnost pri uporabi virov</p> <p>P₃: Tehnološke prednosti</p>	<p>P₁: Družbeno – ekonomske priložnosti</p> <p>P₂: Uporabnost vodika</p> <p>P₃: Razvojne možnosti</p>
SLABOSTI	NEVARNOSTI
<p>S₁: Visoki stroški</p> <p>S₂: Nezadostna infrastruktura</p>	<p>N₁: Konkurenčnost drugih obnovljivih virov</p> <p>N₂: Tehnološka negotovost</p> <p>N₃: Nestabilnost trga z vodikom</p> <p>N₄: Tveganje pri uvajanju vodika</p>

Vir: Lastno delo.

Za SWOT-analizo uporabljam dva koraka. Prvi korak zajema zbiranje literature in podatkov. Za boljše razumevanje trga vodika v EU sem zbral in pregledal različne članke, knjige, zakonodajne akte in poročila. V drugem koraku sem na podlagi zbranih podatkov oblikoval matriko SWOT-analize, kjer sem se dotaknil vseh pomembnih dejavnikov o prednostih, slabostih, priložnostih in nevarnostih trga vodika v EU. SWOT-analiza se nahaja v prilogi 5.

5.1 Prednosti

5.1.1 Koristi za ohranjanje okolja

Za nadaljnjo doseglo ogljične nevtralnosti do leta 2050 bodo morali vsi gospodarski sektorji, vključno s težko industrijo, zmanjšati emisije TGP. Za prihodnja leta Uredba (EU) 2021/1119 Evropskega parlamenta in sveta z dne 30. junija 2021 o vzpostavitvi okvira za doseganje podnebne nevtralnosti in spremembi uredb (ES), št. 401/2009, in (EU) 2018/1999 (evropska podnebna pravila), Ur. l. EU, št. L 243/1, določa nov cilj, ki zahteva zmanjšanje emisij TGP za vsaj 55 % do leta 2030. Prejšnji cilj je znašal 40 %. RED v Svetu Evropske unije (2021) zvišuje cilj za uporabo OVE z 32 % na 40 %. Za doseganje takšnih ciljev električna energija iz OVE lahko nadomesti fosilna goriva, vendar ne v celoti. Električna energija iz OVE težko nadomesti uporabo fosilnih goriv v cestnotovornem, ladijskem in letalskem prometu ter v težkoindustrijskem sektorju, kot je proizvodnja jekla. Kot že omenjeno, lahko vodik med drugim nadomesti uporabo fosilnih goriv tudi v stavbnem sektorju in tako pripomore k znatnemu zmanjšanju emisij TGP.

5.1.2 Raznovrstnost pri uporabi virov

Vodik je lahko proizveden iz fosilnih goriv (zemeljski plin, premog, nafta) in OVE, kot jih proizvajajo vetrne elektrarne, sončne elektrarne in hidroelektrarne. Prav tako lahko vodik proizvedemo kot stranski produkt v kemičnem sektorju in sektorju, ki se ukvarja z odpadki. V letu 2019 je bilo v EU proizvedenih 12,1 milijona ton vodika (Hydrogen Europe, 2021). EU je za leto 2030 napovedala proizvodnjo 10 milijonov ton zelenega vodika (Evropska komisija, 2020b). Vodik omogoča, da se občasne OVE vključi v energetske sistem in s tem zmanjša odvisnost od fosilnih goriv. EU bo tako z metodo CCS in vodikom ustvarila zeleno energetske prihodnost.

5.1.3 Tehnološke prednosti

Vodik vsebuje več energije na enoto mase kot zemeljski plin in bencin in je zato zanimiv kot transportno gorivo. Uporablja se v čisti obliki kot energent ali industrijska surovina. Surovine in goriva na osnovi vodika se lahko proizvajajo iz kateregakoli vira (električna energija, fosilna goriva itd.) in se zlahka uporabljajo v aplikacijah, kot so motorji, turbine in kemični procesi. Vključuje tudi derivate, kot so sintetični metan, sintetična tekoča goriva in amonijak (vodik združen z dušikom). Nosilci energije, kot so fosilna goriva, se pri proizvodnji, pretvorbi in uporabi soočajo z izgubami učinkovitosti. Vodik ima prednost v tem, da se te izgube lahko shranjujejo na različnih stopnjah postopka prenosa energije. Vodik je mogoče proizvajati z različnimi viri energije in tehnologijami. Če je vodik proizveden iz OVE, ne proizvaja neposrednega izpusta TGP in pri uporabi vodika v gorivnih celicah proizvede vodo kot stranski produkt. Vodik se lahko v nekaterih aplikacijah uporablja z veliko večjo učinkovitostjo, pri čemer ne proizvede emisij TGP. Primer so vodikove gorivne celice, ki imajo v vozilih 60 % učinkovitost v primerjavi z bencinskim motorjem na notranje izgorevanje, ki ima približno 20 % učinkovitost. Zaradi molekularne narave se vodik lahko združuje z drugimi elementi, kot sta ogljik in dušik. Na osnovi vodika lahko nastanejo goriva, s katerimi je lažje ravnati in se lahko uporabljajo kot surovina v industriji. Vodik ima namreč veliko zmogljivost shranjevanja. To omogoča obvladovanje moči in nestabilnosti OVE. Povečanje OVE sovпада s tem, da je vodik nosilec energije, ki je praktičen za shranjevanje energije. Prednost vodika je tudi v distribuciji, kajti vodik se lahko prenaša po trenutnih plinovodih, ki so namenjeni za prenos zemeljskega plina.

5.2 Slabosti

5.2.1 Visoki stroški

Če bomo želeli imeti v prihodnosti trajnostno proizvodnjo vodika v EU, bo treba zmanjšati stroške proizvodnje vodika. Investicijski stroški modrega in sivega vodika so v primerjavi z investicijskimi stroški zelenega vodika nižji, vendar zaradi izpustov TGP sivi vodik ni

primeren za prihodnost. Stroški zelenega vodika iz OVE, vključno s stroški proizvodnje električne energije iz OVE, vzpostavitve infrastrukture in končne aplikacije letno dosežejo od 10 do 33 milijard evrov (FCH 2 JU, 2020b). Problematika modrega vodika s tehnologijo CCS je tudi v tem, ker slednji še ni tako razširjen na trgu v EU in bo tudi v prihodnosti zaradi davka na emisije CO₂ cena modrega vodika naraščala (European Commission, 2020b). Zeleni vodik bo tako sčasoma začel konkurirati modremu vodik. Proizvodni stroški vodika so odvisni od cen surovin. Trenutno je zaradi visokih cen OVE in elektrolizerjev zeleni vodik bistveno dražji od sivega in modrega vodika. Proizvodnja vodika pa ni najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na celotne visoke stroške vodika. Zaradi trenutnega količinskega pomanjkanja prevoza, stroškovno konkurenčne tehnologije pretvorbe in shranjevanja vodika ta vrednostna veriga prinaša visoke stroške v primerjavi z ostalimi fosilnimi gorivi (IAE, 2021).

5.2.2 Nezadostna infrastruktura

Trenutno v EU trg vodika še vedno nima zadostnega obsega infrastrukture. Povpraševanje po nizkoogljičnem vodik lahko pride iz različnih sektorjev, ki zahtevajo različne možnosti za oskrbo in ravnanje z vodikom. V različnih državah članicah EU se bo zaradi konkurenčnosti strošek verige razlikoval. Za uskladitev teh stroškov sta potrebna čas in vzpostavitev novih pogodbenih razmerij. V EU bo za prenos vodika v prihodnosti treba vzpostaviti infrastrukturo cevovodov in oskrbovalnih omrežij, ki pa prinašajo ogromne investicijske stroške. Primer je EHB, ki naj bi do leta 2040 zajemala investicijo od 43 in 81 milijard evrov (Jens, Wang, Van der Leun, Peters & Buseman, 2021). Vodik se v EU trenutno proizvaja lokalno, vendar za shranjevanje in distribucijo zahteva ekonomijo obsega, da bo postal stroškovno učinkovit. Poleg omenjenega vodika v transportnem sektorju zahteva zadostno omrežje polnilnih postaj, kar je predpogoj za povečanje transportnih vozil, ki bi vsebovala vodikove gorivne celice. V mnogih državah članicah EU so naložbe v takšne infrastrukture finančno omejene. V nekaterih primerih bo potrebno čezmejno usklajevanje, ki bo prineslo mednarodno sodelovanje na ravni, ki ga pri vodik trenutno še ni opaziti.

5.3 Priložnosti

5.3.1 Družbenoekonomske priložnosti

Obnovljivi oziroma zeleni vodik bo v prihodnosti dobil večjo težo kot modri in sivi vodik. Kumulativne investicije za proizvodnjo zelenega vodika naj bi do leta 2030 znašale od 70 do 249 milijard evrov. Vse te naložbe bodo v prihodnosti EU ustvarjale dodano vrednost domačega gospodarstva. V proizvodnji, gradnji in obratovanju vodikovih tehnologij naj bi se do leta 2030 v EU ustvarilo od 29.270 do 106.980 neposrednih delovnih mest (v proizvodnji, obratovanju in vzdrževanju) in od 74.790 do 250.650 posrednih delovnih mest. Skupno bo proizvodnja vodika do leta 2030 v EU ustvarila od 104.060 do 357.630 delovnih

mest (FCH 2 JU, 2020b). Vsa ta nova delovna mesta bodo pripomogla k zmanjšanju izpustov TGP. Delež novih delovnih mest bo pomemben pri razogljičenju sektorjev, kot so sektor tovarnega prometa, proizvodnja jekla, rafiniranje, proizvodnja amonijaka in metana. V EU je še vedno 1,5 gigatona emisij CO₂, ki jih je treba izničiti, da bi se dosegli cilji za leto 2030. Vpeljava vodika bi do leta 2030 lahko pripomogla k zmanjšanju od 20 do 67 megaton emisij CO₂, kar ustreza zahtevanim po 4,6 % zmanjšanju emisij CO₂ (Sveženj »Pripravljeni na 55«, 2021). Ekonomska priložnost vodika je odvisna od stroškov naložb in učinkovitosti pretvorbe. Pričakuje se, da se bo ta v prihodnosti izboljšala. Cena električne energije se bo v prihodnjih letih spremenila zaradi večje razpoložljivosti električne energije iz OVE, ta pa bo z nizko ceno povečala možnost za vpeljavo vodika v energetske sistem.

5.3.2 Uporabnost vodika

Za leto 2030 je ocenjeni potencial električne energije iz OVE v večini držav članic EU večji od ocenjenega povpraševanja po električni energiji iz OVE. V zadnjem času se cena zemeljskega plina povečuje in s tem zeleni vodik pridobiva na svoji prepoznavnosti (Collins, 2021). Tako imajo države članice EU priložnost izgradnje dodatnih namenskih elektrarn iz OVE za pretvorbo vodika z metodo elektrolize. Poleg omenjenega ima vodik priložnost za izboljšanje prožnosti energetskega sistema. Narasčajoče potrebe po OVE povzročajo nihanja v oskrbi z električno energijo in s tem problematiko uravnavanja ponudb in povpraševanja. Prožnost energetskega sistema je možno uravnati z vodikom tako, da se v času visoke ponudbe električne energije iz OVE in nizkih cen električna energija pretvori v vodik in se neposredno shrani ali uporabi za kasnejšo uporabo (IEA, 2019). Infrastruktura je ključen dejavnik pri vpeljavi vodika v energetske sistem. Majhne količine vodika je možno vbrizgavati v omrežje prenosa metana, ne da bi s tem prilagodili omrežje ali opremo pri končni uporabi. Priložnost vpeljave vodika v energetske sistem je torej naložba v nove cevovode oziroma v obstoječe omrežje za prenos metana. V prihodnosti pa bo treba vzpostaviti vzporedno infrastrukturo namenskih cevovodov za vodik iz metanskih omrežij. EU vidi priložnost v vzpostavitvi vodikovih cevovodov, saj v prihodnosti prinašajo desetkrat manjši strošek kot pa prenos velikih količin energije prek električnih vodov, elektrolitskih naprav in ostalih vrst vodikovega transporta. Priložnost uporabe vodika predstavlja tudi ustrezna infrastruktura za shranjevanje vodika. Sezonsko skladiščenje vodika prinaša priložnosti za države članice EU, ki imajo pozimi veliko povpraševanje po ogrevanju. Vodik se lahko shrani v sedanjih solnih jamah ali pa v že izčrpanih plinskih poljih. Priložnost vodika v EU predstavlja tudi svetovni trg vodika, ki bo pripomogel k uvozu zelenega in modrega vodika iz držav izven EU takrat, ko bodo imele nekatere države članice EU nizek potencial proizvodnje vodika. Razogljičenje industrijskih procesov, ki jih je težko elektrificirati, prinaša največje priložnosti vpeljave vodika. Kratkoročno gledano, ima v industrijskem sektorju največji potencial nadomestitev obstoječe uporabe sivega vodika z modrim vodikom. Poleg omenjenega pa bo imel zeleni vodik v prihodnosti priložnost, da se ga vpelje v industrijske procese, ki se uporabljajo za proizvodnjo procesne toplote. Pri nizkotemperaturnih procesih je primerna vpeljava električnih toplotnih črpalk, pri

visokotemperaturnih pa vpeljava kotlov na vodik. Neposredna vpeljava vodika v proizvodnjo jekla pa bo v prihodnosti z neposredno redukcijo železove rude z vodikom nadomestila sedanje postopke, ki temeljijo na premogu. Priložnost vpeljave vodika v stavbno ogrevanje ima v prihodnosti velik potencial. Zaradi starih stavb v nekaterih državah članicah EU ogrevanje temelji na omrežju daljinskega ogrevanja ali pa na omrežju zemeljskega plina. Vpeljava vodika v te sisteme vpliva na razogljičenje tovrstne energije, saj se v EU približno 30 % energije porabi za ogrevanje in hlajenje stavb. Priložnost vpeljave vodika v različne tehnologije hlajenja stavb v prihodnosti predstavlja potencial, ki pa je trenutno še v fazi raziskovanja. Prometni sektor je v EU eden večjih porabnikov fosilnih goriv. Od leta 1990 do leta 2017 so se celotne emisije TGP v EU zmanjšale za 22 %. V prometnem sektorju pa so se v teh letih povečale za 28 % in ocene kažejo, da se bodo tudi v prihodnje povečevale. Za zmanjšanje emisij TGP v prometnem sektorju bo v prihodnje ključno, da se bodo fosilna goriva zamenjala z obnovljivimi oziroma nizkoogljičnimi gorivi. Vodik ima z uporabo vodikovih gorivnih celic v prihodnosti potencial v cestnem, ladijskem in letalskem prometu. V primerjavi z električnimi vozili imajo vozila na vodikove celice prednost v tem, da imajo daljši doseg in se hitreje polnijo. V ladijskem in letalskem prometu ima vodik priložnost v sintetičnih gorivih, narejenih na osnovi vodika.

5.3.3 Razvojne možnosti

Zmanjševanje stroškov zaradi ekonomije obsega je eden izmed načinov, ki zmanjša stroške vpeljave vodika. Raziskave in razvoj pa so poleg omenjenega načina zmanjševanja stroškov tudi pomemben del zmanjševanja stroškov vpeljave vodika. Raziskave in razvoj izboljšajo učinkovitost tako proizvodnje vodika kot njegovega prenosa in končne uporabe. V to področje spada razvoj vodikovih gorivnih celic, goriv na osnovi vodika in elektrolizerji. V prihodnjih letih so ukrepi vlade tisti, ki bodo ključni pri privabljanju zasebnega kapitala v nove raziskave in razvoj vodika. Različna poročila v EU prikazujejo, da se bodo v prihodnosti stroški elektrolizerjev in OVE zmanjšali. S tem bo zeleni vodik postal konkurenčen ostalim fosilnim gorivom (IRENA, 2022). Prihodki, pridobljeni iz zelenega vodika, bodo v prihodnje lahko uporabljeni kot investicija v nove infrastrukture in inovacije. V prihodnje se je v državah članicah EU treba osredotočiti na raziskave in razvoj, ki so podprti z javnim financiranjem in izvajanjem inovativnih in demonstracijskih projektov, ukrepi za odpravo regulativnih ovir in postopnim uvajanjem potrebne infrastrukture. Skoraj vse države članice EU v svojih nacionalnih programih za energetska učinkovitost navajajo, da so raziskave in razvoj ključni za zagotavljanje srednje- in dolgoročne konkurenčnosti uporabe tehnologije vodika (FCH 2 JU, 2020b). Raziskovalne organizacije na nacionalni ravni v veliki meri tesno sodelujejo z industrijo, ki je povezana z gorivnimi celicami in vodikom na splošno. Več držav članic EU, kot so Nemčija, Francija, Grčija, Češka, Danska, Avstrija, Belgija itd., obravnava vodik kot prednostno temo v raziskovalnem programu za energetska prehod in poudarja potrebo po večjem financiranju, zlasti na področju tržnih dejavnosti.

5.4 Nevarnosti

5.4.1 Konkurenčnost drugih obnovljivih virov

Vodik ima v EU perspektivno prihodnost, vendar je zaradi njegove značilnosti (nosilec energije in ne vir energije) ranljiv na področju konkurenčnosti drugih OVE. Njegova vloga je podobna električni energiji, ki je lahko prav tako pridobljena iz OVE. Električna energija ima prednost v tem, da je dlje časa na trgu in proizvodnja električne energije iz OVE vsebuje bolj sodobne in stalne tehnologije, kot jih trenutno uporabljajo za proizvodnjo vodika. Trenutno ima vodik, pridobljen iz OVE, v primerjavi z električno energijo, pridobljeno iz OVE, manjšo energetske učinkovitost in višje proizvodne stroške. Problematika vodika poleg tehnoloških in cenovnih pomanjkljivosti nastopi tudi pri okoljski učinkovitosti. Zaradi različne (sivi, modri, zeleni) proizvodnje vodika se življenjski cikel vodika razlikuje in vpliva na okoljsko učinkovitost.

5.4.2 Tehnološka negotovost

Če bo imel vodik v prihodnjih letih na trgu EU težave tehnološke narave in zaradi tega mogel razviti predvidenih lastnosti, bo lahko v primerjavi z električno energijo iz OVE izgubil svojo težo na trgu. Na trgu je trenutno močna konkurenca med vrstami goriva in bo zato pomembno, da se v prihodnosti rešijo vsa nadaljnja tehnološka vprašanja, ki bodo omogočila stroškovno učinkovito, uspešno in zmožljivo energijo vodika, ki bo v prihodnjih letih prekosila konkurenco goriv na trgu. Izzive torej predstavljajo obetavne aplikacije vodika, ki bodo v prihodnosti morale doseči zrelost in konkurenčnost na trgu.

5.4.3 Nestabilnost trga z vodikom

K nestabilnosti trga lahko doprinese nastanek monopolnih dobaviteljev zelenega vodika s prodajo vodika po visokih cenah. Tveganja v dobavni verigi, naložbena tveganja, tržna negotovost in čezmejne razlike v okoljskih predpisih prav tako prispevajo k nestabilnosti trga vodika v EU. Za obvladovanje takšnih tveganj lahko vlade sodelujejo pri čezmejnem financiranju projektov oziroma organizirajo konkurenčne pogodbe o dobavi vodika. V določenih regijah in industrijskih grozdih se lahko to tveganje porazdeli z vzpostavitvijo posrednikov, ki bi sodelovali z večletnimi pogodbami pri dobavi vodika. S tem se izboljša predviden čas povpraševanja ter zagotovi večja gotovost za vlagatelje. Za zmanjšanje tveganja nestabilnosti pri povpraševanju po vodik in izdelkih na osnovi vodika v velikem obsegu je treba v prihodnosti izboljšati »kurjenje« vodika in amonijaka v kotlih, turbinah in gorivnih celicah. Trg fosilnih goriv v EU še vedno ni zanemarljiv. Še zmeraj je močen pri oblikovanju politike in upravljanju energetskega trga na temelju gospodarskih interesov. Za velik obseg uporabe vodika je v prihodnjih letih treba pritegniti zasebne vlagatelje, ki bodo spodbudili trg in bili zmožni večjega povpraševanja po vodik.

5.4.4 Tveganja pri uvajanju vodika

V EU obstoječi predpisi in standardi trenutno še omejujejo uvajanje vodika v popoln vodikov sistem. Nekateri predpisi so nejasni in s tem ne izkoristijo vseh prednostih, ki jih prinaša vodik. Tehnična vprašanja, kot so, kako in kje se lahko uporablja utekočinjeni vodik ali vodik pod tlakom, kdo lahko ravna z vodikom, kam lahko vozijo vozila na vodik (problematika infrastrukture), kakšni so davčni režimi za pretvorbo med energenti, kakšno je shranjevanje CO₂ in kakšna je popolna integracija vodika v plinovodih, ki so namenjeni zemeljskemu plinu. Za popolno vpeljavo vodikovega sistema je treba te predpise izboljšati tako, da bo vodik lahko izkoristil svoj potencial. Nekateri standardi so še nepopolni. Predvsem so to standardi glede polnjenja vozil na vodik in sestave plina za čezmejno prodajo, varnostni ukrepi, ki jih zahteva vodikova tehnologija, in navsezadnje okoljski vpliv v življenjskem ciklu vodika. Pomemben dejavnik tveganja je življenjski cikel vodika. Vodik se lahko proizvaja in kombinira iz virov, ki prinašajo visoko raven izpustov TGP. V primerjavi z električno energijo mešanica vodika s fosilnimi gorivi onemogoči končnim uporabnikom popolno prepoznavnost končne energije. Trenutno še nepopolni standardi za obračunavanje zelenega vodika prinašajo slabosti vodikove tehnologije v dobavni verigi. Tveganje, povezano z vodikom, je poleg že omenjenih visokih investicijskih in infrastrukturnih stroškov ter varnostnih tveganj tudi industrijska dinamika dobave in distribucije fosilnih goriv, ko govorimo o proizvodnji modrega vodika z metodo CCS. Razmeroma nova tehnologija, ki je še v zgodnji fazi komercialne uporabe, na trg prinaša tveganje sprejemanja javnosti. Javnost je lahko novi tehnologiji (v tem primeru vodik) naklonjena in s tem poveča podporo za njen razvoj. Znanje, mediji, prepričanja, vrednote in izkušnje pripomorejo k dojemanju in presoji javnosti za vpeljavo nove tehnologije. Pomembno je, da javnost izve čim več o zmožnostih vodika v EU, saj se bo tako znižala negotovost pri uporabnikih in proizvajalcih vodika.

Na podlagi SWOT-analize ugotavljam, da prednosti in priložnosti vodika presegajo slabosti in nevarnosti vodika v EU. Vlade držav članic EU imajo na razpolago različna sredstva, kot so iniciative, standardi in predpisi, ki bodo v prihodnjih letih vodikom zmanjšali trenutne visoke investicijske in proizvodne stroške. Vsa ta sredstva bodo pripomogla k izgradnji zadostne infrastrukture večjega obsega in spodbudila rast trga vodika v EU.

SKLEP

Evropski zeleni dogovor v EU določa pot do ogljične nevtralnosti do leta 2050 in s tem dogovorom poziva k večjemu zavzemanju za razogljičenje do leta 2030. V EU tri četrtine izpustov TGP nastane zaradi oskrbe z energijo. Prednostna naloga je, da se v EU ustvari preskok na področju energetske učinkovitosti, ki bo pripeljal do ogljične nevtralnosti (Evropska komisija, 2019). Nekateri kazalniki kažejo, da smo blizu prelomne točke. Čedalje bolj se večja število novih naložbenih načrtov, raznih iniciativ in ukrepov, ki spodbujajo k večji uporabi vodika v EU. EU je s strategijo za vodik za podnebno nevtralno Evropo

ustvarila časovni strateški načrt. Vodik trenutno v EU v primerjavi z ostalimi energenti predstavlja relativno majhen delež. V EU in drugje po svetu so fosilna goriva še vedno v ospredju. Letno se v EU izpusti od 70 do 100 milijonov emisij CO₂. Pretežno je to zaradi uporabe fosilnih goriv, kot so zemeljski plin, nafta in premog (Evropska komisija, 2020b). Če bomo v EU želeli zmanjšati emisije TGP in v energetske sistem vpeljati vodik, bo treba v prihodnjih letih povečati zanimanje za vodik, zmanjšati stroške OVE in spodbuditi tehnološki razvoj vodika.

S SWOT-analizo sem prikazal prednosti, slabosti, priložnosti in nevarnosti trga vodika v EU. Ugotovil sem, da bo v prihodnjih letih vodik pripomogel k ohranjanju okolja. S tem bo v prihodnjih letih vodik, predvsem zeleni vodik, pripomogel k ogljični nevtralnosti do leta 2050 in k zmanjšanju emisij TGP za vsaj 55 % do leta 2030. Ključna prednost vodika je, da lahko nadomesti fosilna goriva v prometnem, industrijskem in stavbnem sektorju. Naslednja pomembna prednost trga vodika v EU je raznovrstnost pri uporabi virov. Vodik lahko proizvedemo iz različnih virov, kot so zemeljski plin, premog, nafta in OVE. V EU je bilo leta 2019 proizvedenih 12,1 milijona ton vodika. Zaradi praktičnega shranjevanja vodik omogoča vključevanje OVE v energetske sistem in s tem zmanjša uporabo fosilnih goriv. Zadnja prednost, ki sem jo izpostavil pri trgu vodika v EU, je tehnološka prednost. V primerjavi z ostalimi fosilnimi gorivi (zemeljski plin in bencin) vodik vsebuje več energije na enoto mase. Slabosti trga vodika v EU sem našel v tem, da vodik trenutno spremljajo visoki stroški. Trenutno sivi in modri vodik prinašata nižje stroške kot zeleni vodik, vendar analitiki ocenjujejo, da se bo v prihodnjih desetletjih zeleni vodik stroškovno poravnal s trenutnimi cenami fosilnih goriv in bo tako postal konkurenčen na trgu energentov v EU. Vodikova infrastruktura zaenkrat še ni zadostna. Priložnosti trga vodika v EU zajemajo najobsežnejši in najpomembnejši del SWOT-analize. Najpomembnejši vidik družbenoekonomske priložnosti trga vodika v EU predstavljajo nova delovna mesta. Do leta 2030 naj bi se na trgu vodika zaposlilo od 104.060 do 357.630 delavcev. Uporabnost vodika je drugi pomemben vidik priložnosti trga vodika v EU. Ker se cene zemeljskega plina višajo, ima zeleni vodik velik potencial zaradi cen električne energije, proizvedene iz OVE. V prihodnjih letih bo dodatna električna energija iz OVE pripomogla k izgradnji dodatnih namenskih elektrarn za proizvodnjo vodika z metodo elektrolize. S tem bo vodik povečal prožnost energetske sistema v EU. Razvojne možnosti vodika bodo ključne za zmanjševanje stroškov proizvodnje, prenosa in aplikacije vodika. Ukrepi vlad držav članic EU so v prihajajočih letih ključni pri vpeljavi investicij v raziskave in razvoj vodika. Po drugi strani pa se soočamo tudi z nevarnostmi vodika v EU. Ena najpomembnejših nevarnosti vpeljave trga vodika v EU je konkurenčnost drugih OVE, kajti največji konkurent zelenega vodika je prav njegov vir, tj. električna energija, pridobljena iz OVE. Problematiko, vredno omembe, predstavlja tudi življenjski cikel vodika, saj je v sedanjem času vodik v največji meri proizveden iz fosilnih goriv. Tehnološka negotovost lahko v prihajajočih letih vodik onemogoči rast na trgu energentov v EU. Da bi se temu izognili, je pomembno sprejeti izzive obetavnih uporab vodika, ki bodo v prihodnjih letih dosegle zrelost in konkurenčnost na trgu. Primer dobre uporabe vodika so vodikove gorivne celice. Navsezadnje pa je

ekonomska nestabilnost tista nevarnost trga vodika v EU, ki lahko prepreči rast trga vodika. Naložbena tveganja, tveganja v dobavnih verigah, tržna negotovost in čezmejne razlike v okoljskih predpisih prinašajo tveganje za razvoj trga vodika v EU. Na trgu vodika v EU se odraža tveganje pri uvajanju vodika na evropski trg energentov. Uvajanje vodika v EU je zaenkrat še omejeno s predpisi in standardi. V prihodnjih letih je treba te predpise in standarde izboljšati in prepričati javnost, da je nova tehnologija vodika primerna za uporabo in da znatno pripomore k zmanjševanju emisij TGP.

V prihodnosti imajo države v EU edinstveno priložnost, da pospešijo prehod na vodik in pripomorejo k zmanjšanju pomanjkljivosti in neučinkovitosti trenutnih sistemov ter tako posredno vplivajo na okoljske in geopolitične spremembe. Za takšno problematiko v prihajajočih letih razvoja vodika vladne organizacije lahko črpajo znanje iz nastalih trgov, kot je denimo trg zemeljskega plina v EU in tudi drugje po svetu. V prihodnjih ključnih letih je za vpeljavo trga vodika v EU treba vzpostaviti strategijo vodika pri energetskega prehodu, zagotoviti čisto uporabo vodika in razviti nove trge vodika.

LITERATURA IN VIRI

1. ASSET. (2018). *Sectoral integration – long-term perspective in the Energy System*. Pridobljeno 2. februarja 2022 iz https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_draft_asset_study_12.05.pdff
2. Basile, A. & Iulianelli, A. (2014). *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution* (1. izd.). Cambridge: Woodhead Publishing, Elsevier Ltd.
3. BloombergNEF. (2020). *Hydrogen Economy Outlook*. Pridobljeno 22. februarja iz <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>
4. Büyükoçkan, G., Havle, C. A. & Feyzioçglu, O. (2021). An integrated SWOT based fuzzy AHP and fuzzy MARCOS methodology for digital transformation strategy analysis in airline industry. *Journal of Air Transport Management* 97, 102142.
5. Caglayan, D. G., Heinrichs, H. U., Robinius, M. & Stolten, D. (2021). Robust design of a 100% renewable european energy supply system with hydrogen future infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 29376–29390.
6. Chen, W. M., Kim, H. & Yamaguchi, H. (2014). Renewable energy in eastern Asia: Renewable energy policy review and comparative SWOT analysis for promoting renewable energy in Japan, South Korea, and Taiwan. *Energy Policy* 74, 319–329.
7. College of the Desert (2014, 17. marec). *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Course Manual*. Pridobljeno 1. decembra 2021 iz <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/hydrogen-fuel-cell-engines-and-related-technologies-course-manual>
8. Collins, L. (2021). “Green hydrogen now cheaper to produce than grey H2 across Europe due to high fossil gas prices”. Pridobljeno 28. septembra 2022 iz

- <https://www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-now-cheaper-to-produce-than-grey-h2-across-europe-due-to-high-fossil-gas-prices/2-1-1098104>
9. Dincer, I. & Zamfirescu, C. (2016). *Sustainable Hydrogen Production* (1. izd.). Amstrdam: Elsevier Ltd.
 10. Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., David, W. L. F. & Brandon, N. P. (2008). Hydrogen and fuel Cells: Towards a Sustainable Energy Future. *Energy Policy* 36, 4356–4362.
 11. Erbach, G. & Jensen, L. (2021). EU hydrogen policy: Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy. EPRS: European Parliament.
 12. Enerdata. (2014). *Costs and Benefits to EU Member States of 2030 Climate and Energy Targets*. Pridobljeno 27. oktobra 2021 iz https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/285505/costs_benefits_eu_states_2030_climate_and_energy_targets_enerdata_report.pdf
 13. Energy Charter Secretariat. (2007). *Putting a price on energy: International pricing mechanisms for oil and gas*. Pridobljeno 1. februarja 2022 iz <https://www.energycharter.org/what-we-do/trade-and-transit/trade-and-transit-thematic-reports/putting-a-price-on-energy-international-pricing-mechanisms-for-oil-and-gas-2007/>
 14. European University Institute. (2020a). *A proposal for a Regulatory Framework for Hydrogen Guarantees of Origin*. Pridobljeno 9. novembra 2021 iz https://cadmus.eui.eu/bitstream/handle/1814/68779/PB_2020_37_FSR.pdf?sequence=1
 15. European University Institute. (2020b). *Cost-effective decarbonisation study*. Pridobljeno 9. novembra 2021 iz <https://fsr.eui.eu/wp-content/uploads/2020/11/QM-04-20-535-EN-N.pdf>
 16. European University Institute. (2020c). *Hydrogen Technology: Workshop Summary*. Pridobljeno 9. novembra 2021 iz <https://fsr.eui.eu/publications/?handle=1814/67676>
 17. European Commission. (2020a). *Hydrogen generation in Europe: Overview of costs and key benefits*. Pridobljeno 27. oktobra 2021 iz https://ec.europa.eu/energy/studies_main/final_studies/hydrogen-generation-europe-overview-costs-and-key-benefits_en
 18. European Commission. (2020b). *Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Sustainable Europe Investment Plan, European Green Deal Investment Plan*. Pridobljeno 19. februarja 2022 iz <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:21:FIN>
 19. Evropska komisija. (2019). *Sporočilo komisije Evropskemu parlamentu, svetu, Evropskemu ekonomsko-socialnemu odboru in odboru regij: Evropski zeleni dogovor*. Pridobljeno 27. oktobra 2021 iz https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0015.02/DOC_1&format=PDF
 20. Evropska komisija. (2020a). *Poročilo komisije Evropskemu parlamentu in svetu: Ocena napredka držav članic pri izpolnjevanju nacionalnih ciljev povečanja energijske učinkovitosti do leta 2020 in izvajanju Direktive 2012/27/EU o energetske učinkovitosti v skladu s členom 24(3) Direktive 2012/27/EU o energetske učinkovitosti za leto 2019*.

- Pridobljeno 27. oktobra 2021 iz <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=CELEX:52020DC0326>
21. Evropska komisija. (2020b). *Sporočilo komisije Evropskemu parlamentu, svetu, Evropskemu ekonomsko-socialnemu odboru in odboru regij: Strategija za vodik za podnebno nevtralno Evropo*. Pridobljeno 27. oktobra 2021 iz <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>
 22. Fan, J.-L., Yu, P., Li, K., Xu, M. & Zhang, X. (2022). A levelized cost of hydrogen (LCOH) comparison of coal-to-hydrogen with CCS and water electrolysis powered by renewable energy in China. *Energy*, 242, 123003.
 23. Fang, Z., Smith, R. L., Jr. & Qi, X. (2015). *Production of Hydrogen from Renewable Resources*. Dordrecht: Springer.
 24. FCH 2 JU. (2020a). *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans: Slovenia*. Pridobljeno 27. oktobra 2021 iz https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Brochure%20FCH%20Slovenia%20%28ID%209474178%29.pdf
 25. FCH 2 JU. (2020b). *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans*. Pridobljeno 19. februarja 2022 iz https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Final%20Report%20Hydrogen%20in%20NECPs%20%28ID%209501746%29.pdf
 26. FCH 2 JU. (2021a). *Chapter 2: 2021 Hydrogen supply and demand, September 2021*. Pridobljeno 19. februarja 2022 iz <https://fchobservatory.eu/sites/default/files/reports/Chapter%202%20Hydrogen%20Supply%20and%20Demand%202021.pdf>
 27. FCH 2 JU. (2021b). *Chapter 3: 2021 EU and National Policies Report, July 2021*. Pridobljeno 19. februarja 2022 iz https://fchobservatory.eu/sites/default/files/reports/Chapter_3_Policies_2021.pdf
 28. Felseghi, R.-A., Carcadea, E., Raboca, M. S., Trufin, C. N. & Filote, C. (2019). Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications. *Energies* 12, 4593.
 29. FNB Gas. (2021a). *Hydrogen network 2030: towards a climate – neutral Germany*. Pridobljeno 19. februarja 2022 iz <https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/11/FNB-Gas-Hydrogen-network-2030-towards-a-climate-neutral-Germany.pdf>
 30. FNB Gas. (2021b). *Hydrogen network 2050: towards a climate – neutral Germany*. Pridobljeno 19. februarja 2022 iz <https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/11/FNB-Gas-Hydrogen-network-2050-for-a-climate-neutral-Germany.pdf>
 31. FNB Gas. (2021c). *Gas Network Development Plan 2020 – 2030: Summary*. Pridobljeno 19. februarja 2022 iz https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/09/fnb_gas_gas_ndp_2020_en_summary.pdf#:~:text=In%20the%20Gas%20Network%20Development%20Plan%202020%E2%80%932030%2C%20the,%28EnWG%29%20and%20the%20Gas%20Network%20Access%20Regulation%20%28GasNZV%29
 32. Gupta, B. R. (2009). *Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage*. Boca Raton: CRC Press.

33. Hazzan, O., Metzuyanim, E. H., Zahav, A. E., Tal, T. & Dori, Y. J. (2018). *Application of Management Theories for STEM Education The Case of SWOT Analysis*. Cham: Springer.
34. HSE. (2022). *Slovenian Green Hydrogen and Connecting Electricity and Gas Sectors in SLOP₂G Project*. Pridobljeno 18. marca iz <https://www.hse.si/en/slovenian-green-hydrogen-and-connecting-electricity-and-gas-sectors-in-slop2g-project-en-translation/>
35. Hydrogen Europe. (2020). *Clean Hydrogen: Monitor 2020*. Pridobljeno 19. Februarja 2022 iz <https://reglobal.co/wp-content/uploads/2021/01/Clean-Hydrogen-Monitor-2020.pdf>
36. Hydrogen Europe. (2021). *Clean Hydrogen: Monitor 2021*. Pridobljeno 22. februarja 2022 iz https://www.hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/HE_CleanH2_Monitor_2021.pdf
37. HyLAW. (2019). *Horizontal position paper transport and distribution of compressed hydrogen by road quantity and pressure limitations*. Pridobljeno 21. decembra 2021 iz https://www.hylaw.eu/sites/default/files/201902/20190208%20D4.3%20H2%20Road%20Transport%20-%20Horizontal%20Position%20Paper_0.pdf
38. HyWay 27. (2021) *HyWay 27: hydrogen transmission using the existing natural gas grid? Final report for the Ministry of Economic Affairs and Climate Policy*. Pridobljeno 8. marca 2022 iz <https://www.hyway27.nl/en/latest-news/hyway-27-realisation-of-a-national-hydrogen-network>
39. IEA. (2019). *The Future of Hydrogen. Report prepared by the IEA for the G20, Japan*. Pridobljeno 2. februarja 2022 iz <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-products>
40. IAE. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. France: IEA Publications.
41. IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Pridobljeno 27. oktobra 2021 iz https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf
42. IRENA. (2018). *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency.
43. IRENA. (2019a). *Future of Wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency.
44. IRENA. (2019b). *Global energy transformation: A roadmap to 2050* (2019 edition). Abu Dabi: International Renewable Energy Agency.
45. IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
46. IRENA. (2021a). *Green hydrogen supply: A guide to policy making*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency.
47. IRENA. (2021b). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency.

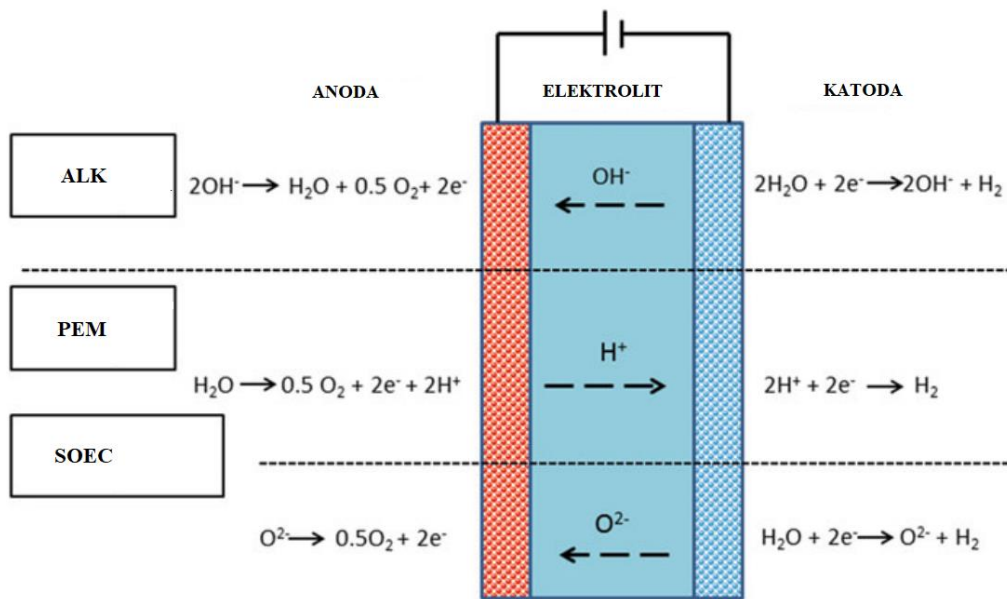
48. IRENA. (2022). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
49. Novak, P. (2021). Naslov intervjuja. *Plin*, 5(1), 4–14.
50. Jakobsen, D. & Åtland, V. (2016). *Concepts for large scale hydrogen production*. Pridobljeno 2. februarja 2020 iz <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2402554>
51. Jens, J., Wang, A., Van der Leun, K., Peters, D. & Buseman, M. (2021). *Extending the European Hydrogen Backbone: A European Hydrogen Infrastructure vision covering 21 countries, April 2021*. Netherlands: Guidehouse.
52. Jens, J., Gräf, D. & Schimmel, M. (2021). *Market state and trends in renewable and low-carbon gases in Europe: A gas Climate report, December 2021*. Netherlands: Guidehouse.
53. Kalamaras, C. M., & Efstathiou, A. M. (2013). *Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. Conference Papers in Energy*. Pridobljeno 26. oktobra 2021 iz <https://www.hindawi.com/journals/cpis/2013/690627/>
54. Khellaf, A. (2021). *Advances in Renewable Hydrogen and Other Sustainable Energy Carriers*. Algeria: Springer.
55. Lacko, R., Vidmar, M., Vindišar, J. & Pirnat, P. (2012). Energetska koalicija prihodnosti: Vodik, obnovljivi viri energije in pametna omrežja? *Eges* 2, 12–18.
56. Life Climate Path 2050. (2021). *Povzetek analize scenarijev za odločanje o Dolgoročni podnebni strategiji Slovenije do leta 2050*. Pridobljeno 16. marca 2022 iz https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.gov.si%2Fassets%2Fministrstva%2FMOP%2FDokumenti%2FPodnebnepremembe%2Fresolucija_DPSS_2050_strokovne_podlage.docx&wdOrigin=BROWS ELINK
57. Lipman, T. E. & Weber, A. Z. (2019). *Fuel Cells and Hydrogen Production A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (2. izd.). New York: Springer.
58. Othmer, K. (2001). *Encyclopedia of Chemical Technology: Fundamentals and Use of Hydrogen as a Fuel* (4. izd.). New York: Wiley.
59. Peters, A., Van Der Leun, K., Terlouw, W., Van Tilburg, J., Berg, T., Schummel, M., Van Der Hoorn, I., Buseman, M., Staats, M., Schenkel, M. & Ur Rehman Mir, G. (2020). *Gas Decarbonisation Pathways 2020–2050: Gas for Climate*. Guidehouse.
60. Peters, M. S. & Timmerhaus, K. D. (2006). *Plant design and economics for chemical engineers* (4. izd.). Boston: McGraw-Hill.
61. Piebalgs, A., Jones, C., Reis, C. P., Soroush, G. & Glachant, J.-M. (2020). *Cost-effective decarbonisation study*. Italy: European University Institute.
62. PNEC. (2019). *Portugal's Final Integrated National Energy and Climate Plan 2021–2030*. Pridobljeno 15. februarja 2022 iz <http://www.dgeg.gov.pt/?cr=17308>
63. Qaiser, I. (2021). A comparison of renewable and sustainable energy sector of the South Asian countries: An application of SWOT methodology. *Renewable Energy* 181, 417–425.

64. Ramsden, T., Steward, D. & Zuboy, J. (2009). *Analyzing the Levelized Cost of Centralized and Distributed Hydrogen Production Using the H2A Production Model. Version 2. Technical Report*. Pridobljeno 27. oktobra 2021 iz <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/46267.pdf>
65. Sankir, M. & Sankir, N. D. (2017). *Hydrogen Production Technologies*. Hoboken: Scrivener Publishing.
66. Scipioni, A., Manzardo, A. & Ren, J. (2017). *Hydrogen Economy: Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition for Sustainability*. London: Elsevier.
67. Silveira, L. J. (2017). *Sustainable Hydrogen Production Processes: Energy, Economic and Ecological Issues*. Switzerland: Springer.
68. Southard, M. Z. & Green, D. W. (2019). *Perry's chemical engineers' handbook* (9. izd.). McGraw – Hill Education.
69. Svet Evropske unije. (2020). *Towards a hydrogen market for Europe: Council adopts conclusions*. Pridobljeno 8. marca 2022 iz <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2020/12/11/towards-a-hydrogen-market-for-europe-council-adopts-conclusions/>
70. Svet Evropske unije. (2021). *Sveženj "Pripravljeni na 55"*. Pridobljeno 22. februarja 2022 iz <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-13977-2021-INIT/sl/pdf>
71. SURS. (2021). *Energetska statistika, Slovenija, 2020*. Pridobljeno 21. marca iz <https://www.stat.si/StatWeb/news/Index/9884>
72. U. S. Department of Energy. (2020a). Department of Energy: *Hydrogen Program Plan*. Pridobljeno 26. oktobra 2021 iz <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>
73. Towler, G. & Sinnott, R. (2013). *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design* (2 ed.). Oxford: Elsevier.
74. Ulrich, D., G. & Vasudevan T. P. (2004). *Chemical engineering process design and economics: a practical guide* (2. izd.). Process Pub.
75. Vartianen, E., Breyer, C., Moser, D., Medina, E. R., Busto, C., Masson, G. & Jäger-Waldau, A. (2021). *True cost of Solar Hydrogen*. Solar RRL.
76. Vartianen, E., Masson, G., Breyer, C., Moser, D. & Román Medina, E. (2019). Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 28, 439–453.
77. Vlada Republike Slovenije. (2020). Celovit nacionalni energetska in podnebni načrt Republike Slovenije. Pridobljeno 16. marca 2022 iz https://www.energetika-portal.si/fileadmin/dokumenti/publikacije/nepn/dokumenti/nepn_5.0_final_feb-2020.pdf
78. Wang, A., Jens, J., Mavis, D., Moultak, M., Schimmel, M., Van der Leun, K., Peters, D. & Buseman, M. (2021). *Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen: European Hydrogen backbone*. Netherlands: Guidehouse
79. Wessel, H. E. (1952). New graph correlates operating labor data for chemical processes. *Chemical Engineering Journal*, 59, 209–210.

80. Yu, M., Wang, K. & Vredenburg, H. (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41), 21261–21273.

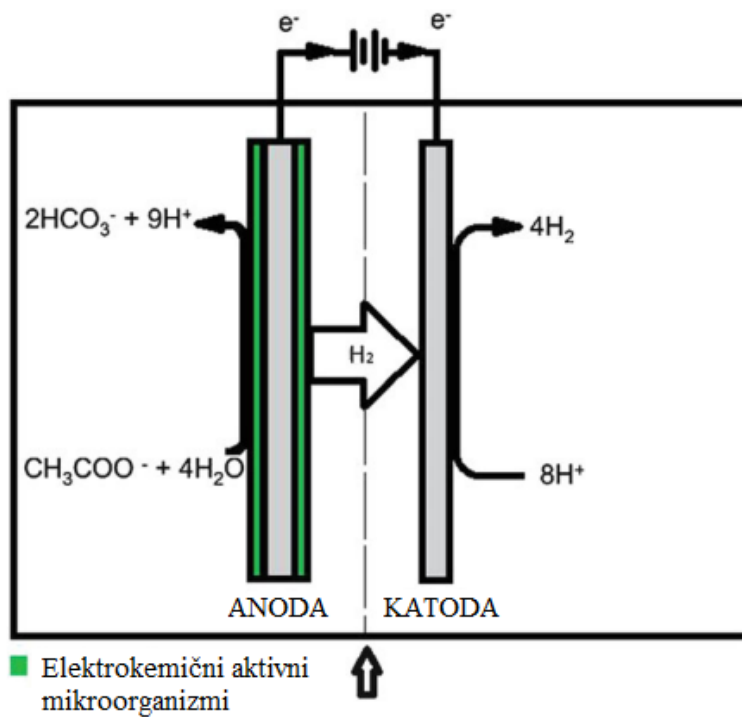
PRILOGE

Priloga 1: Klasifikacija elektrolize vode



Prirejeno po Fang, Smith & Qi (2015).

Priloga 2: Prikaz biokatalizirane elektrolize



Varovalna membrana

Prirjeno po Silveira (2017).

Priloga 3: Investicijski stroški modrega vodika

Metoda pridobivanja vodika	Leto	Investicijski stroški (mio EUR 2019/MW H ₂)	VIR
MODRI VODIK – metoda SMR s CCS	2020	0,701	Jakobsen & Atland (2016)
MODRI VODIK – nova metoda SMR s CCS	2020	1,650	Jakobsen & Atland (2016)
	2020	0,963	ASSET (2018)
	2020	1,594	IEA (2019)
	2030	0,909	ASSET (2018)
	2030	1,290	IEA (2019)
	2050	0,856	ASSET (2018)
	2050	1,214	IEA (2019)
MODRI VODIK – metoda ATR s CCS	2020	0,688	Jakobsen & Atland (2016)
MODRI VODIK – nova metoda ATR s CCS	2020	1,498	Jakobsen & Atland (2016)

Priloga 4: Investicijski stroški zelenega vodika

Metoda pridobivanja vodika	Leto	Investicijski stroški (mio EUR 2019/MW H₂)	VIR
ZELENI VODIK – ALK	2020	1,955	IAE (2019)
	2020	1,395	IRENA (2018)
	2020	2,837	Schmid (2017)
	2030	1,151	IAE (2019)
	2030	0,700	IRENA (2018)
	2030	1,531	Schmid (2017)
	2050	0,880	IAE (2019)
ZELENI VODIK – PEM	2020	2,828	IAE (2019)
	2020	1,997	IRENA (2018)
	2020	3,596	Schmid (2017)
	2030	2,095	IAE (2019)
	2030	1,037	IRENA (2018)
	2030	2,739	Schmid (2017)
ZELENI VODIK – SOEC	2020	6,658	IAE (2019)
	2020	3,664	Schmid (2017)
	2030	3,199	IAE (2019)
	2030	3,331	Schmid (2017)
	2050	1,143	IAE (2019)

Priloga 5: Investicijski stroški obnovljivih virov električne energije

Tehnologija obnovljivih virov električne energije	Leto	Investicijski stroški (mio EUR 2019/MW)	VIR
SONČNA ELEKTRARNA	2020	0,431	Vartiainen, Masson, Breyer, Moser, & Roman Medina (2019)
	2030	0,275	Vartiainen, Masson, Breyer, Moser, & Roman Medina (2019)
	2050	0,164	Vartiainen, Masson, Breyer, Moser, & Roman Medina (2019)
VETRNA ELEKTRARNA NA KOPNEM	2020	1,317	IRENA (2019a)
	2030	1,188	IRENA (2019a)
	2050	0,880	IRENA (2019a)
VETRNA ELEKTRARNA NA MORJU – PRITERJENA NA DNO	2020	3,830	IRENA (2019a)
	2030	2,815	IRENA (2019a)
	2050	2,464	IRENA (2019a)
VETRNA ELEKTRARNA NA MORJU – PLAVAJOČA (ZASIDRANA)	2020	5,000	PNEC (2019)
	2030	3,051	PNEC (2019)
	2040	2,695	PNEC (2019)

Priloga 6: Podrobna SWOT-analiza trga vodika v Evropski uniji

PREDNOSTI
<p>P₁: Koristi za ohranjanje okolja</p> <ul style="list-style-type: none">- doseči ogljično nevtralnost do leta 2050;- zmanjšati TGP za vsaj 55 % do leta 2030;- vodik lahko nadomesti uporabo fosilnih goriv v prometnem, industrijskem in stavbnem sektorju.
<p>P₂: Raznovrstnost pri uporabi virov</p> <ul style="list-style-type: none">- proizveden iz različnih virov (zemeljski plin, premog, nafta in OVE);- v letu 2019 je bilo v EU proizvedenih 12,1 milijona ton vodika;- v letu 2020 je bilo v EU iz OVE 22,1 % končne bruto porabe energije;- do leta 2030 je EU napovedala produkcijsko zmogljivost zelenega vodika na 50 GW.
<p>P₃: Tehnološke prednosti</p> <ul style="list-style-type: none">- vodik vsebuje več energije na enoto mase kot zemeljski plin in bencin;- v primerjavi s fosilnimi gorivi lahko vodik izgube med stopnjami prenosa energije kopiči in znova uporabi;- vodik, proizveden iz OVE, ne proizvaja neposrednega izpusta TGP;- vodik je lahko zaradi molekularne lastnosti uporabljen z drugimi elementi, kot sta ogljik in dušik;- vodik je praktičen za shranjevanje in omogoča občasno vključevanje OVE v energetski sistem;- vodik ima veliko zmogljivost shranjevanja;- vodik se lahko prenaša po trenutnih plinovodih, ki so namenjeni za prenos zemeljskega plina.
SLABOSTI
<p>S₁: Visoki stroški</p> <ul style="list-style-type: none">- zmanjšanje stroškov proizvodnje in integracije vodika v prihodnosti;- trenutni investicijski stroški sivega in modrega vodika so v primerjavi z zelenim vodikom nižji, vendar imajo velik izpust TGP;- skupni stroški zelenega vodika letno dosežejo od 10 do 33 milijard evrov;- ocenjuje se, da bo v prihodnjih letih zeleni vodik konkuriral modremu vodikom in v daljni prihodnosti tudi ostalim fosilnim gorivom;- poleg proizvodnih stroškov velik delež stroškov vodika predstavljata infrastruktura in pomanjkanje transportne logistike.
<p>S₂: Nezadostna infrastruktura</p> <ul style="list-style-type: none">- trenutno vodikova infrastruktura še vedno ni zadostna;- vodik se v sedanjem času proizvaja in distribuira lokalno, kar v prihodnosti za zmanjševanje stroškov potrebuje ekonomijo obsega;- strošek verige se bo v različnih članicah EU razlikoval zaradi konkurenčnosti;- v prihodnosti vzpostavitev infrastrukture cevovodov in oskrbovalnih omrežij zahteva visoke investicijske stroške;- investicija izgradnje EHB naj bi do leta 2040 zajemala od 43 do 81 milijard evrov; za vklopitev vozil na vodikove gorivne celice v prihodnosti zahteva izgradnjo zadostnega omrežja polnilnih postaj.

PRILOŽNOSTI

P₁: Družbenoekonomske priložnosti

- zeleni vodik bo v prihodnosti dobil večjo težo kot sivi in modri vodik;
- kumulativne investicije za proizvodnjo zelenega vodika bodo do leta 2030 znašale od 70 do 249 milijard evrov. Naložbe bodo v EU izboljšale domače gospodarstvo;
- v vodikovem sektorju se bo do leta 2030 v EU zaposlilo od 104.060 do 357.630 delavcev;
- treba je izničiti še 1,5 gigatona emisij CO₂ (cilj za leto 2030);
- vodik bo pripomogel k zmanjšanju od 20 do 67 megatonov emisij CO₂;
- v prihodnosti so priložnosti za izboljšavo naložbenih stroškov in učinkovitosti pretvorbe.

P₂: Uporabnost vodika

- potencial električne energije iz OVE;
- izgradnja dodatnih namenskih elektrarn iz OVE za pretvorbo vodika z metodo elektrolize;
- vodik pripomore k prožnosti energetskega sistema;
- vzpostavitev vodikovih cevovodov, ki prinašajo do desetkrat nižje stroške prenosa kot pri ostalih vrstah prenosa vodika;
- sezonsko skladiščenje vodika v solnih jamah in izčrpanih plinskih poljih;
- svetovni trg vodika za uvoz in izvoz;
- vpeljava vodika v razogljčenje industrijskih procesov, ki jih je težko elektrificirati;
- neposredna vpeljava vodika v proizvodno industrijo (predvsem jeklo), transportni sektor in stavbno ogrevanje.

P₃: Razvojne možnosti

- raziskave in razvoj so ključne pri zmanjšanju stroškov vpeljave vodika;
- učinkovitost proizvodnje, prenosa in aplikacije;
- ukrepi vlade so v prihodnjih letih ključni pri vpeljavi zasebnega kapitala v raziskave in razvoj;
- javno financiranje inovativnih in demonstracijskih projektov;
- države članice EU v svojih programih za energetske učinkovitost navajajo, da so raziskave in razvoj vodikove tehnologije ključne pri vpeljavi vodika v trg EU;
- v prihodnosti se bodo stroški elektrolizerjev in OVE zmanjšali.

NEVARNOSTI

N₁: Konkurenčnost drugih obnovljivih virov

- vodikov konkurent je električna energija, proizvedena iz OVE;
- vodik ima trenutno v primerjavi z električno energijo manjšo energetske učinkovitost in večje proizvodne stroške;
- življenjski cikel vodika se razlikuje zaradi različnih načinov proizvodnje (sivi, modri in zeleni vodik).

N₃: Tehnološka negotovost

- vodikova tehnološka negotovost lahko v prihodnosti prinese težave pri vpeljavi vodika na trg EU zaradi konkurence drugih goriv in električne energije, pridobljene iz OVE;
- pomemben delež reševanja vodika v prihodnosti bo v reševanju tehnoloških negotovosti v proizvodnji, prenosu in aplikaciji vodika;
- izzive predstavljajo obetavne aplikacije vodika, ki bodo v prihodnosti morale doseči zrelost in konkurenčnost na trgu.

N₃: Ekonomska nestabilnost

- nestabilnost vodikovega trga lahko vodi do nastanka monopolnih dobaviteljev;
- tveganja v dobavni verigi, naložbena tveganja, tržna negotovost in čezmejne razlike v okoljskih predpisih prinašajo tveganja trga vodika v EU;
- vzpostavitev posrednikov za zmanjšanje zgoraj naštetih tveganj;
- trenutno še vedno velik trg fosilnih goriv v EU.

N₄: Tveganje pri uvajanju vodika

- omejeno uvajanje vodika zaradi trenutnih predpisov in standardov;
- potrebna je izboljšava predpisov, da bo v prihodnjih letih vodik izkoristil svoj potencial;
- izboljšava pomembnih standardov je potrebna pri polnjenju vozil na vodik, sestavi plina za čezmejno prodajo, varnostnih ukrepih in okoljskem vplivu življenjskega cikla vodika;
- tveganja pri industrijski dinamiki dobave in distribuciji;
- tveganje neodobravanja javnosti pri vpeljavi nove tehnologije vodika.