



Šolski center Celje

Srednja šola za strojništvo, mehatroniko in medije

ANALIZA TEHNOLOGIJ PRIDOBIVANJA VODIKA IN NJEGOVE HRAMBE V POLNILNICI

Raziskovalna naloga

Področje: strojništvo

Avtorji:

Maj Črešnar

Andraž Grat

David Pšeničnik

Mentorji:

Igor Grofelnik, mag. inž. log

Gašper Grat, dipl.inž.str.

Aleš Ferlež, mag.inž.energ.

Mestna občina Celje, Mladi za Celje

Celje, 2021

IZJAVA

Mentorji Igor Grofelnik, Gašper Grat in Aleš Ferlež v skladu z 20. členom Pravilnika o organizaciji mladinske raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, zagotavljamo, da je v raziskovalni nalogi z naslovom Analiza tehnologij pridobivanja vodika in njegove hrambe v polnilnici, katere avtorji so Maj Črešnar, Andraž Grat in David Pšeničnik:

- besedilo v tiskani in elektronski obliki istovetno,
- pri raziskovanju uporabljeno gradivo navedeno v seznamu uporabljene literature,
- da je za objavo fotografij v nalogi pridobljeno avtorjevo dovoljenje in je hranjeno v šolskem arhivu,
- da sme Osrednja knjižnica Celje objaviti raziskovalno nalogo v polnem besedilu na knjižničnih portalih z navedbo, da je raziskovalna naloga nastala v okviru projekta Mladi za Celje,
- da je raziskovalno nalogo dovoljeno uporabiti za izobraževalne in raziskovalne namene s povzemanjem misli, idej, konceptov oziroma besedil iz naloge ob upoštevanju avtorstva in korektnem citiranju,
- da smo seznanjeni z razpisni pogoji projekta Mladi za Celje.

Celje, _____

žig šole

Podpis mentorja

Podpis odgovorne osebe

*

POJASNILO

V skladu z 20. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje je potrebno podpisano izjavo mentorja (-ice) in odgovorne osebe šole vključiti v izvod za knjižnico, dovoljenje za objavo avtorja (-ice) fotografskega gradiva, katerega ni avtor (-ica) raziskovalne naloge, pa hrani šola v svojem arhivu.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se našim mentorjem g. Igorju Grofelniku, mag. inž. log, g. Gašperju Gratu, dipl. inž. str. in g. Alešu Ferležu, mag. inž. energ. za pomoč, strokovne nasvete in usmerjanje pri izdelavi raziskovalne naloge. Hkrati se zahvaljujemo vodstvu Fakultete za logistiko Univerze v Mariboru, ki nam je omogočila dostop do strokovnih baz podatkov, ki so predstavljali podlago za izdelavo raziskovalne naloge. Na koncu bi se zahvalili še ge. Damjani Hohler, prof. za pregled in lektoriranje naloge.

ANALIZA TEHNOLOGIJ PRIDOBIVANJA VODIKA IN NJEGOVE HRAMBE V POLNILNICI

POVZETEK

Danes bi lahko s pomočjo obnovljivih virov energije oskrbovali in nadomestili porabo električne energije v dveh tretjinah svetovnega povpraševanja. Uporaba sodobnih zelenih tehnologij prispeva k zmanjšanju toplogrednih plinov, hkrati pa je v bližnji prihodnosti potrebno drastično zmanjšati trenutno porabo fosilnih goriv. Na področju razvoja novih tehnologij lahko v prihodnosti pričakujemo spremembe tudi na področju proizvodnje energije. Vodik predstavlja eno bolj obetavnih in zanimivih rešitev. Poudariti je potrebno, da zanimanje za proučevanje sodobnih vodikovih tehnologij narašča, večja pa se tudi zanimanje po uporabi vodikovih tehnologij v transportu, saj postaja uporaba le-tega tudi ekonomsko sprejemljiva. Vodik predstavlja tudi dobro rešitev v povezavi s sezonsko proizvodnjo električne energije z obnovljivimi viri, saj lahko proizvedeno energijo pretvorimo v plin, ga skladiščimo in uporabimo kasneje, ko se poveča potreba po energiji na trgu odjemalcev. S pomočjo sistematičnega pregleda znanstvene literature smo ugotavljali trenutno stopnjo razvoja tehnologij na področju skladiščenja, proizvodnje in distribucije vodika. Prav tako smo ugotavljali trend razvoja in širjenja infrastrukture, ki bo v prihodnosti močno povezana z uporabo vodika za namene transporta. Ugotavljali smo tudi trenutne značilnosti tehnologij namenjenih skladiščenju vodika, saj zanesljivost vodikove infrastrukture predstavlja nujni pogoj za javno sprejetje in širšo implementacijo.

Ključne besede: vodik, vodikove tehnologije, transport, skladiščenje

ANALYSIS OF HYDROGEN PRODUCTION TECHNOLOGIES AND ITS STORAGE IN THE FILLING STATION

SUMMARY

Today, renewable energy sources could supply and replace electricity consumption in two-thirds of global demand. The use of modern green technologies contributes to the reduction of greenhouse gases, and at the same time it is necessary to drastically reduce the current consumption of fossil fuels in the near future. In the field of development of new technologies, we can expect changes in the field of energy production in the future. Hydrogen represents one of the more promising and interesting solutions. It should be emphasized that the interest in the study of modern hydrogen technologies is growing, but also the interest in the use of hydrogen technologies in transport is increasing, as the use of it is also becoming economically acceptable. Hydrogen is also a good solution in connection with the seasonal production of electricity from renewable sources, as the energy produced can be converted into gas, stored and used later when the energy demand in the customer market increases. With the help of a systematic review of the scientific literature, we determined the current level of development of technologies in the field of storage, production and distribution of hydrogen. We also noted the trend of development and expansion of infrastructure, which in the future will be strongly associated with the use of hydrogen for transport purposes. We also determined the current characteristics of technologies intended for hydrogen storage, as the reliability of the hydrogen infrastructure is a necessary condition for public acceptance and wider implementation.

Key words: hydrogen, hydrogen technologies, transport, storage

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	PRIHODNOST VODIKOVIH TEHNOLOGIJ	3
1.2	VODIK	7
1.3	VPLIV VODIKA	8
1.3.1	Kako bo vodik v prihodnosti vplival na trg.....	8
1.3.2	Vpliv vodika na zmanjševanje ali povečevanje toplogrednih plinov	9
1.3.2.1	Vpliv vodika na zmanjšanje toplogrednih plinov	9
1.3.2.2	Vpliv vodika na povečanje toplogrednih plinov in ostalih emisij	10
1.3.2.2.1	Emisije, ki nastanejo še pred postopkom pridobivanja vodika (nastanejo predvsem pri pridobivanju in predelavi vhodnega goriva).....	10
1.3.2.2.2	Emisije, ki nastanejo pri proizvodnji vodika	13
1.3.2.2.3	Emisije, ki nastanejo pri transportu vodika	18
1.3.2.2.4	Emisije pri končnih porabnikih vodika	20
1.3.2.2.5	Uhajanje vodika v atmosfero.....	20
1.3.3	Energetska mešanica	22
1.3.3.1	Konvencionalna energetska mešanica	25
1.3.3.2	Energetska mešanica glede na stohastični model energetskega planiranja.....	25
1.3.3.3	Optimalna energijska mešanica	26
1.3.3.4	Radikalne rešitve	28
1.4	UPORABA VODIKA	29
1.4.1	Načini pridobivanja vodika	30
1.4.1.1	Reformiranje metana s paro (SMR):	30
1.4.1.2	Elektroliza	30
1.4.1.3	Proizvodna vodika s sončno energijo	31
1.4.1.4	Proizvodnja vodika s pomočjo veterne energije	31
1.4.1.5	Foto-biološka proizvodnja vodika	31
1.4.1.6	Mešana kislinska fermentacija	32

1.4.1.7	Bakterijska fotofermentacija	32
1.4.2	Stroški proizvodnje vodika (decentralizirani, centrirani)	33
1.5	TRANSPORT V POVEZAVI Z VODIKOM.....	33
1.5.1	Obstoječe stanje cestnega transporta.....	33
1.5.2	Vodik in gorivne celice v povezavi cestnim transportom	34
1.5.2.1	Uporaba vodika v osebnih avtomobilih.....	34
1.5.2.2	Uporaba vodika v avtobusnem prevozu oseb	36
1.5.3	Železniški promet.....	36
1.5.4	Vodni promet	37
1.5.5	Letalski promet	38
1.5.6	Druge transportne tehnologije – viličarji.....	39
1.6	ENERGETIKA IN INDUSTRIJA	40
1.6.1	Ogrevanje gospodinjstev	40
1.6.2	Toplota in električna energija za potrebe industrije	43
1.6.2.1	Toplota v industriji	43
1.6.2.2	Turbine za proizvodnjo električne energije	44
1.6.2.3	Generatorji za rezervno proizvodnjo električne energije.....	46
1.6.3	Vodik kot industrijska surovina	48
1.6.3.1	Obstoječe industrije, ki uporabljajo vodik kot surovino	48
1.6.3.1.1	Proizvodnja in rafiniranje amonijaka	48
1.6.3.1.2	Proizvodnja metanola.....	50
1.6.4	Nove rešitve pri uporabi vodika.....	51
1.6.4.1	Proizvodnja nizkoogljičnega jekla.....	51
1.6.5	Gorivne celice v mirujočem sektorju (ogrevanje in industrija).....	52
1.6.5.1	Gorivne celice za ogrevanje	52
1.6.5.1.1	PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell (membranska gorivna celica s protonsko izmenjavo).....	52
1.6.5.1.2	SOFC – Solid Oksid Fuel Cell (trdna oksidna gorivna celica).....	52
1.6.5.1.3	MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell (gorivna celica s staljenim karbonatom)	53
1.6.5.1.4	PAFC – Phosphoric Acid Fuel cell (gorivna celica s fosforno kislino).....	53

1.6.5.2	Globalna uporaba gorivnih celic za sproizvodnjo energije in toplote	53
1.6.6	Ostale vodikove ogrevalne tehnologije	55
1.7	RAZISKAVE IN RAZVOJ V EU	56
1.7.1	Tehnična vprašanja, ki še potrebujejo rešitve.....	56
1.7.1.1	Napredek konkurenčnih tehnologij v prihodnjih letih	57
1.7.1.1.1	Biodiesel.....	57
1.7.1.1.2	Biološki etanol	57
1.7.1.1.3	Koruzni butan.....	57
1.7.1.1.4	Bio-olje.....	58
1.7.1.2	Prihodnost goriv za motorje z notranjim izgorevanjem.....	58
1.7.1.3	Mikro-plinske turbine (Micro Gas Turbine – mGT)	58
2	METODOLOGIJA.....	59
3	REZULTATI	61
4	RAZISKOVALNI TRENDI PRI RAZISKOVANJU VPLIVA VODIKA IN VODIKOVIH TEHNOLOGIJ.....	85
4.1	Preverjanje raziskovalnih vprašanj	89
5	ZAKLJUČEK	96
6	BIBLIOGRAFIJA	98

KAZALO SLIK

Slika 1:Trend uporabe energentov do leta 2018	4
Slika 2: Emisije CO2 pri uporabi energentov iz fosilnih goriv do leta 2018	4
Slika 3:Stopnje uhajanja plina iz cevovodov pri različnih mešanicah vodika v zemeljskem plinu	19
Slika 4:Popis energetskih rešitev za sedanjost in prihodnost. Elipse v ravni obliki so nedimenzionalne propagandne časovne premice	22
Slika 5:Razlike v svetovnih trendih držav OECD in držav, ki niso članice OECD, se pojavljajo v (a) rasti primarne porabe energije, (b) rasti prebivalstva in (c) rasti BDP	23
Slika 6: Energetske mešanice v preteklosti in možni nadaljnji scenarij za 3. tisočletje (na podlagi modelov IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis	23
Slika 7: Konvencionalna energetska mešanica, načrtovana brez upoštevanja negotovosti prihodnjih potreb	25
Slika 8:Energetska mešanica glede na stohastični model energetskega planiranja.....	25
Slika 9:Spremenljivost energentov glede na napovedi prihodnjega povpraševanja	26
Slika 10: Optimalna energetska mešanica z ali brez jedrske energije.....	26
Slika 11: Porazdelitev vseh stroškov (z ali brez jedrske tehnologije) upoštevajoč negotovost prihodnjega povpraševanja po energiji.....	27
Slika 12: Porazdelitev emisij CO2 (z ali brez jedrske tehnologije) upoštevajoč negotovost prihodnjega povpraševanja po energiji.....	27
Slika 13: Načini pridobivanja vodika	29
Slika 14: Primerjava med različnimi postopki pridobivanja vodika na osnovi emisij, učinkovitostjo ter stroški	32
Slika 15: Struktura stroškov (\$/leto) za ogrevanje gospodinjstev v letu 2030 (predpostavka energetske porabe 10 MWh/leto)	41
Slika 16: Izenačitev stroškov vodikovih kotlov v primerjavi z drugimi alternativnimi načini ogrevanja v odvisnosti od cene vodika.....	41
Slika 17: Stroškovna konkurenčnost vodikovih celic za SPTE z ostalimi zelenimi alternativami	43
Slika 18: Stroškovna konkurenčnost vodika na dveh primerih potrebe po proizvodnji toplote	44
Slika 19: Primerjava stroškov med proizvodnjo električne energije iz vodika in zemeljskega plina	46
Slika 20: Krivulja stroškov amonijaka.....	50
Slika 21: Skupno število mikro-SPTE sistemov na gorivne celice v treh glavnih regijah, kar kaže na zgodovinsko rast (polne črte) in kratkoročne projekcije (pikčaste črte)	54

KAZALO TABEL

Tabela 1: Emisije pri pridobivanju zemeljskega plina	11
Tabela 2: Emisije pri pridobivanju biomase namenjene za pridobivanje vodika z uplinjanjem	12
Tabela 3: Emisije toplogrednih plinov pri proizvodnji premoga	13
Tabela 4: Emisije proizvodnje vodika iz elektrike, pridobljene iz vetrne energije, vključujoč izdelavo in delovanje vetrnih turbin in procesa elektrolize	14
Tabela 5: Emisije pri proizvodnji vodika z elektrolizo ob uporabi elektrike iz solarne energije oziroma iz omrežja	14
Tabela 6: Zbirna tabela o emisijah pri proizvodnji vodika s parno preobrazbo metana (v mg/kWh H ₂)	15
Tabela 7: Emisije pri proizvodnji vodika z uplinjanjem premoga	16
Tabela 8: Emisije toplogrednih plinov zaradi uplinjanja premoga brez zajema in shranjevanja ogljika (CCS) v kg / MWh električne moči (Skone in ostali, 2012)	16
Tabela 9: Ostale emisije, ki onesnažujejo zrak iz uplinjanja premoga brez zajema in shranjevanja ogljika (CCS) v kg / MWh (Skone in ostali, 2012)	17
Tabela 10: Emisije toplogrednih plinov zaradi uplinjanja premoga z zajemom in shranjevanjem ogljika (CCS) v kg / MWh električne moči (Skone in ostali, 2012)	17
Tabela 11: Ostale emisije, ki onesnažujejo zrak iz uplinjanja premoga z zajemom in shranjevanjem ogljika (CCS) v kg / MWh električne moči. (Skone in ostali, 2012)	17
Tabela 12: Povzetek emisij iz proizvodnje vodika pri uplinjanju biomase brez zajema in shranjevanja ogljika (CCS). V vseh primerih je surovina lesena biomasa, razen Ramsdena, ki povzema koruzno biomaso	18
Tabela 13: Raziskovalni protokol	59
Tabela 14: Pregled literature	68
Tabela 15: Glavna razvojna usmeritev	85

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Avtorji z največ prispevki	61
Graf 2: Ustanove z največ znanstvenimi raziskavam s področja vodika	61
Graf 3: Število znanstvenih prispevkov glede na državo med letom 1978 in 2020 v EU	62
Graf 4: Dokumenti s strani sponzorja financiranja	62
Graf 5: Dokumenti glede na raziskovalna področja	63
Graf 6: Izdani znanstveni prispevki med letoma 2005 in 2020	64
Graf 7: Povezanost držav glede na citiranje in povzemanje literature - globalno	64
Graf 8: Povezanost ključnih raziskovalnih besed in področij	66

UPORABLJENE KRATICE IN SIMBOLI

AEM	Akaline Anion Exchange Membrane – alkalna anionska izmenjevalna membrana
AWE	Alkaline Water Electrolysis – alkalna vodna elektroliza
BEV	Electric Battery Vehicle – Električno vozilo na baterije
CCGT	Combine Cycle Gas Turbine – plinskima turbina s kombiniranim ciklom
CCS	Carbon Capture and Storage – zajem ogljika in njegovo shranjevanje
CCU	Carbon Capture and Utilisation – zajem in uporaba ogljika
CH ₄	Metan
CO ₂	Ogljikov dioksid
DECC	Department of Energy and Climate Change – Oddelek za energijo in klimatske spremembe
EC	European Commission; Evropska komisija
FCEV	Fuel cell Electric Vehicle - električno vozilo na gorivne celice
FCV	Fuel Cell Vehicle – vozilo na gorivne celice
GWP	Global Warming Potential – potencial globalnega segrevanja
H ₂	Vodik
H2-DRI	H2 Direct Reduction Iron – Postopek neposrednega zmanjšanja ogljika v jeklu na osnovi vodika
H ₂ O	Voda
HyCi	Hydrogen Civilization – vodikova civilizacija
IAHE	International Association for Hydrogen Energy – Mednarodno združenje za vodikovo energijo
ICE	Internal Combustion Engine – vozilo z motorjem z notranjim izgorevanjem
IEA	International Energy Agency – Mednarodna agencija za energijo
IFR	Integral Fast Reactor; Hitri integralni reaktor

IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle – kombinirani cikel uplinjevanja
IMO	International Maritime Organisation – Mednarodna pomorska organizacija
LCA	Life Cycle Assessment – analiza življenjskega cikla
LH2	Liquid Hydrogen (tekoči vodik)
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier (tekoči organski nosilec vodika)
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell – gorivna celica s staljenim karbonatom
MEC	Micro Electrolysis Cells – mikro-celice za elektrolizo
mGT	Micro Gas Turbine – mikro plinska turbina
MMBtu	Milion British Thermal Units – milijon britanskih termalnih enot
MSR	Molten Salt Reactor – reaktor za staljeno sol
MWh	megavatna ura
NO _x	Dušikovi oksidi
O ₂	Kisik
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development – Organizacija za gospodarsko sodelovanje in razvoj
P2G	Power to Gas – energija za plin
PAFC	Phosphoric Acid Fuel cell – gorivna celica s fosforno kislino
PEM	Proton Exchange Membrane – izmenjava protonov skozi membrano
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell – membranska gorivna celica s protonsko izmenjavo
SOE	Solid Oxide Electrolysis – elektroliza vode v trdnem oksidu
SOFC	Solid Oksid Fuel Cell – trdna oksidna gorivna celica
SO _x	Žveplovi oksidi
SPTE	Soproizvodnja toplote in električne energije
UHC	Unburned HydroCarbons – neizgoreli ogljikovodiki
UN	United Nations – Združeni narodi

UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation – Organizacija Združenih narodov za izobraževanje, znanost in kulturo
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization – Organizacija Združenih narodov za industrijski razvoj
WHO	World Health organisation – Svetovna zdravstvena organizacija

1 UVOD

Rast svetovnega gospodarstva in prebivalstva je močno povezana s stalnim povečevanjem povpraševanja po primarni energiji. Rast njene porabe predstavlja še dodatno obremenitev okolja z CO₂ (Abdin & Merida, 2019). Planet je z vidika globalnega segrevanja že preveč onesnažen, pri čemer uporaba fosilnih goriv dramatično prispeva k onesnaženosti okolja z žveplovimi oksidi (SO_x), dušikovimi oksidi (NO_x) in drugimi delci (Chu, Cui, & Liu, 2016).

Temeljni pristop k razogličanju planeta in zmanjšanju njegove onesnaženosti je razširitev uporabe obnovljivih virov energije, ki naj bi do leta 2050 zagotovila 60 % končne porabe energije in 80 % proizvodnje električne energije. S tem bi zelo zmanjšali zdajšnjo uporabo fosilnih goriv ter zmanjšali tudi onesnaževanje s toplogrednimi plini. V ta namen bo v bližnji prihodnosti potrebno urediti in prilagoditi politiko ter zakonske okvire, da se bodo osredotočili na porast obnovljivih virov energije (Gielen, in drugi, 2019).

Z vidika razvoja sedanjih tehnologij lahko v prihodnosti pričakujemo korenite spremembe na področju proizvodnje energije. Cilj je spremeniti sedanjo energetska oskrbo, da bo ta okolju bolj prijazna in bo pripomogla k preprečevanju podnebnih sprememb. Pojavila se je potreba po novi alternativni usmeritvi, ki bo združevala čistejše vire energije, čistejše tehnologije in ustrezne politike. Pomembni je tako energijska intenzivnost na eni strani, kot je pomembna učinkovita izraba energije na strani končnih uporabnikov. Prav tako je izjemnega pomena tudi povečevanje prilagodljivosti oskrbe z energijo (Riahi, in drugi, 2012).

Globalno pot do zagotovitve varne oskrbe z energijo je potrebno nadaljevati in doseči takšno rešitev za oskrbo z energijo, ki bo zagotavljala svetovno ekonomsko blaginjo (Edwards, Kuznetsov, David, & Brandon, 2008).

Vse več pozornosti bo potrebno nameniti transportu, saj le-ta zaradi povečevanja potreb človeštva čedalje bolj narašča. Trenutno število vozil se bo do leta 2050 predvidoma potrojilo, kar bo še bolj obremenjevalo okolje z ogljikovimi emisijami. Sicer se pričakuje, da bo mnogo držav in mest zaradi negativnih posledic na okolje uvajalo prepovedi uporabe motorjev z notranjim izgorevanjem. Veliko mest že ima uveljavljeno politiko, ki podpira alternativne oblike transporta in brezplačen potniški promet. Na splošno je v prihodnosti pričakovana zmanjšana uporaba klasičnih konvencionalnih avtomobilov. Napovedi predvidevajo dramatično zmanjšanje trgovanja z gorivi za osebna prevozna sredstva. Velik delež trenutnih klasičnih voženj pa bodo zamenjala vozila na električni pogon (Samsatli & Samsatli, The role

of renewable hydrogen and interseasonal storage in the carbonising heat - comprehensive optimisation for future renewable energy value chains, 2019).

Poleg vozil, ki temeljijo na biogorivih, in električnih vozil, vozila na vodik predstavljajo enega izmed treh glavnih zamenjav za nizko-ogljčni transport. Prav tako so vodikove tehnologije primernejše od trenutnih dolgoročnih tehnologij za polnjenje električnih baterij (Hobbs, 2018). Vodik v transportu lahko uporabimo kot gorivo tudi za pogon predelanih motorjev z notranjim izgorevanjem. Ta alternativa je sicer cenejša od uvedbe gorivnih celic, vendar pa vožnja ni tako čista zaradi izpustov NO_x delcev. Vodik lahko za ta namen prav tako mešamo z zemeljskim plinom ali z dizelskim gorivom (Hart, in drugi, 2015).

Tudi ogrevanje predstavlja veliko povpraševanje po energiji tako na stanovanjskem kot komercialnem področju. Trenutno te zahteve v veliki meri nadomeščajo zemeljski plin in drugi viri energije. Trenutno je možnost uporabe čistejših ogrevalnih sistemov omejena na zmogljivost električnih omrežij. Tudi izkoriščanje obnovljivih virov je nedosledno. Na primer pozimi je slaba izkoriščenost fotovoltaike, medtem ko imamo poleti veliko sončne energije. Tako bodo v prihodnosti potrebni takšni pristopi, ki bodo ponujali boljšo in učinkovitejšo uporabo alternativnih virov energije (Grammelis, 433-445).

V mnogih državah se vetrne turbine in sončne elektrarne pospešeno uveljavljajo in stalno širijo. Vendar pa je za obe tehnologiji značilno nihanje oskrbe z električno energijo zaradi hlapne narave vetra in sončnega sevanja, tako da so trenutki, ko je oskrba z elektriko premajhna, in časi, ko je ta obilna. Za vključitev velikega deleža vetrne in sončne energije v energetske sistem je potrebna obsežna rešitev za shranjevanje, ki bo nadomestila časovna neravnovesja med proizvodnjo in povpraševanjem. Čeprav ima električna energija neposredno najvišjo stopnjo energije, so za namen shranjevanja energije primernejše tehnologije pretvorbe energije v plin, ki presežke energije pretvorijo v druge oblike končne energije, kot sta toplotna ali kemična energija (npr. v vodik ali sintetični metan). Proizvodnja plinov na podlagi presežkov električne energije v času, ko se proizvede več električne energije, kot je njena poraba, ponuja različne možnosti. Po eni strani se lahko plin v obdobjih, ko je povpraševanje po električni energiji večje od proizvodnje, pretvori v električno energijo s pomočjo plinskih turbin ali gorivnih celic. Pomeni, da se lahko običajne plinske elektrarne uporabljajo za rezervno električno energijo za nadomestitev vrzeli v proizvodnji električne energije. Po drugi strani se proizvedeni plini lahko uporabijo v drugih aplikacijah, kot je gorivo v transportnem sektorju ali za ogrevanje stanovanj oziroma industrijskih objektov (Mansour-Saatloo, et al., 2020).

Vključevanje obnovljivih virov energije v različne oblike, aplikacije in sektorje lahko privede do zmanjšanja emisij CO₂. Čeprav korak pretvorbe vodika v metan povzroči dodatno porabo energije ($\eta = 80\%$), je prednost sintetičnega metana v tem, da ga je mogoče dovajati neposredno v omrežje zemeljskega plina, tako da se lahko uporabi obstoječa infrastruktura in tehnologije za proizvodnjo toplote (Haris & Ibrahim, 2020).

Toda obnovljive energije ni vedno mogoče neposredno pretvoriti, zlasti v nekaterih industrijskih procesih ne. To ponazarja jeklarska industrija, ki je odvisna predvsem od premoga ali koksa, ne samo kot vira energije, temveč tudi za potrebno procesno inženirstvo. Potreba po zmanjšanju emisij CO₂ je še posebej opazna pri jeklarstvu, saj predstavlja enega najbolj energetskega požrešnih industrijskih procesov na svetu. Železarska in jeklarska industrija predstavljata tudi tretjino svetovnih industrijskih emisij CO₂, kar zahteva od industrije, da preide na bolj trajnostne načine proizvodnje. Vendar za takšno industrijo prehodi glede trajnosti niso enostavni (Otto, et al., 2017).

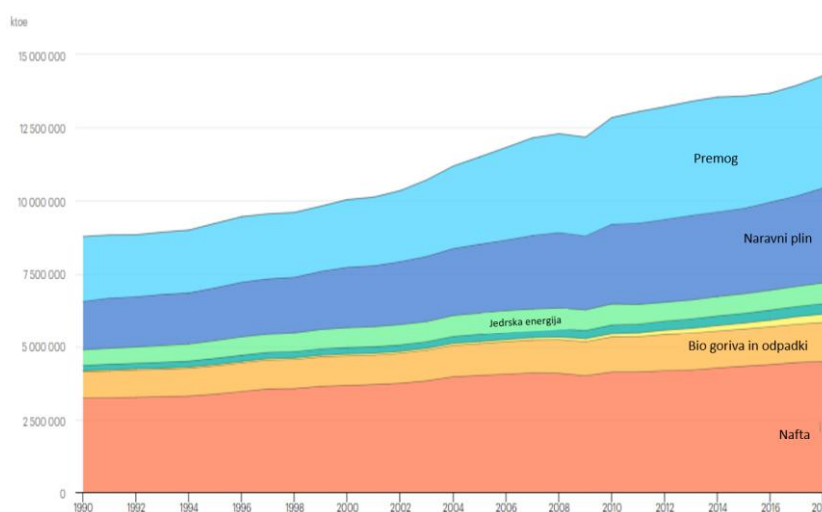
Vodik je torej ena od rešitev trajnostne energetske oskrbe in obeta veliko. Treba je izpostaviti, da zanimanje za raziskave o vodikovih tehnologij narašča, saj obetajo učinkovite ekonomske strategije in možnosti uporabe vodika. Razvoj, povezan z vodikom in njegovo tehnologijo, je pripravljen za izvedbo. Svetovno zanimanje za vodik pa so potrdili predstavniki vodikovega sektorja, ko so sklenili sporazum na svetovnem gospodarskem forumu leta 2017 v Davosu (Švica) (El-Emam & Ozcan, 2019). Vodik je zanimiva trajnostna rešitev, vendar so z njo še vedno povezana ključna vprašanja proizvodnje, skladiščenja ter distribucije. Potrebno je tudi natančno predvideti in načrtovati porabo energije ter se zavedati, da mora biti tudi gradnja infrastrukture trajnostna (Turner, 2004). Vodik v vlogi nizkoogljivega goriva prihodnosti je zelo obetaven, saj ima minimalen vpliv na okolje. V svetu ga prepoznavajo kot potencialni nadomestek sedanjemu načinu izrabe fosilnih goriv ter osnovo za sodoben energetske sistem. Prav tako ga je lahko prevažati ter shranjevati. Omogoča varnejšo izvedbo energetskega sistema z zmanjšano odvisnostjo od fosilnih goriv v transportu, ogrevalnih in industrijskih ter elektroenergetskih sistemih (Staffell, in drugi, 2019).

1.1 PRIHODNOST VODIKOVIH TEHNOLOGIJ

Atmosfera na zemlji se segreva zaradi emisij, ki jih človek spušča v okolje. Toplogredni efekt zadržuje vodo in ogljikov dioksid v zemljini atmosferi. To omogoča življenje na zemlji, saj bi v nasprotnem primeru bilo podnebje prehladno. Zaradi prevelike koncentracije ogljikovega

dioksida in drugih toplogrednih plinov se zemljino površje segreva. Če bi človek prenehal v okolje izpuščati emisije, bi se toplogredni plini počasi povrnili. Kmetijstvo, industrija in še posebej fosilna goriva proizvajajo ogljikov dioksid, metan, dušikov dioksid in druge toplogredne pline (Wuebbles & Jain, 2001).

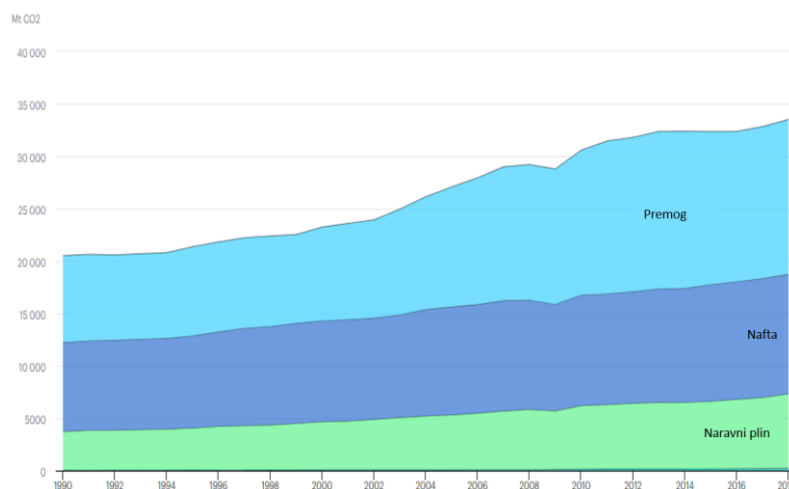
Struktura energentov, ki jih uporabljamo v današnjem času, odraža pretežno uporabo fosilnih goriv, in sicer v deležu krepko preko 80 % celotne energijske mešanice. Ti energenti tudi največ prispevajo k nastajanju toplogrednih plinov, izmed katerih ima CO₂ največji vpliv. (International Energy Agency, 2020)



Slika 1: Trend uporabe energentov do leta 2018

Vir: International Energy Agency, 2020

Leta 2018 je bilo približno 83 % energije proizvedeno iz fosilnih goriv, ki so izpustila približno 33 milijard ton ogljikovega dioksida (CO₂) (International Energy Agency, 2020).



Slika 2: Emisije CO₂ pri uporabi energentov iz fosilnih goriv do leta 2018

Vir: International Energy Agency, 2020

Japonska vlada si je zadala cilj, da do leta 2030 zmanjšajo 26 % izpustov toplogrednih plinov. Predvidevajo, da bodo leta 2030 uporabljali 56 % fosilnih goriv, 20-22 % nuklearne energije in 22-24 % iz obnovljivih virov. Do leta 2050 pa naj bi se emisije zmanjšale za 80 %. Za doseganje teh ciljev je potreben razvoj novih tehnologij, kot so zajemanje in sekvencija ogljikovega dioksida in uporaba vodika (Iida & Sakata, Hydrogen technologies and developments in Japan, 2019).

Na Švedskem se s pobudo, imenovano Tehnologija za preoblikovanje vodika (HYBRIT – Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology), ki je še vedno v eksperimentalni fazi, zavezujejo k proizvodnji jekla brez fosilnih proizvodov. Cilj je, da železarska in jeklarska industrija do leta 2045 ne bosta imeli nič emisij (Hybrit Development AB, 2017).

Prevozni sektor porabi velik del fosilnih goriv in močno prispeva k onesnaževanju atmosfere s sproščanjem toplogrednih plinov, ti pa so pa odgovorni za enega izmed največjih problemov današnjega časa. Zaradi hitrega izčrpavanja fosilnih goriv in naraščanja stopnje toplogrednih plinov je postalo pomembno, da se nadomestijo z alternativnimi gorivi, ki so manj nevarni za okolje in imajo enako učinkovitost kot običajna goriva. Obstaja več alternativ, ki se lahko uporabljajo kot gorivo za prevoz namesto trenutnih konvencionalnih goriv. Da bi konkurirali običajnim gorivom, je potrebno izboljšati njihove lastnosti, proizvodnjo, učinkovitost in primernost za končno uporabo (Sangeeta, in drugi, 2014).

Vozila s pogonom na nove energente privlačijo čedalje več pozornosti zaradi energije brez emisij. Med temi vozili se največ uporabljajo vozila na električno in vodik. Vozila na vodik imajo 3 večje prednosti pred vozili na električno: imajo daljši doseg, hitrejši polnilni čas in čistejšo proizvodnjo (Iida & Sakata, 2020).

Svetovna ekonomija 20. stoletja je temeljila na nenehni promociji porabe materialnih dobrin in storitev. Stopnja porabe je merilo kakovosti življenja v skupnosti in še vedno odraža stopnjo te kakovosti. Naraščanje proizvodnje in prekomerna poraba dobrin skupaj s stranskimi učinki zaradi škodljivih vplivov na okolje sta postali in ostajata osrednje vprašanje razvoja sodobne ekonomije. Po podatkih Svetovne zdravstvene organizacije je 6 % vseh smrti v svetovnem merilu posledica okoljskega onesnaženja. Eden možnih scenarijev je prav tako okoljska katastrofa z nepopravljivimi posledicami (Zvbkov, 2003).

V skladu s konceptom vodikove civilizacije se bo v 21. stoletju oblikovalo novo dojemanje kakovosti življenja. Ta bo odražala najboljši kompromis med zdravim okoljem in zadovoljivo (ne zelo visoko) stopnjo uporabe vitalno pomembnih materialnih dobrin in storitev. Nova

družbena zavest bo človeško-kulturne narave kot podlaga pravno-ekonomskega modela prehoda na koncept vodikove civilizacije (Goltsov, Veziroglu, & Goltsova, 2006).

Vodikova civilizacija (Hydrogen Civilization – HyCi) je idejna zasnova v okviru mednarodne organizacije International Association for Hydrogen Energy (IAHE). Celotno razvojno pot od vodikove energije, preko vodikove ekonomije do koncepta vodikove civilizacije ponazarja v sosledju petih zaporednih stopenj (Goltsov, Veziroglu, & Goltsova, 2006):

- **Prva stopnja:** izvajajo se študije sprememb biosfere zaradi človeškega vpliva v času prehoda na vodik kot novega energenta. Javnost mora biti na osnovi vseh izsledkov seznanjena z realnimi, zelo verjetnimi, natančnimi, primerljivimi in predvidljivimi ocenami o biosferičnih in okoljskih posledicah glede uporabe različnih energetskih virov (npr. fosilna goriva, vodik...).
- **Druga stopnja:** se formira nova noosferična¹, okoljska, kulturna podoba javnega mnenja v vseh državah, še posebej v industrijsko najbolj razvitih, kjer je najbolj razvita tudi znanost. Hkrati pa te države predstavljajo tudi največje onesnaževalce. Svetovno prebivalstvo lahko od teh držav upravičeno pričakuje tudi največji znanstveni in finančni prispevek.
- **Tretja stopnja:** sledi razprava v mednarodnih organizacijah, kot so UN, UNESCO, UNIDO, WHO, EC. Na osnovi izsledkov sledijo javne razprave po državah. Mednarodne organizacije sprejmejo pravne okvire ter priporočila vladam in parlamentom držav po svetu z znanstveno podprtimi in ekonomsko vzdržnimi načini in mehanizmi za preobrazbo v vodikovo civilizacijo.
- **Četrta stopnja:** prinaša razmislek o nacionalnih pravnih okvirih v skladu s priporočili mednarodnih organizacij, upošteva nacionalnih posebnosti, kot so življenjski standard, ekonomski položaj, mentaliteta, znanstveni potencial ... Skupaj z zakoni je potrebno doreči tudi pravila financiranja, ki bodo spodbudila uporabo vodika, zasebne investicije in vzpostavitev trga z vodikom.
- **Peta stopnja:** zagotavlja znanstven, kulturni, pravni in ekonomski prehod v vodikovo civilizacijo. Pravno-ekonomski model bo podrobno razdelan in se bo pričel udejanjati.

¹ Noosfera je mišljena kot novo stanje biosfere in je opisana kot planetarna "sfera razuma".

1.2 VODIK

Vodik je najpreprostejši in najlažji atom v periodnem sistemu. Je najbolj razširjen element v vesolju, vendar ga na zemlji v elementarni obliki ni. Pri standardni temperaturi in tlaku se nahaja v plinastem agregatnem stanju, je nestrupen, brez barve, vonja in okusa ter zelo gorljiv dvoatomski plin z molekulsko formulo H_2 . Razširjen je v obliki kemičnih spojin, kot so ogljikovodiki in voda (Hydrogen Tools, 2021).

Vodik je zelo majhna molekula z nizko viskoznostjo in je zato nagnjena k uhajanju. V zaprtem prostoru lahko vodik uhaja, se kopiči in doseže vnetljivo koncentracijo. Vsak plin, razen kisika, v zadostnih koncentracijah lahko povzroči zadušitev. V zaprtem okolju so zaskrbljujoča kakršnakoli puščanja, saj človeški čuti ne morejo zaznati vodika. Iz varnostnega vidika se ga ne da mešati z aromami, s katerimi bi ga lahko identificirali v primeru uhajanja. Je lahko vnetljiv v različnih koncentracijah v zraku (Hydrogen Tools, 2021).

Vodik je približno 57-krat lažji od bencinskih hlapov in 14-krat lažji od zraka. To pomeni, da če se sprosti v odprtem okolju, se običajno hitro dvigne in razprši. To je varnostna prednost v zunanjem okolju. Vodik ima visoko vsebnost energije glede na svojo težo, ne pa prostornino, kar je poseben izziv za shranjevanje. Ena izmed možnosti shranjevanja vodikovega plina je, da ga stisnemo in shranimo pri visokih tlakih. Zaradi varnosti so rezervoarji za vodik opremljeni z napravami za razbremenitev tlaka, ki preprečujejo, da bi tlaki v rezervoarjih postali previsoki. V primeru puščanja v sistemu za shranjevanje vodika pod pritiskom, se bo ustvaril curek, ki se lahko razširi na nekaj metrov. Če se vžge, lahko plamen curka resno poškoduje vse, na kar naleti (Hydrogen Tools, 2021).

Izgorevanje vodika je hitrejšo od izgorevanja drugih goriv. Temperatura samovžiga vodika znaša 585 °C (1085 °F). Gori z blede modrim plamenom, ki je pri dnevni svetlobi skoraj neviden, zato ga človeška čutila skorajda ne morejo zaznati. Vodikov plamen oddaja malo infrardeče (IR) toplote, vendar precejšnje ultravijolično (UV) sevanje. Pomeni, da je v bližini vodikovega plamena zelo malo občutka toplote, zaradi česar je lahko nenamerni stik s plamenom nevaren, prav tako tudi prekomerna izpostavljenost UV-žarkom, saj lahko povzroči opekline (Hydrogen Tools, 2021).

Tekoči vodik je vodik shranjen pri -252 °C (-423 °F), to je pri temperaturi, ki lahko pri človeku povzroči kriogene opekline ali poškodbe pljuč. Prostorninsko razmerje med tekočino in plinom je približno 1: 850 (Hydrogen Tools, 2021).

Trenutna proizvodnja vodika temelji na fosilnih gorivih. Najpomembnejši postopek je parna preobrazba ogljikovodika. Največ se uporablja vodik, proizveden iz fosilnih goriv, saj je proizvodnja cenejša od ostalih procesov. Vodik pa lahko tudi proizvajamo iz obnovljivih virov. Najpomembnejši izmed njih je postopek uplinjanja biomase. Biomasa je termo-kemično spremenjena v gorivo v obliki sintetičnega plina, imenovanega "syngas". Procesna temperatura znaša med 500 in 1400 °C, pritisk pa med 1 in 33 barov. Gorivo, ki ga tako proizvedemo, se uporablja na enak način kot plin, proizveden s pirolizo (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

Membranski reaktorji imajo potencial za masovno proizvodnjo vodika iz klasičnih goriv. Membrana deluje kot pregrada, ki prepušča le določene delce iz zmesi plinov. Poznamo različne vrste membran, ki jih delimo po materialu: polimerske membrane, porozne membrane, goste kovinske membrane in protonske prevodne membrane (Gallucci, Fernandez, Corengia, & van Sint Annaland, 2013).

1.3 VPLIV VODIKA

1.3.1 Kako bo vodik v prihodnosti vplival na trg

Vizija je, da bi bil vodik osrednji steber energetske preobrazbe. Na sedmih področjih uporabe bo vodik omogočil obnovljiv energetski sistem in bo razogljičil končno rabo energije. Doseganje vodikove vizije bi ustvarilo pomembne koristi za energetski sistem, okolje in podjetja po vsem svetu. Izognili bi se 6 Gt emisij CO₂, ustvarili 2,5 bilijona dolarjev trga za opremo za vodik in gorivne celice ter zagotovili trajnostno zaposlitev za več kot 30 milijonov ljudi (Hydrogen Council, 2017).

Celotna evropska poraba vodika v letu 2010 je ocenjena na 7 Mton (megaton), kar je približno 1,3 % celotne evropske porabe energije. Trenutna poraba vodika je skoraj v celoti sestavljena iz povpraševanja industrijskih uporabnikov na področjih proizvodnje kemikalij – amonijak in metanol (63 %), rafiniranje (30 %), pridobivanje jekla (6 %) in druga industrijska uporaba (1 %). Vzorčni obrat za proizvodnjo amonijaka porabi od 57500 do 11500 ton vodika letno, za proizvodnjo metanola 266000, tipična rafinerija od 7200 do 108800 in posamezna jeklarna za redukcijo železa porabi do 720 ton vodika letno (Mulder, Perey, & Moraga, 2019).

Trenutna oskrba z vodikom temelji na proizvodnji na kraju samem in na oskrbi z vodikom, ki nastaja kot stranski proizvod v kemičnih procesih. Na kraju proizvodnje ga proizvajajo veliki potrošniki v kemični industriji in predstavljajo 64 % celotne evropske proizvodnje vodika. Zato

se pri tej vrsti proizvodnje vodik ne prodaja, ampak ga proizvajalec neposredno uporablja. Še 27 % proizvodnje vodika se v kemičnih procesih proizvede kot ostanek. Ta vodik se prodaja po dvostranskih pogodbah. Ta trg je majhen, kar pomeni, da je število deležnikov in transakcij majhno (Certifhy, 2015).

1.3.2 Vpliv vodika na zmanjševanje ali povečevanje toplogrednih plinov

1.3.2.1 Vpliv vodika na zmanjšanje toplogrednih plinov

Vodik je idealna alternativa fosilnim gorivom, ker pri njegovi oksidaciji nastane voda. Prav tako pa je tudi idealen za shranjevanje energije, saj pri oksidaciji odda elektrone, ki proizvajajo elektriko (Lubitz & Tumas, 2007).

Vodik v Evropi in po svetu ponovno pridobiva vse več pozornosti. Lahko se uporablja kot surovina, gorivo ali kot nosilec energije pri prenosu in shranjevanju ter ponuja veliko možnosti za uporabo v industrijskem, prometnem, elektroenergetskem in gradbenem sektorju. Najpomembnejše pa je, da pri uporabi ne povzroča emisij CO₂ in skoraj ne onesnažuje zraka. Potemtakem ponuja rešitev za razogljčenje industrijskih postopkov in gospodarskih sektorjev, v katerih je zmanjšanje emisij CO₂ nujno in težko dosegljivo. Zaradi tega je vodik bistven element zaveze EU za doseganje ogljične nevtralnosti do leta 2050 in prizadevanj na svetovni ravni za izvajanje Pariškega sporazuma ob sočasnem prizadevanju za nično onesnaževanje (Evropska komisija, 2020).

Danes se s hitrim zniževanjem stroškov energije iz obnovljivih virov, tehnološkim razvojem in z nujno potrebo po drastičnem zmanjšanju emisij toplogrednih plinov odpirajo nove možnosti. Številni kazalniki kažejo, da smo blizu prelomne točke. Med novembrom 2019 in marcem 2020 so tržni analitiki podaljšali svetovni seznam načrtovanih naložb v elektrolizerje s 3,2 GW na 8,2 GW do leta 2030 (od tega jih je 57 % v Evropi), število podjetij, ki so se pridružile mednarodnemu svetu za vodik, pa se je povečalo s 13 v letu 2017 na današnjih 81. Industrija EU se sooča z izzivom in je prav tako do leta 2030 pripravila ambiciozen načrt za doseganje moči elektrolizerjev 2 x 40 GW (40 GW v Evropi in 40 GW v njenem sosodstvu z izvozom v EU, medtem ko je vizija evropske komisije postavitve elektrolizerjev za pridobivanje obnovljivega vodika nazivne moči najmanj 6 GW do leta 2024 in 40 GW do leta 2030 v EU (Evropska komisija, 2020).

Pričakuje se, da bo električna energija iz obnovljivih virov do leta 2050 povzročila razogljčenje porabe energije v EU v velikem deležu, ne pa v celoti. Vodik ima velik potencial

za premostitev dela te vrzeli kot nosilec za shranjevanje in prenos energije iz obnovljivih virov, poleg baterij, kar zagotavlja rezervo za sezonska nihanja in povezuje proizvodne lokacije z bolj oddaljenimi središči povpraševanja. V strateški viziji za podnebno nevtralno EU, ki je bila objavljena novembra 2018, je napovedana rast deleža vodika v evropski mešanici energijskih virov s sedanjih slabih 2 % na 13–14 % do leta 2050. Analitiki pa celo ocenjujejo, da bi lahko čisti vodik do leta 2050 dosegel 24 % svetovnih potreb po energiji (Evropska komisija, 2020). Poleg tega lahko vodik nadomesti fosilna goriva v nekaterih ogljično intenzivnih industrijskih postopkih, na primer v jeklarski ali kemični panogi, kar pomeni znižanje emisij toplogrednih plinov in nadaljnjo krepitev konkurenčnosti teh panog na svetovni ravni. Pomeni lahko rešitve za tiste dele prometnega sistema, kjer je težko doseči znižanje emisij, poleg tistega, kar je mogoče doseči s preходом na električni pogon in uporabo drugih obnovljivih in nizkoogljčnih goriv. Postopno uveljavljanje rešitev z vodikom lahko povzroči tudi spremembo namena ali ponovno uporabo delov obstoječe infrastrukture za zemeljski plin, kar pomaga pri preprečevanju naslednjih naložb v plinovode. Poleg proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov ter učinkovitejše in krožne rabe virov bo imel vodik svojo vlogo v povezanem energetskega sistema prihodnosti. Za EU je bistvenega pomena obsežno in hitro uvajanje čistega vodika, da doseže ambicioznejše podnebne cilje, tj. zmanjšanje emisij toplogrednih plinov na stroškovno učinkovit način za najmanj 50 % in blizu 55 % do leta 2030 (Evropska komisija, 2020).

1.3.2.2 Vpliv vodika na povečanje toplogrednih plinov in ostalih emisij

Eden glavnih problemov vodika je čista proizvodnja. Zato je potreben razvoj novih metod za proizvodnjo, saj mora le-ta postati cenejša in čistejša. Vlade in industrije po svetu financirajo raziskave in razvoj teh tehnologij z namenom, da bi se odkrile nove, bolj učinkovite metode za proizvodnjo in shranjevanje vodika. Vodik pa se že masivno uporablja v industrijskih procesih (Lubitz & Tumas, 2007).

Podrobna razčlenitev vseh emisij v zvezi s pridobivanjem, manipulacijo ter porabo vodika je opisana v nadaljevanju.

1.3.2.2.1 Emisije, ki nastanejo še pred postopkom pridobivanja vodika (nastanejo predvsem pri pridobivanju in predelavi vhodnega goriva)

Emisije zemeljskega plina

V tabeli 1 so podane okvirne vrednosti emisij zemeljskega plina. Utekočinjeni zemeljski plin (LNG), ki se prevaža na velike razdalje, ima na splošno bistveno večje emisije kot zemeljski plin (NG) v plinasti obliki, ki se po majhnih razdaljah prevaža po cevovodih. Balcombe in ostali (2015) poročajo, da emisije toplogrednih plinov za zemeljski plin (NG), vključno s transportom, znašajo med 9,72 in 118,08 gCO₂eq./kWh naravnega plina. Emisije utekočinjenega zemeljskega plina, vključno s transportom, znašajo med 25,2 in 208,8 gCO₂eq./kWh naravnega plina. Emisije so odvisne predvsem od načina pridobivanja plina ter njegovega uhajanja med pridobivanjem in transportom (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 1: Emisije pri pridobivanju zemeljskega plina

Reference	Spath and Mann (2001)	Miller et al. (2017)	Ramsden et al (2013)	Edwards et al (2014)	
	No CCS, gas transport included	No CCS, gas transport included	No CCS, gas transport included	No CCS, gas transport excluded	With CCS, gas transport excluded
CO ₂	39,889	21,020	17,429	7338	7617
CH ₄	1681	710	1591	403	418
N ₂ O	0.38	4	0.29	0	0
VOC	-	31	-	-	-
CO	154	101	-	-	-
NO _x	282	129	-	-	-
PM10	-	3	-	-	-
PM2.5	-	1	-	-	-
Particulates	13	-	-	-	-
SO _x	165	37	-	-	-
Benzene	39	-	-	-	-
NMHC	383	-	-	-	-

Vir: E4tech Ltd., 2019

(Opomba: NMHC = nemetanski ogljikovodiki, VOS = hlapne organske spojine).

Emisije pri proizvodnji biomase

Emisije iz proizvodnje biomase so zelo različne, odvisno od vrste biomase. Okvirne vrednosti so podane v tabeli 2 (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 2: Emisije pri pridobivanju biomase namenjene za pridobivanje vodika z uplinjanjem

Emission	Emissions from biomass feedstock (g/kWh_{H2})
CO ₂ (fossil only)	15.4
CH ₄	0.030
N ₂ O	0.046
VOC	0.015
CO	0.033
NO _x	0.082
PM10	0.0061
PM2.5	0.0030
SO _x	0.040

Vir: E4tech Ltd., 2019

Emisije pri pridobivanju premoga

Stopnje emisij toplogrednih plinov (GHG) se močno razlikujejo in to je verjetno posledica razlik v vrsti premoga in načinu njegove proizvodnje (geografski položaj, tehnika izkopa ter energijska vrednost premoga). Emisije toplogrednih plinov pri pridobivanju premoga znašajo od 32 do 60 gCO₂eq./kWh premoga (tabela 3). Ta širok razpon vrednosti odraža razlike v vrstah premoga in njegovem pridobivanju. Površinsko rudarstvo na primer povzroča večje emisije CO₂ zaradi spremembe namembnosti zemljišč, podzemno rudarstvo pa znatno večje emisije CH₄ zaradi sproščanja metana iz premogovnega sloja, čeprav je zemljišče manj intenzivno. Emisije pri pridobivanju premoga v g / kWh H₂ se lahko povečajo z uvedbo zajema in shranjevanja ogljika med proizvodnjo vodika. To je posledica povečanja količine vhodnega goriva, ki se zahteva pri uporabi zajema in shranjevanja ogljika (CCS). Med postopkom zajemanja in shranjevanja ogljika sta potrebni dodatna toplota in elektrika, za katere se predvideva, da jih bo zagotavljal premog, s čimer se bodo povečale emisije v g / kWhH₂. Ta vpliv bo mogoče ublažiti z uporabo nizkoogljicnih virov toplote in električne energije (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 3: Emisije toplogrednih plinov pri proizvodnji premoga

Species	Emissions (g/kWh _{H2})		
	With CCS (Ramsden et al., 2013)	With CCS (Edwards et al., 2014)	Without CCS (Edwards et al., 2014)
CO ₂	3.2	44	38
CH ₄	0.54	2.9	2.5
N ₂ O	0.0001	0.0018	0.0015

Vir: E4tech Ltd., 2019

1.3.2.2.2 Emisije, ki nastanejo pri proizvodnji vodika

Emisije pri elektrolizi

Emisije iz proizvodnje vodika z elektrolizo zajemajo emisije iz proizvodnje električne energije, potrebne za elektrolizo (vključno z gradnjo in obratovanjem proizvodne in/ali prenosne in distribucijske opreme) ter emisije naprave za elektrolizo (tako gradnja kot tudi obratovanje elektrolizerja). Emisije toplogrednih plinov vodika, proizvedene z elektrolizo, so v veliki meri odvisne od tega, kako je bila proizvedena električna energija. Čeprav so lahko emisije pri pridobivanju električne energije iz obnovljivih virov na mestu proizvodnje zelo nizke ali nične, še vedno obstajajo emisije, povezane z gradnjo infrastrukture. Npr. Mori in ostali (2014) so v študiji ocene življenjskega cikla (LCA) izračunali, da emisije toplogrednih plinov pri gradnji/obratovanju elektrolizerja znašajo 122 gCO₂eq./kWh H₂, od tega jih je 96 % posledica izdelave elektrolizerja (E4tech Ltd., 2019).

Medtem ko so vložki za delovanje alkalnega elektrolizerja in elektrolizerja z membrano protonske izmenjave (PEM) na splošno omejeni na majhno količino pomožne moči, elektrolizerji s trdnimi oksidi potrebujejo toploto, da ostanejo na svoji optimalni delovni temperaturi. Način zagotavljanja te toplote lahko bistveno vpliva na celotne emisije toplogrednih plinov iz elektrolizerja. Mehmeti in ostali (2017) so izračunali, da obratovalne emisije toplogrednih plinov iz elektrolizerja s trdnim oksidom znašajo 119 gCO₂eq./kWhH₂, od tega 87 % zaradi toplote, ki jo celica potrebuje za delovanje (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 4: Emisije proizvodnje vodika iz elektrike, pridobljene iz vetrne energije, vključujoč izdelavo in delovanje vetrnih turbin in procesa elektrolize

Emission	Emissions from wind turbine construction and operation (mg/kWh H ₂)	Emissions from electrolysis (mg/kWh H ₂)
CO ₂	18,829	1,061
CO	18.3	0.80
CH ₄	7.0	0.21
NO _x	54.7	56.2
Nitrous oxide	0.85	0.071
NMHC	69.8	8.2
Particulates	686	5.1
SO _x	95.7	40.4

Vir: (Spath & Mann, 2004)

Spath in Mann (2004) omogočata primerjavo emisij toplogrednih plinov iz proizvodnje električne energije iz vetrne energije in emisij iz samega procesa elektrolize, vključno z emisijami iz konstrukcije vetrnih turbin in elektrolizerja. Z izjemo NO_x in SO_x so emisije elektrolizerjev vsaj osemkrat manjše od emisij iz proizvodnje električne energije (na enoto vodika). Vrednosti so podane v tabeli 4 (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 5: Emisije pri proizvodnji vodika z elektrolizo ob uporabi elektrike iz solarne energije oziroma iz omrežja

Emission (mg/kWh)	Solar electrolysis (centralised)		USA grid electricity (distributed)	
	Gaseous hydrogen	Liquid hydrogen	Gaseous hydrogen	Liquid hydrogen
CO ₂	72346	217468	817931	1020106
CH ₄	158	469	1775	2214
N ₂ O	3.0	6.1	18	21
VOC	9.1	30	113	140
CO	45.7	143.1	533	664
NO _x	113	344	1267	1577
PM10	18	52	201	250
PM2.5	12	33	122	152
SO _x	158	475	1800	2244

Vir: Miller in ostali, 2017

Miller in ostali (2017) predstavljajo dva scenarija: prvega, kjer se uporablja elektrika, pridobljena iz sončne energije, in drugega, kjer se za elektrolizo uporablja elektrika iz omrežja. V tej študiji je moč, potrebna za uplinjanje/utekočinjanje vodika, vključena v obseg emisij,

medtem ko emisije iz delovanja samega elektrolizerja niso vključene. Podatki so prikazani v tabeli 5 (E4tech Ltd., 2019).

Emisije pri parni preobrazbi metana

Emisije toplogrednih plinov: za proizvodnjo vodika pri parni preobrazbi metana (Steam Methane Reforming – SMR) brez zajema in shranjevanja ogljika (CCS) se ekvivalent CO₂ emisij giblje med 222 in 325 gCO₂eq./kWhH₂ (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 6: Zbirna tabela o emisijah pri proizvodnji vodika s parno preobrazbo metana (v mg/kWh H₂)

Study reference	Miller (2017)				Spath and Mann (2001)	Young et al. (2017)	Alhamdani (2017)	Susmozas et al. (2013)	Ramsden et al. (2013)	Edwards et al. (2014)	
	Centralised gaseous hydrogen production	Centralised liquid hydrogen production	Distributed gaseous hydrogen production	Distributed liquid hydrogen production	Point emissions from the hydrogen plant only	Point emissions from the hydrogen plant only	Point emissions from the hydrogen plant only	Point emissions from the hydrogen plant only	Excludes construction of infrastructure/ equipment, includes inputs to plant e.g. electricity	Without CCS	With CCS
Origin of data	CA-GREET				Literature	Operating SMR plants in the USA	Bottom-up analysis of fugitive emissions + literature data	Aspen-plus simulation	Literature	Literature	
Scope	Excludes construction of infrastructure/ equipment, includes inputs to plant e.g. electricity.									Excludes construction of infrastructure/ equipment, includes inputs to plant e.g. electricity	
CO ₂	324,795	478,946	314,858	515,659	225,589	201,365	225,592	215,198	296,295	220,460	36,106
CH ₄	411	1182	414	850	0.00	-	5.02	-	631	53	52.7
N ₂ O	3.0	6.1	3.0	9.1	0.00	-	-	-	1.2	0	0.00
VOC	30.5	51.8	27.4	54.8	-	7.85	-	-	-	-	-
CO	1301	231	119	250	2.03	24.6	-	-	-	-	-
NO _x	240.6	478.1	228.4	539.0	22.79	37.54	-	-	-	-	-
PM10	57.9	94.4	54.8	103.5	-	9.22	-	-	-	-	-
PM2.5	48.7	73.1	48.7	76.1	-	8.87	-	-	-	-	-
Particulates	-	-	-	-	0.56	-	-	-	-	-	-
SO _x	194.9	511.6	207.1	648.6	0.00	24.91	-	-	-	-	-
NMHC	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-
Benzene	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-
O ₂	-	-	-	-	-	-	-	16,749	-	-	-
N ₂	-	-	-	-	-	-	-	422,022	-	-	-
H ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	226,618	-	-	-
NO ₂	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-

Vir: E4tech Ltd., 2019

Za proizvodnjo vodika s parno preobrazbo metana (SMR) z zajemom in shranjevanjem ogljika (CCS) sta bila najdena le dva vira, ki dajeta CO₂eq. emisije: 37 ali 45 gCO₂eq./kWhH₂ (E4tech Ltd., 2019).

Emisije pri uplinjanju premoga

Emisije toplogrednih plinov pri proizvodnji vodika zaradi uplinjanja premoga so v treh virih (Edwards in ostali (2014), Ramsden in ostali (2013) ter Cetinkaya in ostali (2012)) znašale od 17 do 144 gCO₂eq./kWh H₂ s CCS in od 279 do 576 gCO₂eq./kWh H₂ brez CCS. V teh študijah ni dovolj informacij, da bi z zaupanjem povedali, zakaj so te številke v tako širokem razponu, čeprav bi lahko bile posledica sprememb v sestavi premoga in uporabljene tehnologije uplinjanja. Na emisije toplogrednih plinov zaradi uplinjanja premoga z zajemanjem in shranjevanjem ogljika vplivata tudi količina dodatne potrebne energije (pogosto izražena kot zmanjšanje celotne učinkovitosti postopka) in odstotek zajetega CO₂ (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 7: Emisije pri proizvodnji vodika z uplinjanjem premoga

Species	Emissions (g/kWh _{H2})			
	With CCS (Ramsden et al., 2013)	With CCS (Edwards et al., 2014)	Without CCS (Edwards et al., 2014)	Without CCS (Dufour et al., 2011)
CO ₂	131	17.2	576	-
CH ₄	0.556	0	0	-
N ₂ O	0.00088	0	0	-
Particulates	-	-	-	2.26
NO _x	-	-	-	1.64
SO _x	-	-	-	0.82

Vir: (E4tech Ltd., 2019)

Dufor v zgornji tabli upošteva le emisije, nastale pri uplinjanju, medtem ko ostali raziskovalci upoštevajo tudi emisije v preostalih delih procesa.

Skone in ostali (2012) so v svoji raziskavi prišli do podobnih ugotovitev glede toplogrednih plinov, medtem ko so za netoplogredne pline ugotovili, da so njihove skupne emisije, tako z zajemom in shranjevanjem ogljika (CCS) kot brez njega, najvišje za NO_x, SO_x in PM, bistveno nižje za HOS in CO ter zelo nizke za svinec, živo srebro in amoniak (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 8: Emisije toplogrednih plinov zaradi uplinjanja premoga brez zajema in shranjevanja ogljika (CCS) v kg / MWh električne moči (Skone in ostali, 2012)

Emissions (kg / MWh)	Plant Construction		Plant Operation		Installation/Deinstallation		Total	
	Mass (kg)	kg CO ₂ e	Mass (kg)	kg CO ₂ e	Mass (kg)	kg CO ₂ e	Mass (kg)	kg CO ₂ e
CO ₂	0.66	0.66	782.24	782.24	0.04	0.04	782.95	782.95
N ₂ O	1.55E-05	4.62E-03	3.42E-06	1.02E-03	1.05E-06	3.13E-04	2.00E-05	5.95E-03
CH ₄	1.15E-03	2.87E-02	2.97E-03	7.41E-02	2.09E-05	5.23E-04	4.13E-03	1.03E-01
SF ₆	4.57E-08	1.04E-03	2.87E-07	6.55E-03	6.57E-15	1.50E-10	3.33E-07	7.59E-03
Total GWP		0.70		782.33		0.04		783.06

Vir: E4tech Ltd., 2019

Tabela 9: Ostale emisije, ki onesnažujejo zrak iz uplinjanja premoga brez zajema in shranjevanja ogljika (CCS) v kg / MWh (Skone in ostali, 2012)

Emissions (kg / MWh)	Plant Construction	Plant Operation	Installation/ Deinstallation	Total
Pb	4.5E-07	1.2E-05	9.5E-11	1.2E-05
Hg	2.9E-08	2.4E-06	1.3E-11	2.4E-06
NH ₃	4.2E-07	1.4E-08	1.6E-06	2.0E-06
CO	2.5E-03	3.9E-04	1.7E-03	4.7E-03
NO _x	1.3E-03	2.3E-01	6.3E-04	2.3E-01
SO _x	1.8E-03	5.3E-02	2.7E-05	5.5E-02
VOC	5.3E-05	2.1E-05	1.7E-04	2.4E-04
PM	7.0E-04	3.0E-02	8.5E-05	3.1E-02

Vir: (E4tech Ltd., 2019)

Tabela 10: Emisije toplogrednih plinov zaradi uplinjanja premoga z zajemom in shranjevanjem ogljika (CCS) v kg / MWh električne moči (Skone in ostali, 2012).

Emissions/ MWh	Plant Construction		Installation/ Deinstallation (I/D)		Plant Operation		CO ₂ Pipeline I/D		Total	
	Mass (kg)	kg CO ₂ e	Mass (kg)	kg CO ₂ e	Mass (kg)	kg CO ₂ e	Mass (kg)	kg CO ₂ e	Mass (kg)	kg CO ₂ e
CO ₂	1.01	1.01	0.05	0.05	102.71	102.71	0.03	0.03	103.80	103.80
N ₂ O	3.32E-05	9.89E-03	1.24E-06	3.71E-04	3.91E-06	1.17E-03	6.67E-07	1.99E-04	3.90E-05	1.16E-02
CH ₄	1.49E-03	3.73E-02	2.48E-05	6.19E-04	3.40E-03	8.49E-02	1.33E-05	3.32E-04	4.93E-03	1.23E-01
SF ₆	4.66E-03	1.06E-03	7.78E-15	1.77E-10	3.29E-07	7.50E-03	4.16E-15	9.50E-11	3.75E-07	8.56E-03
Total GWP		1.05		0.05		102.80		0.03		103.94

Vir: E4tech Ltd., 2019

Tabela 11: Ostale emisije, ki onesnažujejo zrak iz uplinjanja premoga z zajemom in shranjevanjem ogljika (CCS) v kg / MWh električne moči. (Skone in ostali, 2012)

Emissions (kg/ MWh)	Plant Construction	Plant Operation	Pipeline I/D	Plant I/D	Total
Pb	1.31E-06	1.38E-05	6.03E-11	1.13E-10	1.51E-05
Hg	6.17E-08	2.76E-06	8.21E-12	1.53E-11	2.82E-06
NH ₃	4.22E-07	1.64E-08	9.95E-07	1.86E-06	3.29E-06
CO	5.12E-03	4.48E-04	1.08E-04	2.06E-03	7.74E-03
NO _x	1.92E-03	2.29E-01	3.13E-04	7.50E-04	2.32E-01
SO _x	2.83E-03	4.68E-02	7.27E-06	3.23E-05	4.97E-02
VOC	9.94E-05	2.46E-05	2.32E-05	1.98E-04	3.45E-04
PM	9.87E-04	3.43E-02	6.11E-05	1.00E-04	3.54E-02

Vir: E4tech Ltd., 2019

Raven izpuščenega CO₂ je pri zajemu in shranjevanju ogljika (CCS) nižja kot brez CCS, vendar so vse druge emisije (razen SO_x) večje pri CCS (E4tech Ltd., 2019).

Emisije pri uplinjanju biomase

Uplinjanje biomase je komercialna tehnologija za proizvodnjo toplote in električne energije, vendar uplinjanje biomase v vodik še ni dokazano v demonstracijskem merilu.

Zaradi majhne neposredne primerljivosti med viri podatkov le-ti ne zadoščajo za sprejem verodostojnih zaključkov. Miller in ostali (2017) upoštevajo, da so emisije iz uplinjanja biomase pri vseh obravnavanih onesnaževalih nekajkrat večje od emisij iz proizvodnje surovin, kar pomeni, da bo pomembno upoštevanje samega postopka uplinjanja biomase.

Miller in ostali (2017) ter Sumozas in ostali (2013) so izdali poročilo o emisijah netoplogrednih plinov zaradi uplinjanja biomase, ki zajema H₂, CO, NO_x, delce, SO_x, H₂O, N₂ in O₂. O vrstah, ki prispevajo k potencialu globalnega segrevanja (CO₂, CH₄ in N₂O), poročajo Ramsden in ostali (2013) ter Edwards in ostali (2014) (E4tech Ltd., 2019).

Tabela 12: Povzetek emisij iz proizvodnje vodika pri uplinjanju biomase brez zajema in shranjevanja ogljika (CCS). (V vseh primerih je surovina lesena biomasa razen pri Ramsdenu, ki povzema koruzno biomaso.)

	Emissions from hydrogen production by biomass gasification (g/kWh _{H₂})		
Emission	Including hydrogen compression (Miller et al. 2017)	Including hydrogen liquefaction (Miller et al. 2017)	Excluding compression or liquefaction (figure / range given is from Susmozas et al. ^a , 2013, Ramsden et al. ^b , 2013, Edwards et al. ^c , 2014)
CO ₂ (fossil)	87	199	51 ^b
CH ₄	0.238	0.557	0.0007-0.176 ^{b,c}
N ₂ O	0.049	0.052	0.0007 – 0.004 ^{b,c}
VOC	0.027	0.049	-
CO	0.107	0.225	-
NO _x	0.192	0.359	0.27 ^a , figure applies specifically to NO ₂
PM10	0.012	0.024	-
PM2.5	0.009	0.018	-
SO _x	0.146	0.244	
O ₂	-	-	571 ^a
N ₂	-	-	3,402 ^a
H ₂ O	-	-	1245 ^a

Vir: E4tech Ltd., 2019

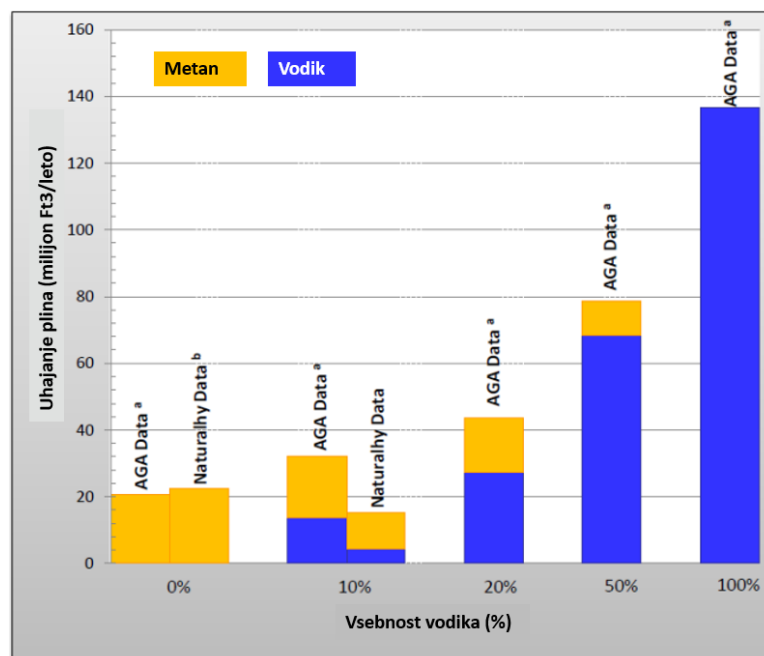
1.3.2.2.3 Emisije, ki nastanejo pri transportu vodika

Transport po cevovodih

Na splošno lahko rečemo, da bodo stopnje uhajanja vodika verjetno večje, pri vseh drugih pogojih pa enake kot pri zemeljskem plinu, zaradi majhne molekulske velikosti vodika.

Melaina in ostali (2013) so na podlagi študije Inštituta za plinsko tehnologijo v študiji poročali, da bi bila stopnja uhajanja vodika približno trikrat višja od stopnje uhajanja zemeljskega plina v omrežju jeklenih cevi. Vendar to ni nujno v primeru cevi iz plastičnih mas, saj se mehanizem prepuščanja vodika razlikuje med železnimi ali jeklenimi omrežji ter omrežji iz plastičnih mas, kot sta polietilen in PVC, pri čemer je plin v preteklosti pretežno uhajal okoli spojev in opreme, kot so ventili. Objavljene raziskave Alvareza in drugih (2018) kažejo, da bi lahko uhajanje omrežja v ZDA podcenili do 60 %. Pridobivanje zanesljivih podatkov o stopnjah uhajanja plinskega omrežja je očitno izziv in predstavlja potencialno tveganje za vsa nadaljnja dela na področju razogljčenja plinskega omrežja (E4tech Ltd., 2019).

Iz več študij (Melaina et al. 2013, Haines et al. 2013), ki so bile pregledane, sta izšla dva zanimiva rezultata, ki bi si zaslužila nadaljnjo preiskavo. Prvi je ta, da je bilo ugotovljeno, da so stopnje uhajanja, ki so bile empirično izmerjene v študijah plastičnih cevi, nižje, kot bi napovedovale teoretične prepustnosti. Drugi je, da je pri mešanju vodika z zemeljskim plinom delež uhajanja zemeljskega plina nižji od deleža mešanice. Na primer pri 10-odstotni mešanici vodika je uhajanje naravnega plina (NG) približno za polovico tistega, kar bi lahko napovedali s koeficienti ameriškega plinskega združenja (E4tech Ltd., 2019).



Slika 3: Stopnje uhajanja plina iz cevovodov pri različnih mešanicah vodika v zemeljskem plinu

Vir: E4tech Ltd., 2019

Transport s tovornjaki in ladjami

Ramsden in ostali (2013) menijo, da iz tovornjakov v ZDA utegne uhajati med 1 % pri prevozu stisnjenega plina in 2,3 % pri prevozu tekočega vodika. Edwards in ostali (2014) navajajo, da bi prevoz tekočega H₂ po morju (10.000 km) lahko povzročil emisije toplogrednih plinov v višini 26,28 gCO₂eq./kWhH₂, medtem ko so emisije iz naslova „distribucije“, ki vključujejo prevoz po cesti na razdalji več kot 500 km, ocenjene na 15,12 gCO₂eq./ kWhH₂. Ramsden in ostali (2013) poročajo o emisijah 27,81 gCO₂eq./kWhH₂ za prevoz plinastega vodika na razdalji 100 km po cesti, vključno s stiskanjem in skladiščenjem. Emisije iz prevoza vodika so tako odvisne predvsem od načina prevoza in prevožene razdalje (E4tech Ltd., 2019)

1.3.2.2.4 Emisije pri končnih porabnikih vodika

Emisij toplogrednih plinov pri zgorevanju vodika ni!

Cellek s sodelavci (2018) skuša količinsko ovrednotiti emisije ne-toplogrednih plinov iz inovativne zasnove kotla na vodik, kar kaže na možnost do šestkrat višjih emisij NO_x v primerjavi z zemeljskim plinom. Sadler in sod. (2016) kvalitativno potrjuje potencial za večje emisije NO_x, vendar trdi, da lahko tehnologije, kot so katalitski gorilniki, to tveganje zmanjšajo z nizkotemperaturnim katalitskim zgorevanjem (ki proizvaja nič NO_x) in visokotemperaturnim katalitskim zgorevanjem, ki proizvaja nizke vrednosti NO_x. Emisije NO_x iz takšnih sistemov gorivnih celic bodo verjetno nizke v primerjavi s kotli na zemeljski plin (E4tech Ltd., 2019).

1.3.2.2.5 Uhajanje vodika v atmosfero

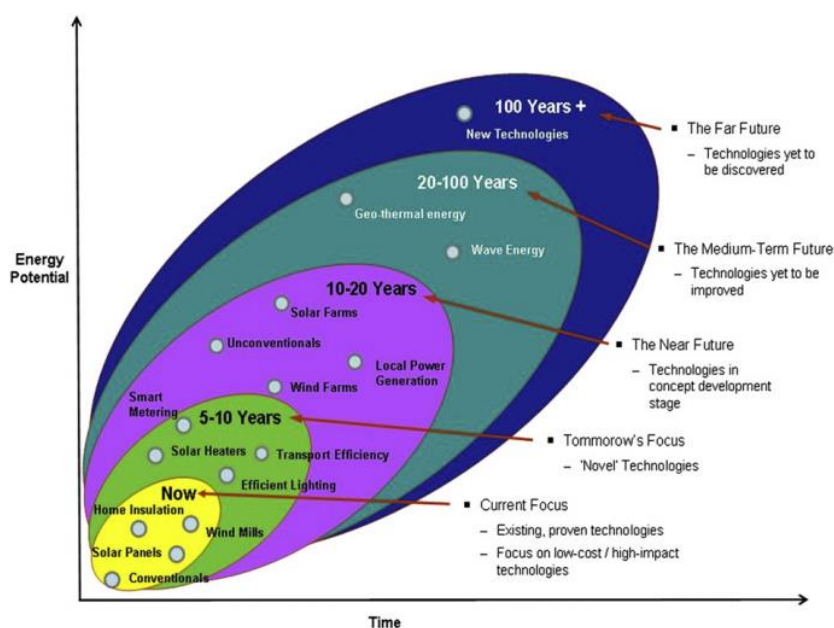
Zdi se, da so energetske sistemi na osnovi vodika privlačen predlog za nadomestitev sedanjih energetskih sistemov na fosilna goriva. Vodik se zdi privlačen, ker je čisto gorivo in ker ob njegovi uporabi ponuja izboljšanje učinkovitosti. Prometni sektor lahko nudi nekaj prvih aplikacij novih vodikovih tehnologij. Ker pa vodik reagira s troposferskimi hidroksilnimi radikali, emisije vodika v ozračje motijo razporeditev metana in ozona, drugega in tretjega najpomembnejšega toplogrednega plina po ogljikovem dioksidu. Vodik je torej posredni toplogredni plin s potencialom globalnega segrevanja (Global Warming Potential – GWP) 5,8 v 100-letnem obdobju. Prihodnje vodikovo gospodarstvo bi zato imelo toplogredne posledice in ne bi imelo podnebnih motenj. Če bi globalno vodikovo gospodarstvo nadomestilo sedanji energetski sistem na osnovi fosilnih goriv in pokazalo stopnjo uhajanja 1 %, bi to povzročilo podnebne posledice 0,6 % sedanjega sistema, ki temelji na fosilnih gorivih. Če bi bila stopnja uhajanja 10 %, bi vpliv na podnebje znašal 6 % sedanjega sistema. Pozornost je treba nameniti

zmanjšanju uhajanja vodika v prihodnjem svetovnem vodikovem gospodarstvu na minimum, če želimo v celoti izkoristiti podnebne koristi v primerjavi z energetskimi sistemi na osnovi fosilnih goriv (Derwent, in drugi, 2006).

Porast količine vodika v atmosferi kot posledice človeškega vpliva, bi lahko povečal globalno segrevanje. Odziv metana in ozona v atmosferi je v študiji izražen s količino 1 Tg vodikovih emisij v stoletnem časovnem obdobju. V primerjavi s posledicami emisije 1 Tg impulza ogljikovega dioksida, 1 Tg vodika v stoletnem časovnem obdobju povzroči 5 ± 1 -krat toliko časovno integriranega sevanja. Se pravi, da ima vodik potencial za globalno segrevanje (GWP) 5 ± 1 v stoletnem časovnem obdobju. Posledice globalnega segrevanja nizkoogljirnega energetskega sistema na osnovi vodika so zato kritično odvisne od stopnje uhajanja vodika. Če se uhajanje vodika na vseh stopnjah proizvodnje, distribucije, skladiščenja in uporabe vodika učinkovito omeji, se zdi, da so energetski sistemi na osnovi vodika privlačen predlog za zagotavljanje nadomestitve energetskih sistemov na osnovi fosilnih goriv (Derwent, in drugi, 2020).

1.3.3 Energetska mešanica

Potrebe po energentih se bodo v prihodnjih letih povečevale skladno z napovedmi rasti prebivalstva. V svetu se povečujejo prizadevanja za zagotovitev čiste in varne oskrbe z energijo (IEA, 2011). Vizije po energetske oskrbi so običajno zasnovane na nivoju nacionalnih in regionalnih oblasti. Možnosti za izboljšanje razvoja naših odločitev o prihodnji oskrbi, izgubi in uporabi energije se nenehno razvijajo. Vsako energetske strategijo, namenjeno prehodu energetskega sistema iz sedanjega v prihodnje stanje, mora voditi močna in navdihujoča vizija (Weijermars, Taylor, Bahn, Das, & Wei, 2012).



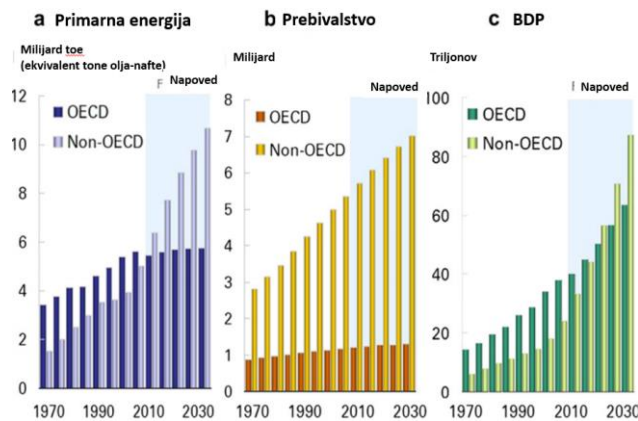
Slika 4: Popis energetskih rešitev za sedanjost in prihodnost. Elipse v ravni obliki so nedimenzionalne propagandne časovne premice

Vir: IEA, 2011

Slika 4 prikazuje več možnih energetskih rešitev in nove tehnologije. Vizija in vodstvo sta vedno bolj potrebna za razvoj in usmerjanje izvajanja ustreznih energetskih strategij. Uresničevanje takšnih vizij pomaga pri spodbujanju nekaterih energetskih možnosti, medtem ko se druge lahko postopoma odpravi. Prizadevati si moramo, da zapolnimo morebitne vrzeli med izbirami strokovnjakov in optimalnimi modelnimi rešitvami. Jasno je, da bodo vsi akterji imeli koristi od optimizacije našega skupnega razumevanja dinamike energetske vizije, načrtovanja in izvajanja strategije (Weijermars, Taylor, Bahn, Das, & Wei, 2012).

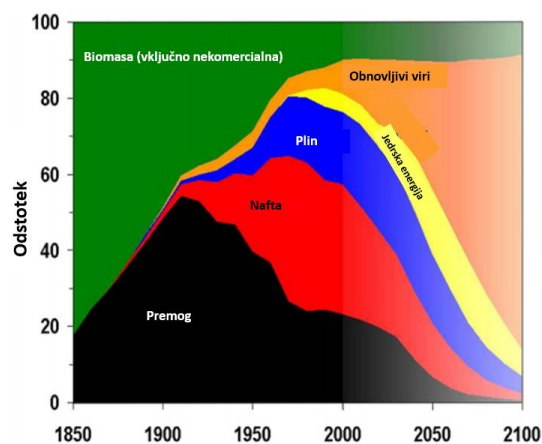
Proizvajalci energije in potrošniki sodelujejo že več kot 200 let (od industrijske revolucije dalje), da bi učinkovito usklajevali ponudbo in cene energije. Po predvidevanjih naj bi se poraba primarne energije po vsem svetu v obdobju 2010-2030 letno povečala za povprečno 1,7

% letno (slika 5, stolpec a). To je le nekoliko nižje od 1,9-odstotne rasti, zabeležene v zadnjih dveh desetletjih. Skoraj 93 % prihodnje svetovne rasti energije prispevajo regije, ki niso članice OECD, njihov delež pa bo do leta 2030 predstavljal približno 67 % svetovne potrošnje (International Energy Agency, 2011). Ta rast je posledica povečanja prebivalstva (slika 5, stolpec b) in BDP (slika 5, stolpec c). Realni dohodek na svetu se je v zadnjih 20 letih povečal za 87 % (Maddison, 2009), do leta 2030 pa naj bi se povečal za dodatnih 100 % (International Energy Agency, 2011). To pa bo pripeljalo do povečanja svetovne porabe energije [(International Energy Agency, 2010), (International Energy Agency, 2010)]. Čeprav se energetska intenzivnost (energija, ki se porabi za enoto BDP) zmanjšuje, se to ne dogaja dovolj hitro za izravnavo gospodarske rasti. 9 milijard prebivalcev, pričakovanih do leta 2050, bo verjetno potrebovalo 50 % več energije kot sedanjih 7 milijard prebivalcev Zemlje (United Nations, 2011).



Slika 5: Razlike v svetovnih trendih držav OECD in držav, ki niso članice OECD, se pojavljajo v (a) rasti primarne porabe energije, (b) rasti prebivalstva in (c) rasti BDP

Vir: International Energy Agency, 2011



Slika 6: Energetske mešanice v preteklosti in možni nadaljnji scenarij za 3. tisočletje (na podlagi modelov IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis

Vir: Nakicenov, 2000)

V enem izmed možnih scenarijev deleža jedrske in obnovljive energije hitro naraščata na račun fosilnih goriv. V resnici še ni prišlo do vrhuncev proizvodnje fosilnih goriv in njihova uporaba po nedavnih napovedih trendov še vedno narašča (Agency, International Energy, 2010). Vsi fosilni viri energije so se v zadnjem stoletju enakomerno pridobivali na trgu. Za vsakega izmed nosilcev fosilne, jedrske in obnovljive energije se je absolutni obseg proizvodnje v zadnjih 40 letih več kot podvojil (Weijermars, Taylor, Bahn, Das, & Wei, 2012).

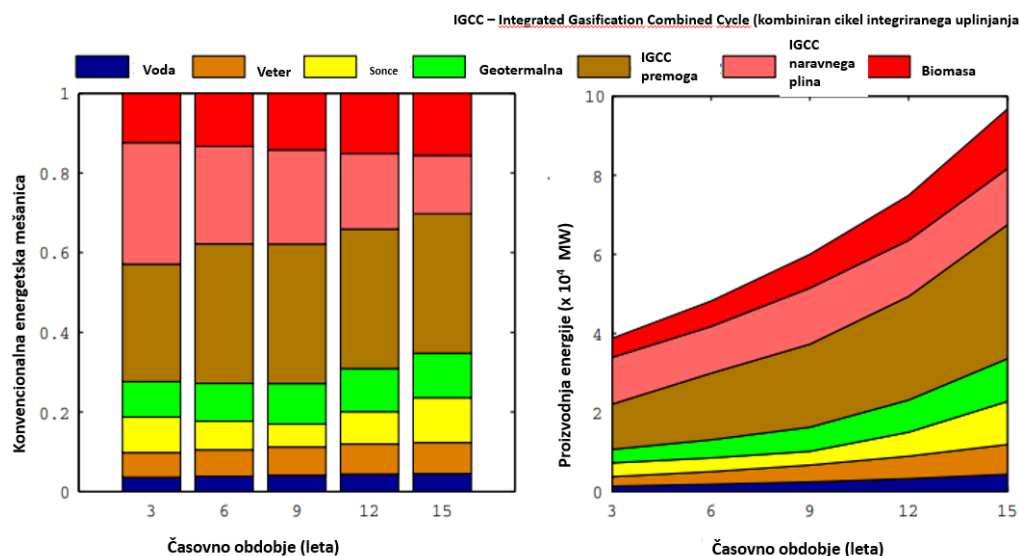
Razvita metodologija energetskega načrtovanja lahko obravnava različna časovna obdobja in tudi bolj negotove scenarije in omogoča računalniško podprte optimizacije tovrstnih napovedi.

Po večstopenjskem stohastičnem energijskem modelu (Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015) je možno izvesti dolgoročno napoved energetske mešanice za območje poljubne velikosti. Model je sposoben upoštevati negotovosti glede prihodnjih potreb po energiji, stroškov goriva in napovedi stroškov tehnologije. Rezultati energetskega načrtovanja po tem modelu načrtovanja za obdobje 15 let (s 3-letnim intervalom) so potrdili, da:

- odločitve na podlagi konvencionalnih modelov odločanja v večini primerov načrtovanja energetskega povpraševanja niso zadovoljive, saj ne upoštevajo negotovosti glede prihodnjih potreb,
- stohastična mešanica energije zagotavlja energetske varnost pri vseh obravnavanih scenarijih povpraševanja po energiji,
- je optimalna mešanica energentov in je izvedljiva glede na 79,2 % scenarijev prihodnjega povpraševanja po energiji na račun 0–10% zvišanja stroškov energije.

1.3.3.1 Konvencionalna energetska mešanica

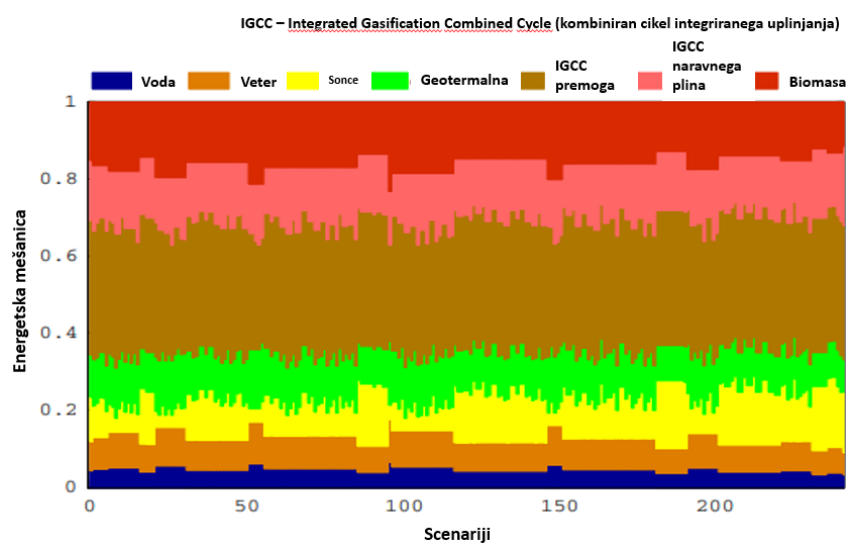
Konvencionalno energetske mešanico (slika 7) za obravnavano obdobje sestavljajo premog 29–35 % (IGCC– integrated gasification combined cycle – kombinirani cikel uplinjevanja), zemeljski plin 14,7–30,5 % (IGCC), biomasa 12,4–15,6 %, geotermalna energija 8,9–11,2 %, sončna energija 5,8–11,2 %, veter 6,2–7,8 % in hidro energija 3,6–4,5 % (Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015).



Slika 7: Konvencionalna energetska mešanica, načrtovana brez upoštevanja negotovosti prihodnjih potreb

Vir: Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015

1.3.3.2 Energetska mešanica glede na stohastični model energetskega planiranja

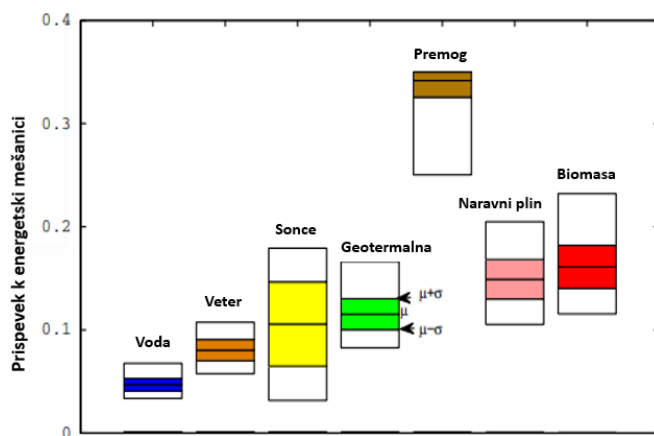


Slika 8: Energetska mešanica glede na stohastični model energetskega planiranja

Vir: Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015

Energetska mešanica na osnovi stohastičnega modela planiranja energetskih potreb vključuje vse prihodnje scenarije energetskih potreb, ki jo sestavljajo premog 25–35 % (IGCC), zemeljski plin 10,5–33,3 % (IGCC), biomasa 11,5–23,2 %, geotermalna energija 8,3–16,6 %, sončna 3,2–17,9 %, veter 5,7–10,7 % in hidro 3,3–6,8 %.

Možno spremenljivost načrtovanja posameznih energentov ob koncu obdobja planiranja (leto 2015) prikazuje slika 9.

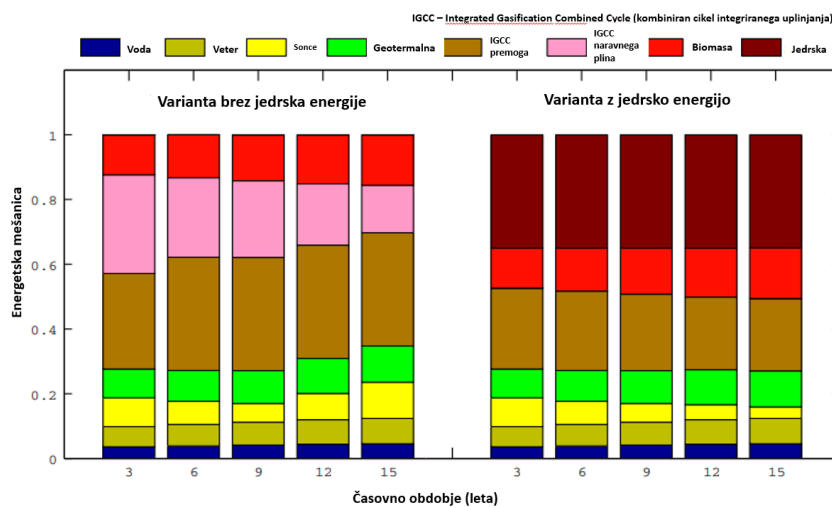


Slika 9: Spremenljivost energentov glede na napovedi prihodnjega povpraševanja

Vir: Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015

Videti je, da je sončna energija podvržena večji potencialni spremenljivosti glede na biomaso in zemeljski plin. Premog se sooča z manj spremembami, ker je njegov prispevek že dosegel največji dovoljeni obseg, in sicer 35 % glede na večino scenarijev energetskega povpraševanja.

1.3.3.3 Optimalna energijska mešanica

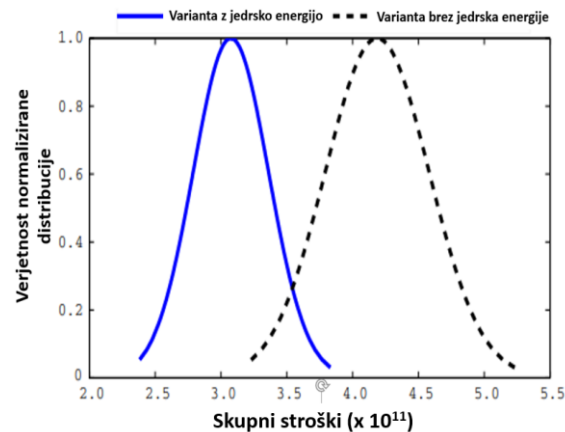


Slika 10: Optimalna energetska mešanica z ali brez jedrske energije

Vir: Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015

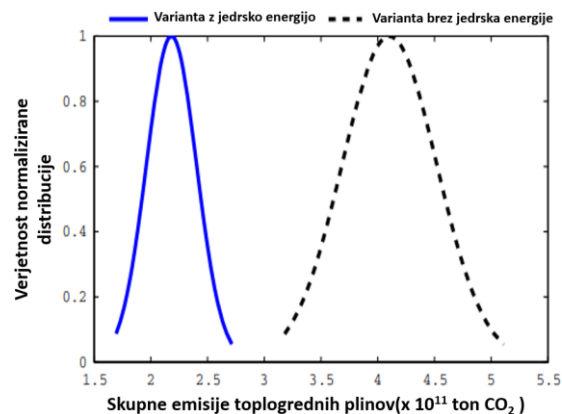
Slika 10 prikazuje optimalno mešanico energij, pridobljeno brez jedrske energije in z njeno možnostjo. Jedrski prispevek je prevladujoč v primerjavi z drugimi viri energije, sledijo jim premog (IGCC) in biomasa. Prispevek premoga se zmanjša, zemeljski plin pa se v energetske mešanici z jedrsko opcijo popolnoma izloči (Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015).

Dovoljeni delež vsake izmed tehnologij je pri optimalni energetske mešanici omejen na 35 % povpraševanja po energiji. V praksi se tisti, ki energetske potrebe načrtujejo in oblikujejo politiko za vsako tehnologijo, odločijo za ustrezne deleže, upoštevajoč tehnologijo in njen vpliv na električno omrežje (Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015).



Slika 11: Porazdelitev vseh stroškov (z jedrsko tehnologijo ali brez nje) upoštevajoč negotovost prihodnjega povpraševanja po energiji

Vir: (Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015).



Slika 12: Porazdelitev emisij CO₂ (z jedrsko tehnologijo ali brez nje) upoštevajoč negotovost prihodnjega povpraševanja po energiji

Vir: Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015

Energetska mešanica z jedrsko opcijo dosega 26,7-odstotno zmanjšanje skupnih stroškov in 53,2-odstotno zmanjšanje emisij toplogrednih plinov v primerjavi z opcijo brez jedrske energije (sliki 11 in 12) (Thangavelu, Khambadkone, & Karimi, 2015).

1.3.3.4 Radikalne rešitve

Brook, Blees, Wigley & Hong (2018) menijo, da je energetska diverzifikacija verjetno nepotrebna ali vsaj manj optimalna za popolno razogljčeno, energetsko bogato in trajnostno prihodnost, ki jo lahko dosežemo s pravočasno uvedbo jedrske energije in s tem povezane tehnologije za proizvodnjo sintetičnih goriv in recikliranje jedrskih odpadkov.

Kaj državam po svetu preprečuje izvajanje strategij uporabe raznovrstnih obnovljivih virov s ciljem zamenjave premoga, nafte in plina z obnovljivimi viri? Ključnega pomena je, da se tehnologije za izkoriščanje obnovljivih virov, ki bi zagotavljali zanesljivo in pravočasno dobavo, še vedno srečujejo z mnogimi izzivi tehnične narave (Brook, Blees, Wigley, & Hong, 2018).

Primer ideje o energetske "srebrni kroglji" (en sam vir energije, ki bi lahko zadostil vsem civilizacijskim potrebam) je jedrska energija četrte generacije (Brook, Blees, Wigley, & Hong, 2018).

Integralni hitri reaktor (Integral Fast Reactor – IFR) izboljšuje reaktorsko tehnologijo, ki povezuje hitri reaktor s komponentami za predelavo in izdelavo goriv na kraju samem (torej "integral"). Je elegantna rešitev za svetovne energetske probleme in je sistem, ki je dokazano sposoben sčasoma zagotoviti ne samo rezino energetske pite, ampak celo pito [(Till & Chang, 2011), (Lightfoot, Manheimer, Meneley, Pendergast, & Stanford, 2006)]. IFR lahko za gorivo uporablja jedrske odpadke ter orožni plutonij in uran.

Reaktor na staljeno sol (MSR – Molten Salt Reactor) je reaktor, v katerem se cepljivi material raztopi v staljeni soli brez primesi trdnega goriva. Njegova visoka delovna temperatura (~ 700 °C v primerjavi s ~ 500–550 °C za IFR ali 350 °C za trenutno postavljene vodne reaktorje) obljublja večjo učinkovitost in številne možnosti za ogrevanje v industrijskih procesih ali zamenjavo gorilnikov na premog rastlin (Brook, Blees, Wigley, & Hong, 2018).

Pri razvoju tehnologije so nadaljevali s širšim ciljem: ne samo da bi se reciklirala kovinsko gorivo IFR, ampak bi se recikliralo tudi izrabljeno oksidno gorivo iz lahkih vodnih reaktorjev, tako imenovanih "jedrskih odpadkov", ki so pogosto napačno opredeljeni kot "problem milijona let". Naključno lahko ista tehnologija reciklira tudi izrabljeno gorivo iz reaktorjev za staljeno sol. Pravzaprav gre za enotno rešitev za recikliranje jedrskega goriva (Brook, Blees, Wigley, & Hong, 2018).

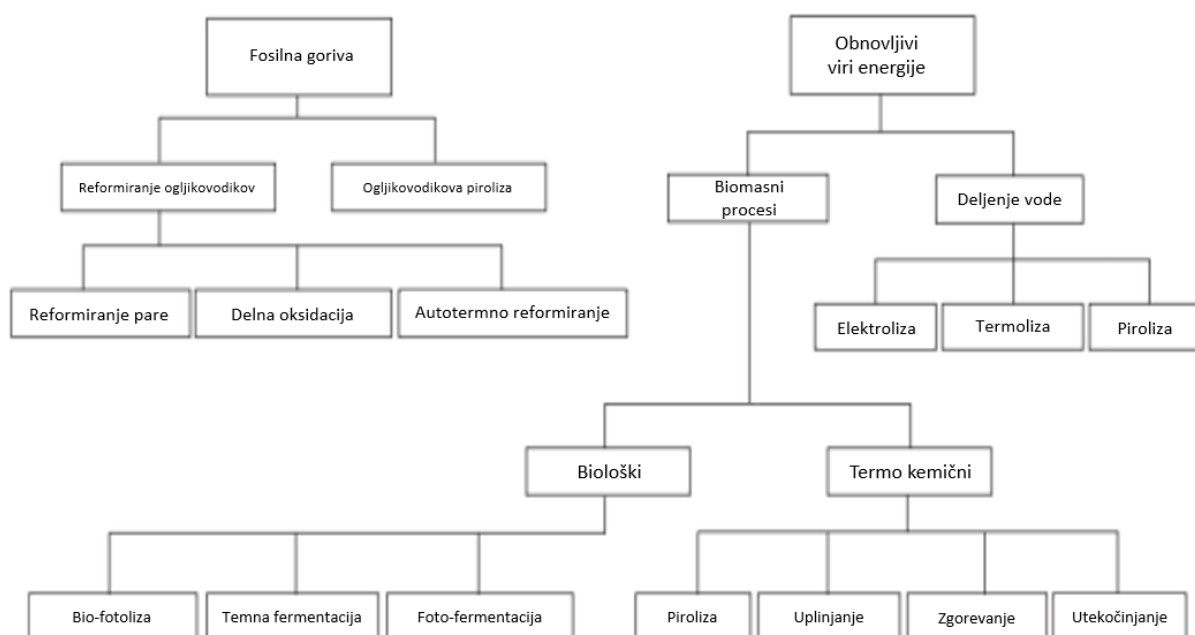
1.4 UPORABA VODIKA

Širše gledano lahko vodikovo gospodarstvo obravnavamo kot sistem (ali zbirko sistemov), ki uporablja vodik kot glavni medij v ciklu oskrbe z energijo. Vodikova ekonomija predvideva nove načine rabe energije, ki so trajnostni in okolju neškodljivi. Potrebna sta razvoj in implementacija čim učinkovitejših in okolju prijaznih sistemov za pridobivanje vodika.

Kot smiselna celota naj bi ti sistemi obravnavali vse ključne vidike načrtovanja, gradnje, obratovanja in vzdrževanja. Pri pridobivanju čistega vodika znižujejo sistemska tveganja, vendar so učinkoviti, cenovno ugodni in zanesljivi.

Vodik se v splošnem trenutno uporablja v živilski industriji, največ pa se uporablja kot gorivo različnim prevoznim sredstvom, na primer v avtomobilih, ki za proizvodnjo elektrike uporabljajo vodikove gorivne celice. Na področju transporta ima vodik trenutno največji potencial posebej zaradi majhnih emisij, ki jih proizvajajo vozila na omenjen pogon (Boonrod, Prapainainar, Varabuntoonvit, Sudsakorn, & Prapainainar, 2020).

Razvija se pa tudi parno preoblikovanje zemeljskega plina oz. metana, ki se bo v prihodnosti razvijalo hitro, saj je ta proces zelo uporaben pri proizvodnji vodika in v kolikor se CO₂ uporablja za nadaljnji proces, so emisije zelo majhne (Hwangbo, Beum Lee, & Han, 2017).



Slika 13: Načini pridobivanja vodika

Vir: Shad, Khorrami, & Ghaemi, 2016

Slika 13 predstavlja načine pridobivanja vodika. Pridobivamo ga lahko iz fosilnih goriv in iz obnovljivih virov energije. Iz fosilnih goriv ga pridobivamo na podlagi reformiranja ogljikovodikov in pirolize ogljikovodikov. Reformiranje delimo na postopke reformiranja pare, postopke delne oksidacije ter autotermnega reformiranja vodika. (Shad, Khorrami, & Ghaemi, 2016)

Pridobivanje vodika iz obnovljivih virov energije pa razdelimo na biomasne procese ter procese z delitvijo molekul vode. Slednje se deli na procese elektrolize, termolize in pirolize. Biomasni procesi pa se delijo na biološke in termokemične procese. Med biološke procese uvrščamo bio-fotolizo, temno fermentacijo in foto fermentacijo. Med termokemične procese spadajo piroliza, uplinjanje, izgorevanje in utekočinjanje (Shad, Khorrami, & Ghaemi, 2016).

1.4.1 Načini pridobivanja vodika

1.4.1.1 Reformiranje metana s paro (SMR):

SMR je termična razgradnja metana s paro, tako da nastane vodik (H_2). Stranski produkti tega je ogljikov monoksid (CO) in/ali ogljikov dioksid (CO_2). Reformiranje metana s paro je glavni način za obsežno proizvodnjo H_2 . V tem postopku metan (CH_4) in para reagirata s katalizatorjem in tako tvorita sintetični plin, bogat s H_2 . Gre za močno endotermičen postopek, kjer so potrebne visoke temperature za doseg ustreznih stopnje preobrazbe. Pri preobrazbi brez pare se namesto pare CO_2 uporablja kot oksidant. Ta tehnika je zanimiva zaradi možnosti zajema in ponovne uporabe CO_2 iz izpušnih dimnih plinov v elektrarnah in industrijskih obratih.

1.4.1.2 Elektroliza

Pri tem postopku uporabljamo elektriko za razdelitev molekul vode (H_2O) na molekule vodika (H_2) in kisika (O_2)

Elektroliza vode je ena izmed najbolj učinkovitih metod za pridobivanje vodika, ker se uporablja vodo, ki je obnovljivi vir. V tem primeru je voda reaktant, ki je pod vplivom električne energije (enosmernega toka) razpade na vodik in kisik. Prednost elektrolize je tudi to, da z njo proizvajamo precej čist vodik. Trenutno lahko pridobimo le 4% vodika z elektrolizo vode, saj je ta proizvodnja stroškovno precej neugodna. Za ta namen so bili razviti različni sistemi elektrolize vode, in sicer alkalna vodna elektroliza (Alkaline Water Electrolysis – AWE), izmenjava protonov skozi membrano (Proton Exchange Membrane – PEM), alkalna

anionska izmenjevalna membrana (Alkaline Anion Exchange Membrane – AEM), mikro-celice za elektrolizo (Micro Electrolysis Cells – MEC) in elektroliza vode v trdnem oksidu (Solid Oxide Electrolysis – SOE). Vsem naštetim sistemom je skupen princip delovanja, razlikujejo se po različnih uporabljenih materialih in pogojih obratovanja [(Chi & Yu, 2018), (Shiva & Himabindu, 2019)].

1.4.1.3 Proizvodnja vodika s sončno energijo

Pretvorba sončne energije v električno energijo s pomočjo fotovoltaike je pokazala velik potencial za zagotavljanje trajnostne energije, hkrati pa zmanjšala uporabo fosilnih goriv, ki proizvajajo toplogredne pline. S katalitskimi reakcijami lahko sončno energijo uporabimo za pretvorbo v vodik in ostanek spojine Tako lahko razcepimo halogensko kislino (HX), kar je podobno delitvi molekule vode pri elektrolizi. Bromovodikova kislina (HBr) ima pomemben potencial kot poceni surovina za proizvodnjo plinastega vodika na podlagi cepljenja HBr. Vendar nezmožnost pridobivanja energije ponoči ter ob slabšem vremenu predstavlja edinstven izziv (Brady, Sampaio, Wang, Meyer, & Meyer, 2017).

1.4.1.4 Proizvodnja vodika s pomočjo veterne energije

Tehnologija pridobivanja vodika z vetrno energijo velja za "čist in učinkovit način rabe energije". Ta način se uporablja za pridobivanje vodika z elektrolizo v obdobjih presežkov električne energije, ki jih elektroenergetsko omrežje ne more absorbirati ali pa za neposredno pridobivanje vodika z uporabo električne energije, pridobljene s pomočjo vetra, ki pa ni povezana z omrežjem. Tehnologija pridobivanja vodika v vetrnih elektrarnah je v glavnem sestavljena iz vetrne turbine, naprave za elektrolizo vode, naprave za shranjevanje vodika, gorivne celice in električnega omrežja. Kapaciteta shranjevanja vodika se poveča s tehnologijo shranjevanja vodika pod tlakom, s polprevodniško tehnologijo shranjevanja vodika itd. Razvoj proizvodnje vodika se še vedno sooča s številnimi težavami, kot so struktura vetrnih turbin, optimizacija elektrolizatorja za nihanje moči vetra, gorivne celice z dolgo življenjsko dobo in velika zmogljivost opreme za shranjevanje vodika (Li, Guo, R., & Sun, 2018).

1.4.1.5 Foto-biološka proizvodnja vodika

Bio-vodik lahko fermentira iz odpadkov, kar zagotavlja novo metodo ravnanja z organskimi odpadki. Bio-vodik zajema vse proizvodnje H₂, ki vključujejo biološki material (Mohan, 2013). Kot vir energije lahko uporabljamo sončno energijo ali pa jo dobimo iz pretvorbe fiksnih ogljikovih substratov (ali obojega v različnih kombinacijah).

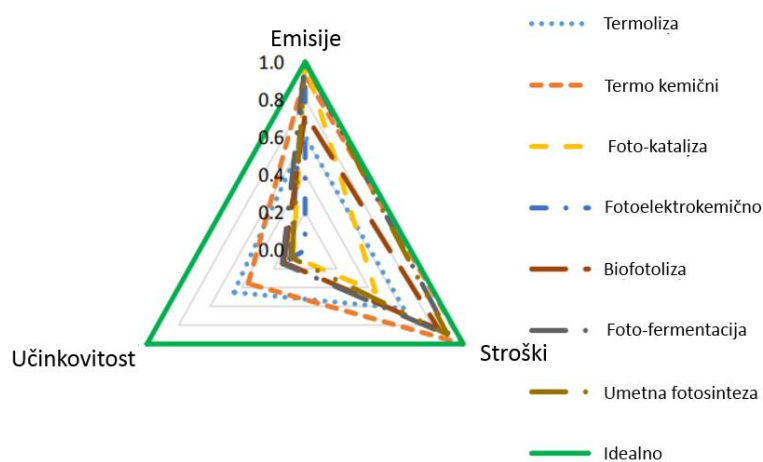
1.4.1.6 Mešana kislinska fermentacija

Fermentacija je odstranjevanje odvečnega metaboličnega reduktanta (NADH) na organske spojine v odsotnosti alternativnih sprejemnih elektronov, kot sta O_2 in NO_3^- (Guo, 2010). Pot "temne fermentacije" mešane kisline paradigme *Escherichia coli* je preprosta, ima visoke stopnje proizvodnje vodika, vendar ima omejitve. Večina fermentacij z mešanimi kislinami sledi podobni shemi: celica tvori zmanjšane končne produkte presnove: organske kisline (vključno s strupenimi formati) in alkohol.

1.4.1.7 Bakterijska fotofermentacija

Vijolične fotosintetske bakterije, ki niso žveplove, proizvajajo vodik iz različnih organskih substratov, vključno z organskimi kislinami (Lazaro, 2012), sladkorji (Keskin, 2012) ter industrijskimi in kmetijskimi odplakami (Saratale, 2013). Visoke količine vodika se pridobivajo iz očetne, maslene in mlečne kisline (Hallenbeck, 2013). Vse bakterije sledijo podobni splošni shemi, pri kateri presnavljajo organske kisline, da reducirajo NAD^+ v celični reduktor NADH [(Kim M. L.-W.-Y., 2013) (Stephen, Archer, Orozco, & Macaskie, 2017)].

Kar zadeva okoljsko učinkovitost, se zdi, da je solarni način pridobivanja vodika najugodnejši vir proizvodnje z oceno 8/10 . Če upoštevamo vsa ekonomska, okoljska, družbena, tehnična merila in merila zanesljivosti, ima veter v povprečju najvišjo uvrstitev (7,40/10). Ob upoštevanju vseh meril učinkovitosti so najbolj ugodni električni sistemi za proizvodnjo vodika (7,60/10), biološki sistemi pa imajo najnižjo uvrstitev (4,80/10). Proizvodnja električne energije na osnovi sonca, s shranjevanjem vodika v nanomaterialih, bi bila lahko okolju najbolj prijazna in trajnostna možnost (Acar & Dincer, 2019).



Slika 14: Primerjava med različnimi postopki pridobivanja vodika na osnovi emisij, učinkovitostjo ter stroški

Vir: Dincer & Acar, Innovation in hydrogen production., 2017

1.4.2 Stroški proizvodnje vodika (decentralizirani, centrirani)

Centralizirana proizvodnja vodika ima višje cene vodika kljub cenejši proizvodnji. Ceno zvišujeta shramba in transport, saj je potrebno proizveden vodik transportirati do porabnikov. V nekaterih načinih transporta pa je potrebno vodik utekočiniti, za kar potrebujemo energijo. Centralizirana proizvodnja največkrat proizvaja vodik s postopkom SMR (steam methane reforming) (Lemus & Martínez Duart, 2010).

Decentralizirana proizvodnja vodika proizvaja vodik na mestu, kjer ga potrebujemo. Ta sistem bi uporabljali na polnilnih postajah, saj v se prihodnih letih vozila na vodik ne bodo uporabljala v veliki meri. V tem prehodnem obdobju se decentralizirana proizvodnja vodika bolj splača, saj je lokacija polnilnih postaj bolj fleksibilna. Ko bodo vozila na vodik postala bolj popularna, pa se bo začel uporabljati centralizirani sistem, saj je proizvodnja cenejša in učinkovitejša (Princerichard, Whale, & Djilali, 2005).

1.5 TRANSPORT V POVEZAVI Z VODIKOM

To poglavje predstavlja možen način za znižanje emisij transportnih naprav v transportnem sektorju s pomočjo vodikovih tehnologij. Ta sektor je zaradi vsakodnevne mobilnosti ter oskrbe prebivalstva z dobrinami in transportom surovin eden izmed največjih onesnaževalcev okolja z izpušnimi plini. Transportni sektor lahko v grobem razdelimo na 5 delov:

- Osebna transportna vozila (avtomobili)
- Javna transportna sredstva (avtobusi in potniški vlaki)
- Tovorni transport (tovorne lokomotive in tovrnjaki)
- Letalski transport
- Vodni transport

1.5.1 Obstoječe stanje cestnega transporta

V zadnjem stoletju se je planet metaforično skrčil, ko se je promet razvijal, da bi ustregel zahtevam prebivalcev. Globalna udeležba pri tej širitvi je bila nesorazmerna, saj je gonilna sila povpraševanja po prevozu na koncu gospodarska rast, kar samo po sebi povzroča povečano potrebo po potovanjih. Promet predstavlja 26 % svetovnih emisij CO₂ in je eden redkih industrijskih sektorjev, kjer emisije še vedno rastejo. Uporaba avtomobilov, cestni tovorni promet in letalstvo so glavni dejavniki emisij toplogrednih plinov v prometnem sektorju

(Chapman, 2007). Da bi svet ostal znotraj varnostnega praga zvišanja povprečne temperature za 2 °C, o katerem so se dogovorile skoraj vse vlade, je potrebno ukrepati tudi na področju sektorja prometa. Dve glavni oviri, ki preprečujeta ta dogovor, sta odsotnost splošnega pravno zavezujočega dogovora in visoki relativni stroški čistih vozil ter energetskih tehnologij. Pariški sporazum, ki države zavezuje k zmanjšanju emisij toplogrednih plinov, je praktično rešil prvi problem in državam odprl pot za uvajanje okoljskih davkov in subvencij, da bi spremenili relativne stroške čistih alternativ, ki bi rešile drugi problem - razogljičen promet. Ti ukrepi politike v kombinaciji z naložbami v čisto infrastrukturo in pravnimi regulativi lahko razogljijajo prometni sektor (Santos, 2017). Toda emisije v cestnem prometu naj bi se povečale do leta 2030, medtem ko bodo emisije iz železniškega sektorja ostale stabilne. Na mednarodni ravni naj bi se delež emisij v cestnem tovornem prometu, merjen v metričnih tonah na km, povečal tudi v EU in ZDA, kar kaže na potrebo po večji učinkovitosti pri rabi energije (Léonardi & Baumgartner, 2004). V avtomobilski industriji so promovirali alternativna goriva in tehnologije kot sredstvo za zmanjšanje intenzivnosti ogljika v prometnem sektorju. Učinkovitejši avtomobili in alternativni pogonski sistemi, kot so električna vozila na baterije (BEV), hibridna električna vozila na gorivne celice in električna kolesa, lahko izboljšajo energetsko učinkovitost in zmanjšajo ogljikovo intenzivnost prevoza (Creutzig, McGlynn, Minx, & Edenhofer, 2011).

1.5.2 Vodik in gorivne celice v povezavi cestnim transportom

Vodik je na področju gorivnih celic za pogon osebnih avtomobilov v igri že najdlje, zato je to področje verjetno tudi najbolj raziskano in dodelano, kar se tiče vodikovih tehnologij. Za pogon osebnih avtomobilov se uporabljajo različne vodikove celice, ki pretvarjajo vodik v električno energijo. Največji tekmeč na trgu so električni avtomobili, ki za shranjevanje energije uporabljajo baterije.

1.5.2.1 Uporaba vodika v osebnih avtomobilih

Električna vozila na gorivne celice imajo mnogo prednosti, kot so nizki stroški goriva in vzdrževanja, nizka raven hrupa in visoka učinkovitost, poleg tega vsebujejo električni motor, ki je za razliko od motorja z notranjim zgorevanjem okolju prijazen. Delijo se na električna vozila, ki uporabljajo samo gorivne celice (kjer se gorivne celice uporabljajo le kot dobavitelj energije) in na hibridna električna vozila z gorivnimi celicami (kjer so gorivne celice povezane z različnimi nosilci energije/shranjevalniki energije). Videti je, da bo število električnih vozil

na gorivne celice hitro narastlo, tako na regionalni kot na nacionalni ravni v skladu z vse manjšimi stroški in naložbami. Z razvojem tehnologije in trenutnimi študijami o električnih vozilih na gorivne celice je očitno, da bo večina tehničnih težav odpravljena v naslednjih desetih letih. Cene teh vozil, ki so pred desetimi leti znašale približno milijon dolarjev, se bodo znatno znižale. V skladu z naraščajočim povpraševanjem in njihovimi prednostmi bodo avtomobilska podjetja povečala svoje naložbe na področju električnih vozil z gorivnimi celicami ter s tem povečala ponudbo in pospešila razvoj tehnologije (İnci, Büyük, Demir, & İlbey, 2021).

Kljub temu da avtomobili na vodikov pogon niso povsem nove rešitve, se vozila FCV še vedno ne uporabljajo pogosto. Prvo vozilo na gorivne celice je bil spremenjeni kmetijski traktor Allis-Chalmers, ki je bil leta 1959 opremljen s 15-kilovatno gorivno celico in pomembnim razvojem tehnologije, ki se uporabljajo v sedanjih vozilih na gorivne celice:

- Hyundai ix35
- Hyundai Tucson
- Toyota Mirai,
- Honda Clarity
- Hyundai Nexo (Turoń, 2020)

Motorji na gorivne celice lahko dosežejo učinkovitost do 60 %, preostanek pa se izgubi kot toplota. Močna prilagodljivost na hitre spremembe obremenitve, visoka učinkovitost pretvorbe energije, ustrezne dinamične lastnosti, majhen hrup pri delovanju in nične emisije iz izpušne cevi so najpomembnejše značilnosti vozil na vodikove celice (Fuel Cell Vehicle – FCV). FCV se lahko primerjajo z vozili z motorji z notranjim izgorevanjem na vodikovo gorivo (H₂ICE vozili) glede časa polnjenja, dosega, pospeška in najvišje hitrost. (Hosseini & Butler, 2019). V kategoriji osebnih avtomobilov imajo FCV močno konkurenco tako z običajnimi vozili z motorji z notranjim izgorevanjem (Internal Combustion Engine – ICE), kot tudi ostalimi električnimi vozili. FCV imajo še vedno tri glavne izzive, ki jih je treba rešiti v prihodnosti: zmanjšanje investicijskih stroškov avtomobilov, razvoj infrastrukture in stabilni politični pogoji, ki dajejo predvidljivo podporo nastajajočim tehnologijam in lahko zmanjšajo tveganja, povezana z dolgoročnimi naložbami (Manoharan, et al., 2019).

S trenutnega vidika bi lahko imele gorivne celice najboljše možnosti za vozila z visoko nosilnostjo, kot so tovornjaki in avtobusi, kjer imajo boljšo zmogljivost v primerjavi z BEV.

Čeprav je trenutni tržni delež avtobusov na gorivne celice še vedno zelo majhen (približno 500 po vsem svetu), nedavne naložbe in zastavljeni cilji kažejo na premik množičnega tranzita k rešitvam mobilnosti z gorivnimi celicami (Ajanovic & Haas, 2020).

1.5.2.2 Uporaba vodika v avtobusnem prevozu oseb

Razvite države so si že leta močno prizadevale za izboljšanje kvalitete zraka v gosto naseljenih mestih ter so zagovarjale potrebo po uporabi alternativnih virov energije za zmanjšanje porabe fosilnih goriv za prevoz. Težka vozila na elektriko oz. vodikove gorivne celice, ki igrajo pomembno vlogo pri transportu, bodo pomembni elementi v kateremkoli načrtu za doseganje ciljev za izboljšanje kakovosti zraka. Obstajajo številne prednosti avtobusa na gorivne celice pred klasičnim avtobusom z motorjem na notranje izgorevanje. Te prednosti pa so predvsem zmanjšanje hrupa v večjih mestih, kjer je to zelo velik problem, ter znatno zmanjšanje emisij toplogrednih plinov. Pojavijo pa se tudi slabe strani, kot so shranjevanje vodika in ostale podobne težave, ki zadevajo vodikove tehnologije. Obstaja nekaj ovir za popolno komercializacijo projektov avtobusov na gorivne celice, saj so začetni stroški takšnih avtobusov veliki. Omejena pa je tudi razpoložljivost vodika, najbolj na področju polnilnih postaj. Večina ovir pa je povezana s trajnostnimi elektroenergetskimi sistemi. Te ovire se lahko premeša s stalnim izboljševanjem vodikovih tehnologij, saj se tudi na ta način posledično zmanjšajo stroški investicije v podobne projekte (Hua in drugi, 2014).

1.5.3 Železniški promet

Trenutno se na dan porabi 85 milijonov sodčkov nafte ter 104 milijarde kubičnih metrov zemeljskega plina, pri čemer se sprosti veliko toplogrednih plinov, ki posledično vodijo v globalno segrevanje. V prihodnosti pa naj bi imel ključno vlogo jedrsko proizveden vodik (Haseli, Naterer, & Dincer, 2008). Javni prevoz je ključ do čistega okolja v prihodnosti, zato je na tem področju najprej treba začeti iskati rešitve do zmanjšanja emisij. Uporaba vodikovih tehnologij na železnicah pa ni novost, saj sta že leta 1984 Steinberg in Scott predstavila primerjavo porabe goriva lokomotive na vodik ter navadne dizelske lokomotive. Izvedenih pa je bilo že kar nekaj projektov za vlake na vodik, kjer so tudi pretvorili dizelsko lokomotivo v vlak na vodikove celice (Andrews & Shabani, 2012).

Elektromotorje vozila napaja hibridna enota, sestavljena iz vodikovih gorivnih celic in sklopa z visoko hitrostnim sistemom za shranjevanje energije. Tehnologija je bila razvita, da bi

zmanjšali porabo goriva. Trenutno je vodik zmožen znižati porabo goriva za kar 48 % v primerjavi s fosilnimi gorivi (D'Ovidio, Ometto, & Valentini, 2020).

Vlak na gorivne celice je močna alternativa za regionalne vlake na območjih, kjer v posebnih primerih ni obstoječe električne mreže. Za premagovanje dizelskih vlakov pa so potrebne takse do 120 EUR na tono CO₂, odvisno od regije in primerjalnih stroškov vodika in dizelskega goriva. Analiziran je bil primer štirih vlakov, ki so potovali na razdalji 100 km in opravili skupno 24 povratnih potovanj na dan. Kot nizkoogljica alternativa je bil vlak z gorivnimi celicami primerjan z električnim kontaktnim vlakom, tako z obstoječimi zračnimi vodniki kot tudi brez njih. Za običajne razmere pa so primerjali vlake z motorji z notranjim zgorevanjem. Niso pa bili upoštevani vlaki, ki jih poganjajo akumulatorji z možnostjo polnjenja, kar je seveda mogoče, vendar bo to zahtevalo tehnološki razvoj in znatne naložbe v polnilno infrastrukturo na več lokacijah. Vlak z vodikovimi gorivnimi celicami je najprimernejši za daljše, razmeroma nizkofrekvenčne poti, s kratkimi izpadi in omejenim časom za polnjenje akumulatorja, ter poti, ki še niso elektrificirane. Tekoči projekti že obstajajo, zainteresirane strani pa so napovedale še več. Na primer v Nemčiji že obratujejo takšni vlaki, vzhodno-japonska železniška družba pa je napovedala, da bo razvila vlake na vodikove gorivne celice s predvideno dostavo leta 2024 (Hydrogen Council, 2020).

1.5.4 Vodni promet

Pomorski promet se že nekaj let sooča s problemom in pritiskom, da bi zmanjšal emisije toplogrednih plinov v skladu s Pariškim sporazumom. To se je leta 2018 še posebej odrazilo, ko je mednarodna pomorska agencija sprejela strategijo, ki se osredotoča na energetske učinkovitost, njihov cilj pa je čim hitreje zmanjšati emisije toplogrednih plinov ter postopno uvajanje plovil brez emisij. Zato je potrebna uvedba alternativnih energetskih rešitev. Tako je treba razviti brezogljicne rešitve, kot so utekočinjen zemeljski plin, biogoriva, elektrika ali vodik. Čeprav so te energetske rešitve v glavnem nove v pomorskem prometu, niso nujno nove za svet ali druge sektorje in se precej razlikujejo tudi po zrelosti in ustreznosti za različne naloge znotraj ladijskega prometa (Bicer, 2018).

Pomorski sektor danes oddaja približno 2,5 % svetovnih emisij ogljika, kar ustreza 940 Mt letno. Mednarodna pomorska organizacija (IMO) se je zavezala, da bo do leta 2050 zmanjšala emisije za 50 % ali več, pri čemer obstaja več poti do razogljichenja. Na večjih ladjah naj bi se uporaba fosilnih goriv menjala z uporabo utekočinjenega zemeljskega plina, tekočega

amonijaka ali sintetičnega goriva na osnovi vodika, na manjših pa bi se uporabljale vodikove gorivne celice. Utekočinjeni zemeljski plin verjetno ni najprimernejša dolgoročna možnost - čeprav je čistejši od ladijskega dizelskega goriva, ne ponuja nične emisije. Lahko pa služi kot prehodni mehanizem, dokler se ne pojavijo tehnologije, ki naredijo goriva na osnovi vodika bolj ekonomsko privlačna (Hydrogen Council, 2020).

Za manjše ladje z motorno močjo manj kot 2 megavata (MW), kot so potniški trajekti ali trajekti, ki imajo prostor za manj kot 100 avtomobilov in tudi tiste do 4 MW, vodikove gorivne celice ponujajo potencialno alternativo v bližnji prihodnosti. Pravzaprav lahko vodik služi kot konkurenčna nizkoogljična alternativa električnim trajektom pred letom 2030, saj slednji zahteva drage velike baterije in s tem povezane polnilne in infrastrukturne elemente. Vodikovi potniški trajekti so še posebej konkurenčni v primerih, ko kratki časi pristajanja ne omogočajo dovolj časa za polnjenje akumulatorja. V takšnih primerih bo operater trajekta morda moral kupiti dodatne električne baterije na akumulator, da bo ohranil zahtevano raven storitev, kar bo skoraj podvojilo skupne stroške. Trajekti z gorivnimi celicami so privlačna alternativa tudi tam, kjer je omrežna povezava šibka in zahteva znatno nadgradnjo, ki omogoča hitro polnjenje ladijske baterije, ali kopno za polnjenje ladje, kar je draga rešitev. Tudi biodizel je nizkoogljična alternativa, ki naj bi bil bolj konkurenčen do leta 2030. Vendar pa bi ladja z vodikovimi gorivnimi celicami lahko postala konkurenčna do leta 2035, saj se stroški gorivnih celic in vodikovega goriva po povečanju druge mobilnosti zmanjšujejo (Hydrogen Council, 2020).

1.5.5 Letalski promet

V zadnjih letih se je letalski promet zelo povečal. Posledično so se povišala tudi povpraševanja po energiji, da letalski promet sploh lahko deluje, s tem pa so se povišali tudi negativni vplivi na okolje. Viri fosilnih goriv so omejeni, zato je človeštvo prisiljeno iskati druge vire energije, če hoče živeti po standardih, kot smo jih navajeni. V nasprotnem primeru nas čakajo katastrofalne posledice. Eden virov, ki obljublja največ, je tekoči vodik. Vodik je najbolj razširjen element v galaksiji in tudi najbolj čist. Ob reakciji zgorevanja s kisikom se proizvaja potisk. Kljub temu da je tekoči vodik čist, ima pri izgorevanju pri visokih temperaturah nekaj nevarnih emisij, kot so NO_x , ampak enako je pri fosilnih gorivih. Emisije NO_x sicer ne povzročajo toplogrednega učinka kot CO_2 , ki porablja ozon v ozonosferi. Emisije NO_x , ki nastanejo kot posledica izgorevanja tekočega vodika (LH_2), imajo manj negativnih učinkov v primerjavi z emisijami, ki se sproščajo pri izgorevanju kerozina. Tudi te emisije NO_x je mogoče

zmanjšati s preoblikovanjem motorjev in znižanjem višine leta za 2–3 km od višine, na kateri danes letijo potniška letala. Pri letalski industriji je problem, da so sistemi za kontrolo nad tekočim vodikom zelo zapleteni. Tekoči vodik moramo shranjevati pri temperaturi 24 K ter takšno temperaturo zagotavljati tudi med uporabo. Vodikove cisterne pa še povečajo težo, saj moramo tekoči vodik primerno varovati (Yilmaz, Ilbas, Tastan, & Tarhan, 2012).

Današnja letala letijo na standardno reaktivno gorivo (kerozin), ki oddaja 3,15 kg ogljikovega dioksida na kg goriva. To pomeni približno 360 ton ogljika za deseturno potovanje z Boeingom 747, celoten sektor pa letno odda približno 3 % svetovnih emisij ogljika ali približno 0,75 milijona ton na leto (Hydrogen Council, 2020).

Kerozin je idealno gorivo za letenje: je izjemno lahek, merjen z energijsko vsebnostjo, pa tudi gost in za shranjevanje energije zahteva malo prostornine. Nasprotno pa je zelo težko elektrificirati letalo. Za lete na kratke razdalje (do 800 km) na majhnih letalih (do 20 potnikov), brezpilotni letalih in letalih, ki vzletajo navpično, so vodik in gorivne celice izvedljiva možnost in jih danes že preizkušajo. Letala na gorivne celice teoretično zahtevajo manj vzdrževanja, saj ne proizvajajo toplote in vibracij kot obstoječe letalske turbine. Te so razmeroma drage (majhna turbina stane med 0,5 in 1 milijon USD) in zahtevajo pogosto vzdrževanje. Letala na gorivne celice so tudi bistveno manj hrupna in lahko ponudijo boljše izkušnjo letenja. Vendar večina emisij v letalstvu izvira iz letov na dolge razdalje. Za velika letala, ki se uporabljajo na teh poteh, je najbolj realna možnost razogljichenja nadomestitev kerozina iz fosilnih virov s petrolejem, ki v ozračje ne vnaša novega ogljika. Ena od možnosti je uporaba biogoriv (bio-kerozin), druga je proizvodnja sintetičnega kerozina iz vodika. Sintetično gorivo je tekoče gorivo, pridobljeno iz mešanice vodika in ogljikovega monoksida, za katerega sta potrebna vodik in ogljikova surovina. Ker sta biokerozin in singorivo kemično podobna običajnemu kerozinu, ju je mogoče "spustiti v rezervoar za gorivo" in ju shraniti, prevažati in uporabljati kot običajen kerozin. To olajša prehod na ta goriva, saj se lahko uporabljajo obstoječa infrastruktura in letala (Hydrogen Council, 2020).

1.5.6 Druge transportne tehnologije – viličarji

Vodikove gorivne celice so začele nadomeščati svinčeve baterije kot vir energije za komercialne skladiščne viličarje. Skladiščenje stisnjenega vodikovega plina na krovu skupaj z oskrbo z gorivom v zaprtem skladišču povzroča nove operative zahteve, ki jih je treba upoštevati pri razvoju varnostnih smernic. Eden izmed glavnih problemov je možnost nesreče

v skladišču ali drugem zaprtem prostoru, kjer bi lahko prišlo do izpusta vodika iz visokotlačnega plinskega rezervoarja (Houf, Evans, Ekoto, Merilo, & Groethe, 2013). Po drugi strani pa so baterijski viličarji stroškovno ugodnejša možnost, saj je njihova polnilna infrastruktura veliko cenejša za postavitev. Viličar na akumulator potrebuje samo baterijo in polnilnik za delovanje, toda viličarji na gorivne celice potrebujejo elektrolizer, kompresor, rezervoar in infrastrukturo za polnjenje (Haghi, Shamsi, Dimitrov, Fowler, & Raahemifar, 2020).

1.6 ENERGETIKA IN INDUSTRIJA

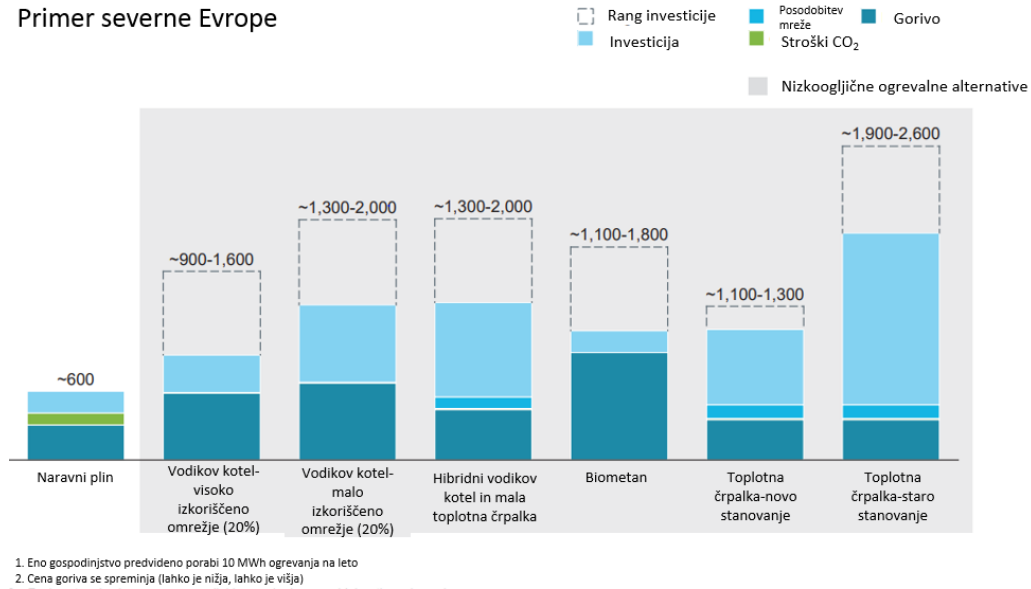
Toplota in energija za stavbe predstavljata več kot tretjino svetovnega povpraševanja po energiji (118 EJ) in četrtno svetovnih emisij ogljika (8,67 Gt CO₂). Ta sektor je težko razogljčiti, zlasti pri ogrevanju, kjer obstaja le nekaj nizkoogljičnih alternativ zemeljskemu plinu (najpogostejšemu energentu za ogrevanje). Od teh spadajo rešitve na osnovi vodikovih tehnologij med stroškovno najučinkovitejše in najbolj prilagodljive načine za prehodno obdobje (Hydrogen Council, 2020).

1.6.1 Ogrevanje gospodinjstev

Kotli za ogrevanje na vodik v plinastem agregatnem stanju so lahko nizkoogljična alternativa ogrevanju na zemeljski plin, saj se lahko v primeru obstoječega infrastrukturnega omrežja v veliki meri uporablja isto - od cevovodov do samih kotlov. Stroški kotlov bi se lahko do leta 2030 zmanjšali na približno od 900 do 1.600 USD na gospodinjstvo, podobno kot pri kotlih na zemeljski plin. To bi ogrevanje na osnovi vodika postavilo na raven raztopin biometana in toplotnih črpalk za nove stavbe. Ogrevanje na osnovi vodika bi postalo tudi bolj konkurenčno kot toplotne črpalke za starejše zgradbe, ki zahtevajo še znatne stroške prenove inštalacij (Slika spodaj). Upoštevati je potrebno, da so razponi teh ocen veliki, saj lahko TCO (skupni stroški) niha zaradi več dejavnikov, kot so lokalne podnebne razmere, natančne zahtevane nadgradnje infrastrukture in različni stroški spremljanja prenove stanovanja (Hydrogen Council, 2020).

Ogrevanje gospodinjstev
\$/leto na gospodinjstvo v 2030 (poraba 10 MWh/leto)

Primer severne Evrope

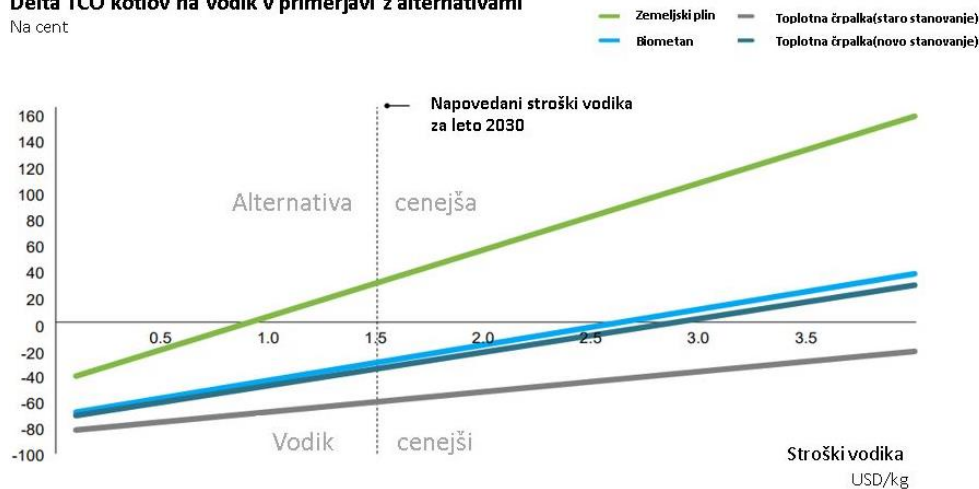


Slika 15: Struktura stroškov (\$/leto) za ogrevanje gospodinjstev v letu 2030 (predpostavka energetske porabe 10 MWh/leto)

Vir: Hydrogen Council, 2020

Delta TCO kotlov na vodik v primerjavi z alternativami

Na cent



Slika 16: Izenačitev stroškov vodikovih kotlov v primerjavi z drugimi alternativnimi načini ogrevanja v odvisnosti od cene vodika

Vir: Energy, 2015

Padajoči stroški dobavljenega vodika so lahko ključno gonilo konkurenčnosti različnih vodikovih aplikacij. Tako so vodikovi kotli konkurenčnejši od toplotnih črpalk v primeru prenovljenih bivalnih prostorov, če stroški vodika padejo na 5,4 USD na kg. Lahko so konkurenčnejši od biometana in toplotnih črpalk pri novogradnjah, če se stroški vodika spustijo na približno 3 USD na kg. To predstavlja jasen cilj stroškov proizvodnje vodika za prihodnja

ogrevalna omrežja. Vendar nobena od nizkoogljičnih možnosti verjetno ne bo premagala zemeljskega plina zgolj po stroških. Kot je prikazano na sliki 29, se lahko uporaba vodika za ogrevanje stroškovno izenači z ogrevanjem na zemeljski plin le, če stroški vodika padejo pod 1 USD na kg. Ključnega pomena bo zakonska regulativa za podporo nizkoogljičnim tehnologijam. Pobude za to se že vršijo v ZDA, Kanadi, Veliki Britaniji in na Nizozemskem [(Hydrogen Council, 2020), (Valente, Iribarren, Luis Gálvez-Martos, & Dufour, 2019)].

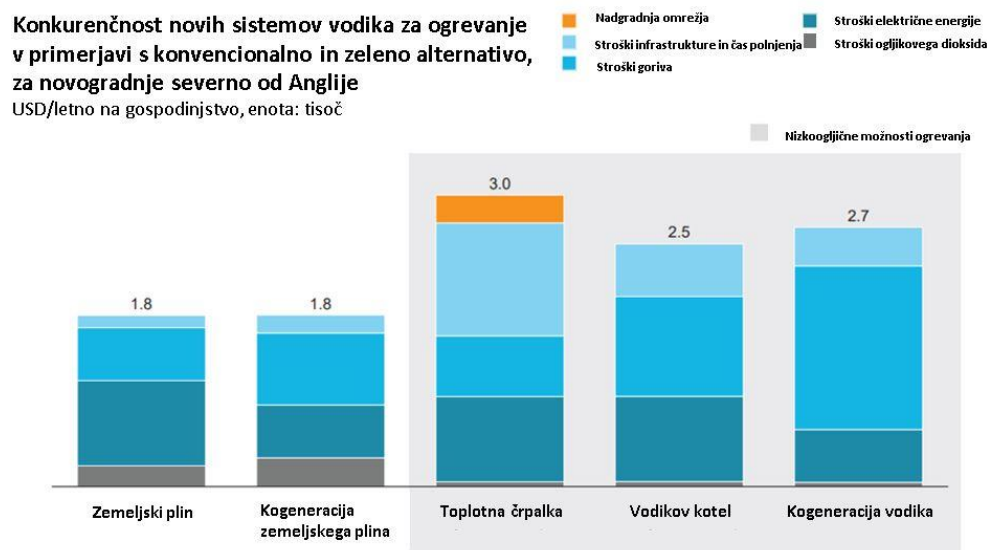
Razvoj ogrevalnega omrežja na osnovi vodika z uporabo obstoječega omrežja zemeljskega plina prinaša tudi druge koristi za zmanjšanje stroškov. Večja izkoriščenost vodikovih ogrevalnih omrežij zmanjšuje stroške. Prelomna točka stroškovne učinkovitosti se zgodi ob 80-odstotni izkoriščenosti. To je olajšano v primeru uporabe obstoječega omrežja zemeljskega plina s povezavo do končnih uporabnikov. Stroški bi se lahko še znižali, če bi se na to omrežje priključili še industrijski uporabniki in polnilne postaje. Na primer, če bi dodali dve jeklarni, ki proizvajata 500.000 ton jekla letno (56.000 ton vodika na leto), bi se stroški omrežja na posamezno gospodinjstvo zmanjšali za približno 78 USD, s 380 USD na leto na približno 300. V nasprotnem primeru, če bi povečali uporabo toplotnih črpalkah na 80 % populacije, bi to znatno povečalo povpraševanje po električni energiji, s čimer bi dodatno obremenili električno omrežje. To bi zahtevalo nadgradnje omrežja, kar bi povečalo stroške ogrevanja vsakega gospodinjstva (Li, Roche, Paire, & Miraoui, 2017).

Omrežje vodikovih cevi lahko zagotovi skladiščenje vodika, kar omogoča učinkovitejše upravljanje z največjimi povpraševanji in presežki električne energije v povezavi s proizvodnjo vodika iz presežkov električne energije (Hydrogen Council, 2020), (Moradi, 2019).

Opcija mešanja vodika v omrežje zemeljskega plina je potencialna prehodna alternativa. Na primer do 20-odstotni delež vodika v mešanici v omrežje zemeljskega plina je mogoče doseči brez večjih sprememb cevovoda inštalacij v gospodinjstvih, s čimer nastanejo razmeroma minimalni investicijski stroški. Za 5-odstotno mešanico bi lahko letno prihranili od 32 do 58 kg CO₂ na gospodinjstvo, ki porabi od 10 do 18 MWh na leto. Ob predpostavki 3,3 milijona gospodinjstev z ogrevanjem na zemeljski plin lahko tako letno prihranimo približno 200.000 ton CO₂ (Hydrogen Council, 2020), (Lo Basso, 2017).

Vodikove gorivne celice za kogeneracijo (skupno pridobivanje toplote in električne energije – SPTE) so še ena nizkoogljična alternativa, ki proizvaja električno energijo iz gorivnih celic, nato pa pretvarja in uporablja toploto kot stranski proizvod procesa za ogrevanje sanitarne tople vode, ogrevanje prostorov in/ali hlajenje stanovanjskih in poslovnih stavb. Stroškovna

primerjava vodikove SPTE z nizkoogljičnimi aplikacijami (kotli na vodik in toplotne črpalke) in alternativami na zemeljski plin (kotel ter električna energija in kogeneracija na zemeljski plin) za primer novogradnje na severu Anglije, ki ima skupne površine 120 m² in letno porabi 7,5 MWh električne energije in 18 MWh toplote, kaže, da je vodikova SPTE lahko izvedljiva alternativa vodikovim kotlom in toplotnim črpalkam do leta 2030, ko stroški vodika znašajo približno 1,9 USD na kg. Skupni stroški obratovanja SPTE na gospodinjstvo bi na leto znašali 2.700 USD, kar bi se uvrstilo med nekoliko cenejše vodikove kotle in nekoliko dražje možnosti toplotne črpalke, če upoštevamo potrebne nadgradnje omrežja (Hydrogen Council, 2020).



Slika 17: Stroškovna konkurenčnost vodikovih celic za SPTE z ostalimi zelenimi alternativami

Vir: Energy, 2015

1.6.2 Toplota in električna energija za potrebe industrije

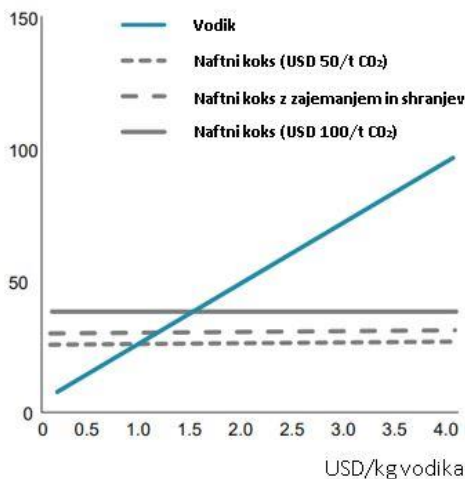
1.6.2.1 Toplota v industriji

Uporaba toplote v industriji je razvrščena v tri temperaturna območja: nizko-temperaturno do 100 °C, srednje-temperaturno od 100 do 400 °C in visoko-temperaturno, ki presega 400 °C. Trenutno so predvsem fosilna goriva (premog, zemeljski plin) in električna energija (uporovno ogrevanje ali toplotne črpalke) tisti viri, ki pokrivajo povpraševanje po industrijski toploti. Razogljičenje v tem sektorju bi lahko dosegli z neposredno elektrifikacijo, biomaso ali zajemom CO₂ v primeru uporabe fosilnih goriv (Parra, Valverde, Pino, & Patel, 2019), (Hydrogen Council, 2020).

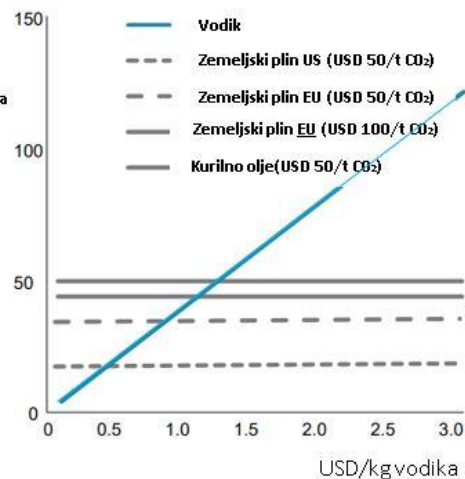
Pri proizvodnji toplote v nizko-temperaturnem območju je elektrifikacija najcenejša možnost razogljčenja, zato vodik v tem primeru verjetno ne bo igral pomembne vloge. Za proizvodnjo toplote v srednje- in visoko-temperaturnih območjih je možno uvajati biomaso, vendar je mnogo regij omejenih z oskrbo. Uporaba fosilnih goriv z zajemom CO₂ je prav tako smiselna le v regijah, ki omogočajo njegovo shranjevanje. Kjer biomasa ali zajem ogljika in njegovo shranjevanje niso na voljo, ostaneta vodik in električno ogrevanje edini dve nizkoogljčni rešitvi za proizvodnjo toplote srednje- in visoko-temperaturnega območja (Hydrogen Council, 2020).

Primerjava vodika z drugimi energenti kaže, da se morajo njegovi stroški znižati pod približno 1,10 USD na kg, da bo leta 2030 konkurenčen naravnemu plinu ali premogu, ob predpostavki plačila 50 USD na tono proizvedenega CO₂. Lahko se tudi zvišajo na 1,50 USD na kg, če nastali stroški dosežejo 100 USD na tono proizvedenega CO₂. V primerjavi z biomaso bi moral vodik prag rentabilnosti doseči s stroški od 2 do 3 USD na kg, kar je odvisno od lokalnih virov in dobave biomase (Hydrogen Council, 2020).

Visokokakovostna toplota: proizvodnja cementa vodik v primerjavi z alternativami
USD/tono cementa



Srednjekakovostna toplota: PTA proizvodnja vodik v primerjavi z alternativami
USD/tono PTA



Slika 18: Stroškovna konkurenčnost vodika na dveh primerih potrebe po proizvodnji toplote

Vir: (Hydrogen Council, 2020)

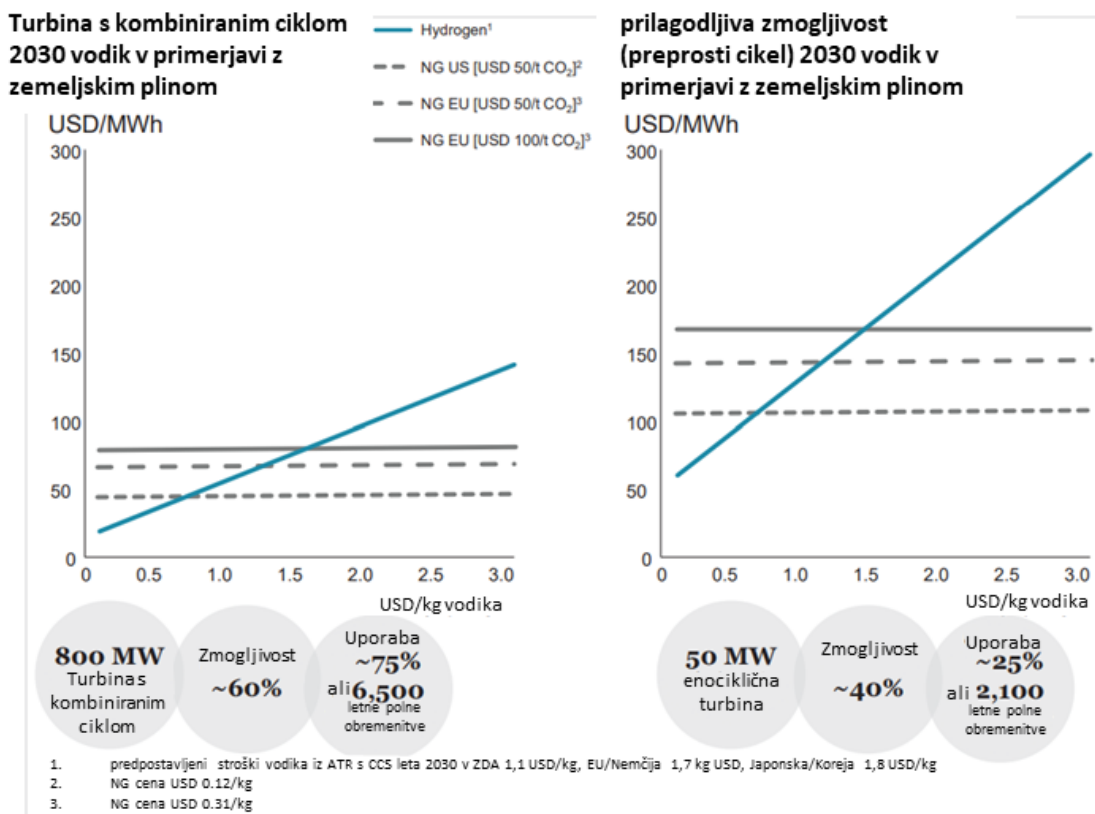
1.6.2.2 Turbine za proizvodnjo električne energije

Elektroenergetski sistemi morajo zraven dobave energije zagotavljati tudi prilagodljivost sistema. Električno energijo danes pridobivamo predvsem s toploto, pridobljeno iz fosilnih

goriv. Le-to vedno bolj nadomešča uporaba obnovljivih virov energije – veter in sončna energija že predstavljata več kot 50 % novih povečanj zmogljivosti (McKinsey & Company, 2019). Z naraščajočim deležem proizvodnje energije iz obnovljivih virov energije se povečuje pomen prožnosti proizvodne zmogljivosti. Današnjo prilagodljivost se zagotavlja predvsem na osnovi proizvodnje energije iz fosilnih goriv ter črpalnih hidroelektrarn, kjer je to izvedljivo. Baterije nudijo možnost kratkoročne prilagodljivosti (običajno od 2 do 4 ure) z letno visokim številom ciklov (več kot 300). Turbine na vodikov pogon so lahko v pomoč pri zagotavljanju ravnovesja in prilagodljivosti omrežja, saj se shranjeni vodik lahko uporablja za proizvodnjo nizkoogljivične električne energije, kadar je potreba največja (Hydrogen Council, 2020).

Cenovno je vodik pri osnovni oskrbi z električno energijo konkurenčen le v področjih, kjer alternativni načini (fosilna goriva z zajemom CO₂ ali biomasa) niso dosegljivi. V takih primerih bi ga podjetja lahko uvažala in ga uporabljala za pogon turbin. Za domnevno uvozno ceno 3 USD na kg vodika znašajo stroški na proizvedeno MWh električne energije približno 140 USD. Večjo vlogo lahko igra pri zagotavljanju prožnosti sistema tako za kratkoročno večurno uravnoteženje z vodikovimi turbinami kot za večdnevno ali tedensko proizvodnjo s plinskimi turbinami s kombiniranim ciklom (CCGT), ko je proizvodnja energije iz obnovljivih virov nizka. Na ta način lahko vodik deluje kot blažilnik in nudi možnost dolgoročnega shranjevanja za elektroenergetski sistem. Kot prehodna rešitev lahko mešanje vodika z zemeljskim plinom v obstoječih turbinah omogoči kar 10-odstotno zmanjšanje CO₂, in sicer za 30-odstotno količino vodika (Hydrogen Council, 2020).

Ekonomičnost tovrstne proizvodnje lahko ponazorimo z naslednjim primerom: če stroški proizvodnje vodika iz poceni obnovljivih virov znašajo 25 USD na MWh s faktorjem zmogljivosti 50 %, to doprinese k skupnim proizvodnim stroškom v znesku 1,70 USD na kg proizvedenega vodika. V primeru shranjevanja vodika pod zemljo se temu doda še približno 0,30 USD na kg, tako da znašajo skupni stroški vodika 2 USD na kg. Če se ta vodik nadalje uporablja za pridobivanje električne energije, nastanejo skupni stroški med 100 do 200 USD na proizvedeno MWh električne energije. V idealnih pogojih (npr. turbina CCGT s 60-odstotno izkoriščenostjo) znašajo stroški proizvodnje 100 USD na MWh, medtem ko pri vodikovih turbinah s preprostim ciklom in s 25-odstotno izkoriščenostjo proizvodni stroški znašajo 200 USD na MWh električne energije (Hydrogen Council, 2020).



Slika 19: Primerjava stroškov med proizvodnjo električne energije iz vodika in zemeljskega plina

Vir: Hydrogen Council, 2020

Ta analiza kaže na dve ključni ugotovitvi. Prvič, da podjetja v smislu visoke prilagodljivosti za proizvodnjo električne energije primarno uporabljajo vodik, in drugič, da potrebuje proizvodnja električne energije na osnovi vodika za namen globokega razogljčenja, v primerih z omejenimi obnovljivimi viri energije, močno politično podporo (Hydrogen Council, 2020).

1.6.2.3 Generatorji za rezervno proizvodnjo električne energije

Generatorji se uporabljajo kot rezervno napajanje, kjer je pomembno zagotoviti delovanje v vseh pogojih, npr. v bolnišnicah ali v podatkovnih centrih. Uporabljajo se tudi za proizvodnjo električne energije na oddaljenih lokacijah, npr. za napajanje telekomunikacijskih stolpov ali zgradb, ki so daleč od električnega omrežja (Hydrogen Council, 2020).

Danes generatorji temeljijo predvsem na dizelskem gorivu in oddajajo približno 700 kg CO₂ na MWh proizvedene energije. Generatorji lahko temeljijo tudi na zemeljskem plinu, ki oddaja sorazmerno manj ogljika in delcev kot dizelski. V smislu razogljčenja ozračja so biogoriva, polnilne baterije in vodikove gorivne celice, ki temeljijo na nizkoogljčni proizvodnji ali proizvodnji vodika iz obnovljivih virov energije, alternative današnjim generatorjem.

Generatorji, ki za pogon uporabljajo vodikove gorivne celice, so izvedljiva alternativa za rezervno proizvodnjo električne energije, npr. v bolnišnicah in tudi na oddaljenih lokacijah, kjer akumulatorjev in obnovljivih virov zaradi neoptimalnih pogojev ni moč uporabiti. Na območjih, kjer so pogoji za proizvodnjo energije iz obnovljivih virov dobri, je baterija za shranjevanje energije lahko najcenejša nizkoogljična alternativa. Alternativa temu je, da lahko na mestu obnovljivega vira energije proizvajamo vodik, katerega presežek lahko izvozimo (Hydrogen Council, 2020).

Analiza postavitve rezervnega generatorja na gorivne celice za napajanje z močjo 1 MW npr. za bolnišnico, na podlagi nižjih kapitalskih stroškov za vodikov kot za akumulatorski sistem ter nizke predvidene izkoriščenosti tovrstnega sistema v obsegu dveh odstotkov letno, kaže na večjo upravičenost uvedbe generatorja na gorivne celice (Hydrogen Council, 2020).

Analiza pridobivanja električne energije na oddaljenih lokacijah v primeru telekomunikacijskega stolpa, ki zahteva stalno napajanje 5 kW, pove, da so najpomembnejši dejavnik stroški goriva zaradi visoke izkoriščenosti sistema, stroškovna konkurenčnost pa je zelo odvisna od lokacije, stroškov akumulatorja in stroškov obnovljive energije. Vodik je najprimernejši, kadar so pogoji za obnovljivo proizvodnjo na kraju samem neoptimalni. Na primer vodikova alternativa je za več kot 40 % nižja kot sončna elektrarna in akumulator v Edinburgu. V primeru lokacije v južni Španiji bo leta 2030 generator vodikovih gorivnih celic približno 30 % dražji. Zelo težko bo tudi izenačiti stroške vodika, dostavljenega na zelo oddaljeno lokacijo, če bi cena znašala 6 USD na kg. Tako bo stroškovno zelo težko doseči, da bi rezervni generator na gorivne celice nadomestil dizelski generator, saj so v tem primeru višji tako kapitalski izdatki za sistem gorivnih celic in rezervoarja kot tudi stroški goriva. Leta 2030 bodo stroški vodikovega sistema dvakrat višji kot za dizelski sistem. V primeru cene 3 USD na dobavljeni kilogram vodika bi bilo potrebno za konkurenčnost generatorja na gorivne celice uvesti takso v višini 200 USD na tono proizvedenega CO₂ (Hydrogen Council, 2020).

Stroški gorivnih celic in rezervoarjev za vodik naj bi se do leta 2030 znižali za do 70 %, kar bo vplivalo na večje tržne količine gorivnih celic in rezervoarjev v več aplikacijah. Zmanjšanje stroškov sistemov gorivnih celic in rezervoarjev predstavlja približno 50 % znižanja stroškov v primeru sistema rezervnega generatorja in le približno 10 % v primeru sistema oddaljenega generatorja. Stroški dobavljenega vodika naj bi se znižali za približno 20 do 40 odstotkov. Pri generatorju na oddaljeni lokaciji izboljšanje stroškov vodikovega goriva pomeni približno 90 % celotnega zmanjšanja stroškov med letoma 2020 in 2030 (Hydrogen Council, 2020).

1.6.3 Vodik kot industrijska surovina

Več kot 90 % (Institute for Industrial Productivity, 2019) danes porabljenega vodika se izkorišča kot industrijska surovina, v veliki večini proizvedenega iz fosilnih goriv. Za procese, kot sta proizvodnja ter rafiniranje amonijaka in metanola, je potreben vodik, zato je edini način za razogljičenje sprememba vira pridobljenega vodika iz sivega v zelenega (Hydrogen Council, 2020).

Primer tovarne amonijaka, ki letno proizvede 1 Mt amonijaka, ob čemer porabi 200 kilo ton vodika, katerega proizvodnja bi zahtevala 1,7 GW zmogljivosti elektrolizerja, upoštevajoč 50 % izkoristek. Obrat takšnega obsega bi lahko igral ključno vlogo pri potrebnem povečanju proizvodnje vodika. Vendar takšni projekti pogosto vključujejo premalo subjektov v postopek odločanja in ne zahtevajo sistemske spremembe, ki lahko pospeši uporabo vodika v drugih sektorjih, kot sta transport ali ogrevanje prostorov. Tudi pri vodiku kot surovini v industrijskih procesih je ključnega pomena znižanje stroškov njegove proizvodnje. Njegova končna cena bo odvisna od lokacije proizvodnje vodika in razpoložljivih energentov za njegovo proizvodnjo, ki bi lahko vključevali obnovljive vire energije ali zemeljski plin in zmogljivosti za shranjevanje ogljika (Hydrogen Council, 2020).

CO₂ takse, naložene običajnim proizvodnim sistemom, predstavljajo dodatno konkurenčno prednost vodika. V regijah, kot so ZDA, Bližnji vzhod in Južna Evropa, se bodo obstoječe nizkoogljične industrije z vodikovimi surovinami verjetno izenačile tudi s sivim vodikom, tudi s CO₂ taksami precej pod 50 USD na tono. Zaradi tega je ta industrijska izredno privlačen sektor za uporabo nizkoogljičnega vodika (Hydrogen Council, 2020).

1.6.3.1 Obstoječe industrije, ki uporabljajo vodik kot surovino

1.6.3.1.1 Proizvodnja in rafiniranje amonijaka

Približno 80 % proizvedenega amonijaka se uporablja za proizvodnjo gnojil s končnimi proizvodi, kot sta sečnina ali NPK (dušikova, fosforna in kalijeva gnojila). Za proizvodnjo amonijaka se uporablja vodik, pridobljen s pomočjo parne preobrazbe metana (SMR) ali uplinjanja premoga, oba pa na tono proizvedenega amonijaka prispevata približno 2,5 tone CO₂ [(Institute for Industrial Productivity, 2019), (Plastics Europe., 2019)].

Zelena proizvodnja amonijaka ima višje kapitalske stroške za približno 70 % zaradi potrebe po dodatni enoti zračne separacije za oskrbo z dušikom. Vendar to povzroči le za približno 20 USD dodatnih stroškov na tono proizvedenega amonijaka, kar pomeni 7-odstotno povečanje

njegove tržne cene (na 300 USD za proizvedeno tono). V kolikor postane vodik, proizveden s pomočjo elektrolize, edini vir za proizvodnjo amonijaka, je potrebno zagotoviti tudi način in kapacitete za njegovo skladiščenje, zato da se zagotovi varnost glede njegove razpoložljivosti pri proizvodnem procesu (Hydrogen Council, 2020).

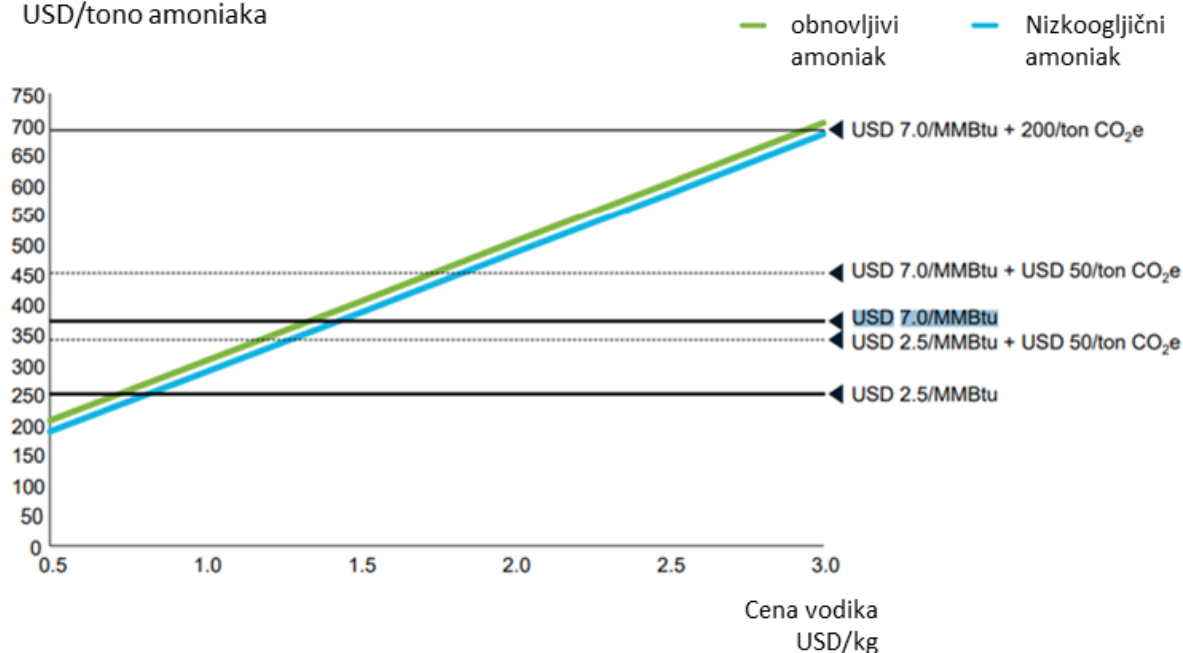
V področjih s ceno zemeljskega plina 2,5 USD na MMBtu (Milion British Thermal Units) bi morala cena vodika znašati 0,7-0,9 USD na kg za izenačitev stroškov proizvodnje, kar je za bližnjo prihodnost malo verjetno. Če zemeljski plin obdavčimo s 50 USD na tono proizvedenega CO₂, cena vodika lahko znaša 1,2-1,3 USD na kg sivega vodika. To je možno v območjih in regijah z ugodnimi pogoji za izkoriščanje obnovljivih virov energije ali cenami zemeljskega plina približno 3 USD na MMBtu (Hydrogen Council, 2020).

V regijah z višjimi cenami zemeljskega plina, 7 USD na MMBtu, na primer v Evropi, znašajo stroški amonijaka iz običajne parne preobrazbe metana (SMR) približno 370 USD na tono. Izenačitev stroškov proizvodnje zahteva ceno sivega vodika od približno 1,40 do 1,50 USD na kg, skupaj s CO₂ takso 50 USD na tono se povečajo na 1,70-1,80 USD za kg. Povišanje stroškov ogljika na 200 USD na tono CO₂ za scenarij 7 USD na MMBtu, poveča stroške običajnega amonijaka na 690 USD na tono. V tem primeru bi bila sivi in zeleni vodik skoraj zagotovo poceni možnosti v vseh regijah s proizvodnimi stroški 3 USD na kg nizkoogljirnega ali zelenega vodika (Hydrogen Council, 2020).

Rafiniranje je po strukturi stroškov zelo podobno proizvodnji amonijaka, saj temelji na SMR, vodik pa je edina učinkovita možnost razogljirnjenja. Razlika v stroških je v dodatni enoti za zračno separacijo, ki je potrebna za amonijak, kar ima za posledico nekoliko višje izkoristke vodika za amonijak (približno 5-odstotna razlika). Poleg tega lahko rafinerija z reformo nafte pokrije tudi del potrebe po vodiku, kar lahko zmanjša potrebo po skladiščenju vodika, proizvedenega iz obnovljivih virov [(Nikolaidis P. P., 2018), (Hydrogen Council, 2020)].

industrijska surovine za amoniak

USD/tono amoniaka



Slika 20: Krivulja stroškov amonijaka

Vir: (Hydrogen Council, 2020)

1.6.3.1.2 Proizvodnja metanola

Metanol se uporablja v različnih končnih izdelkih, od formaldehida za lepila (približno 30 % svetovnega trga), do petrokemije predvsem za proizvodnjo plastike (približno četrtnina trga) in kot sestavni del goriv (približno 35 % trga). Proizvodnja metanola zahteva dve ključni vhodni komponenti - vodik in CO₂. Metanol se danes večinoma proizvaja z vodikom, pridobljenim bodisi z reformiranjem zemeljskega plina bodisi z uplinjanjem premoga. Proizvajalec metanola lahko CO₂ dobavlja od tovarne v soseščini, ki ga lahko dobavi, namesto da bi ga skladiščila. Prav tako je mogoče uporabiti ogljik iz procesov na osnovi biomase ali pa oskrbo s CO₂ osnovati na neposrednem zajemanju ogljika v zraku, kar bi povzročilo zares nizkoogljični metanol. Slednja alternativa je trenutno draga, ocenjena na 150 USD na tonno CO₂. S tega vidika se proizvodnja metanola šteje za zajemanje in uporabo ogljika (CCU) (Hydrogen Council, 2020).

Proizvodnja metanola iz nizkoogljičnega vodika je konkurenčna sivi proizvodnji s stroški vodika od 0,80 do 1,50 USD na kg brez takse CO₂, odvisno od regije in stroškov zemeljskega plina. Če dodamo takso v višini 50 USD na tonno, to le nekoliko poveča konkurenčnost cene nizkoogljičnega vodika, za od 0,10 do 0,20 USD na kg. Takse CO₂ manj vplivajo na običajni

metanol, saj oddaja manj CO₂ v primerjavi z zemeljskim plinom kot surovino, saj je približno 70 % ogljika zajetega v končnem metanolu (Hydrogen Council, 2020).

Analiza kaže, da je ob ceni nizkoogljičnega vodika približno 2 USD na kg potrebno uvesti takso približno 100 USD na tono izpuščenega CO₂, da postane nizkoogljični metanol konkurenčen. To nakazuje, da sta amoniak ali rafiniranje sprva bolj privlačna primera za nizkoogljično vodikovo surovino. Če upoštevamo scenarij zajemanja ogljika iz zraka s stroški 150 USD na tono pridobljenega CO₂, se stroški proizvedenega metanola povečajo za približno 200 USD na tono. Za cenovno konkurenčnost sivi proizvodnji metanola bi bilo potrebno uvesti takso v višini 450 USD na tono izpusta CO₂ pri ceni 2 USD na kg nizkoogljičnega vodika. Ali z druge perspektive, brez CO₂ takse bi morala biti cena nizkoogljičnega vodika 0,65 USD na kg [(Dalena, 2018), (Hydrogen Council, 2020)].

1.6.4 Nove rešitve pri uporabi vodika

1.6.4.1 Proizvodnja nizkoogljičnega jekla

Danes je proizvodnja jekla eden največjih generatorjev izpustov CO₂ na svetu, saj predstavlja približno od 7 do 9 % svetovnih emisij CO₂ zaradi globalne uporabe fosilnih goriv, kar poudarja pomen razogljičenja tega sektorja. Konvencionalna alternativa, običajna plavžna peč, oddaja približno 1,8 tone ogljika na tono jekla (World Steel Association, 2019). Postopek neposrednega zmanjšanja ogljika v jeklu (H₂-DRI) na osnovi vodika bi lahko postal konkurenčen tako običajnim plavžem kot plavžem s CCS do približno leta 2030, odvisno od stroškov koksa v vsaki regiji. Razvijajo se tudi druge nizkoogljične alternative na osnovi vodika, kot je neposredno vbrizgavanje vodika v plavž.

Konkurenčnost proizvodnje jekla na osnovi vodika z običajnim plavžem je močno odvisna od stroškov proizvodnje vodika in CO₂ taks. Za to je potrebna cena vodika od 1,80 do 2,30 USD na kg (v regijah z visokimi stroški, kot sta Evropa ali Japonska, je cena izenačitve stroškov višja). V primerjavi s HISarno (jeklarna z 90-odstotnim zajemom CO₂) je za konkurenčnost proizvodnje potrebna cena nizkoogljičnega vodika v višini od 1,20 do 1,60 USD na kg (v regijah z višjo ceno koksa je cena izenačitve stroškov višja).

Pri taksi 50 USD na tono izpustov CO₂, je lahko H₂-DRI konkurenčen tudi s ceno 1,60 USD na kg H₂, ob predpostavki, da cena koksa znaša 200 USD na tono. Rešitve H₂-DRI s povprečno ceno približno 2,30 USD na kg (dosegljive na več lokacijah leta 2030), so lahko tako konkurenčnejše od plavžev s taksami CO₂ nižjimi od 100 USD na tono (Gielen D. S., 2020).

1.6.5 Gorivne celice v mirujočem sektorju (ogrevanje in industrija)

Z novimi tehnologijami in novimi načini pridobivanja energije se razvijajo tudi tehnologije za ogrevanje, ki so bolj napredne in okolju manj škodljive kot prej. Največja prednost novih tehnologij za pridobivanje toplotne energije je čim večji izkoristek goriva oz. energije, katero pretvorimo v toploto. Uporaba gorivnih celic pripomore k zmanjšanju emisij tudi v industrijskem in komercialnem sektorju. Gorivne celice lahko uporabimo za pridobivanje električne energije, ki jo potrebuje toplotna črpalka ali grelnik vode, ki ju lahko uporabimo za ogrevanje stavb ali v industrijskih procesih. Vendar pa je takšna energija v primerjavi z alternativami precej draga. Za doseganje čim višjih izkoristkov pa lahko gorivne celice uporabljamo tudi v sistemu kogeneracije (Dodds in drugi, 2015).

1.6.5.1 Gorivne celice za ogrevanje

1.6.5.1.1 PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell (membranska gorivna celica s protonsko izmenjavo)

Ta gorivna celica je splošno znana tudi kot PEFC (polimerna elektrolitska gorivna celica) in SPFC (trdna polimerna gorivna celica). PEMFC predstavlja najbolj razvito tehnologijo, ki napaja približno 90 % do danes dobavljenih sistemov (Fuel Cell Today, 2013). Najpogosteje se uporabljajo v sistemih za ogrevanje stanovanj (1-3 kW toplote), na primer v japonskem programu 'EneFarm'. Po več kot desetletju intenzivnih raziskovalnih in razvojnih prizadevanj tehnologija PEM ponuja visoko učinkovitost, vzdržljivost in zanesljivost, stroški pa so zaradi masovne proizvodnje hitro padli. Trenutne raziskave so namenjene poenostavitvi sistema: z odstranjevanjem platine bi se lahko izognili zapletenim inženirskim rešitvam [(Morozaan, Jousseme, Palacin, & and, 2011), (Antolini, 2009)], medtem ko lahko visokotemperaturne (HTPEM) celice delujejo na suh vodik nad 100 °C, kar odpravlja potrebo po vlažilcih [(Zhang, in drugi, 2006), (Fuel Cell Today, 2013)].

1.6.5.1.2 SOFC – Solid Oksid Fuel Cell (trdna oksidna gorivna celica)

Ta gorivna celica je visokotemperaturna gorivna celica in se uporablja tako v velikih industrijskih sistemih SPTE (soproizvodnja toplote in energije) od 100 do 1000 kW, kot v sistemih ogrevanja stanovanj (1-3 kW). V zadnjem času je njihov delež narasel in dosegajo 10 % svetovne prodaje (Fuel Cell Today, 2013). SOFC izkorišča najvišjo električno učinkovitost in večjo prilagodljivost v povezavi z gorivom, vendar zaradi svojih temperaturnih zahtev deluje manj dinamično kot PEMFC (Kendall & Singhal, 2003). Zlasti zagon in zaustavitev sta

občutljivi operaciji, ki trajata 12 ur ali več, zato sistemi običajno delujejo po načinu "vedno vroče" in zmanjšujejo svojo moč, kadar je povpraševanje zelo nizko ali pa ga sploh ni. Temeljne raziskave so bile namenjene izboljšanju trajnosti in utrujenosti materiala, trend pa stremi k napravam z vmesno temperaturo (IT-SOFC), ki delujejo pri 500-750 °C (Brett, Atkinson, Brandon, & Skinner, 2008). To omogoča uporabo večjega števila materialov, znižanje stroškov in izboljšanje dinamične učinkovitosti.

1.6.5.1.3 MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell (gorivna celica s staljenim karbonatom)

To je še ena visokotemperaturna gorivna celica, ki se uporablja v velikih industrijskih sistemih SPTE in proizvodnji električne energije v omrežju (3-60 MW). Te celice so postale vodilne na trgu za velike stacionarne aplikacije (Fuel Cell Today, 2013). MCFC imajo prednost zaradi relativno nizkih kapitalskih stroškov (vsebujejo neplatinaste katalizatorje) in enostavnejših pomožnih sistemov, vendar je njihova pomanjkljivost kratka življenjska doba in nizka koncentracija moči (Remick, Wheeler, & Singh, 2010). Ključno raziskovalno vprašanje je izboljšanje življenjske dobe sklopov gorivnih celic, ki zaradi agresivne kemije sklada in uhajanja elektrolitov znašajo le pet let, kar pomeni, da je zamenjava sklopa potrebna na polovici življenjske dobe sistema (Hawkes & Brett, 2013). Koncentracija moči je osrednja tema raziskav za zmanjšanje velikosti celic in s tem materialnih stroškov.

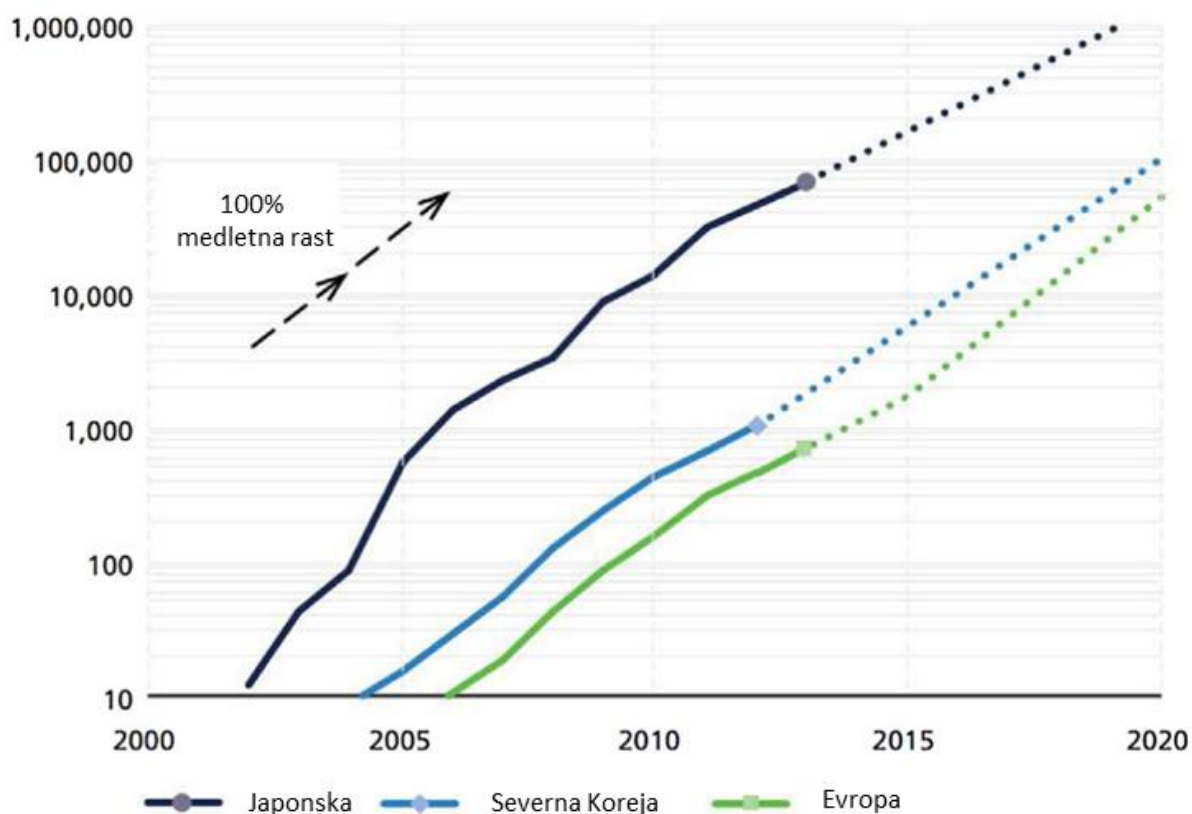
1.6.5.1.4 PAFC – Phosphoric Acid Fuel cell (gorivna celica s fosforno kislino)

Ta celica predstavlja prvo tehnologijo gorivnih celic, ki se uporablja za ogrevanje in se od sedemdesetih let uporablja v komercialnih sistemih SPTE (100-400 kW elektrike) (Ferro, 2009). Deluje približno 400 sistemov (85 MW), pretežno v ZDA, Nemčiji, na Japonskem in v Koreji [(Fritz, 2011), (Kuroda, 2011)]. Izdelano je bilo majhno število predstavitvenih sistemov v merilu 1 kW (Ghouse, Abaoud, & Al-Boeiz), vendar noben stanovanjski izdelek ni bil predstavljen na trgu.

1.6.5.2 Globalna uporaba gorivnih celic za soproizvodnjo energije in toplote

Stacionarna soproizvodnja toplote in električne energije (SPTE) je trenutno največji in najbolj uveljavljen trg gorivnih celic. Na Japonskem je bilo v štirih letih do oktobra 2013 prodanih skoraj 60.000 sistemov (Hara, 2013), leta 2012 pa so gorivne celice presegle mikro-SPTE transportnem sektorju. Prvič je prodaja teh celic zavzela 64 % svetovnega trga, približno 28.000 prodaj po vsem svetu (Delta-ee, 2013). Kot je prikazano na sliki spodaj, Japonska prednjači po uvajanju teh celic, približno 6-8 let pred Južno Korejo in Evropo. Komercializacija

demonstracijskega projekta Ene-Farm je pripomogla, da se je prodaja vsako leto približno podvojila, od oktobra 2013 je bilo prodanih skupaj 57.000 sistemov (Hara, 2013). Vendar se tudi na vseh regionalnih trgih prodaja iz leta v leto približno podvojuje. Ta impresivna rast naj bi se nadaljevala v bližnji prihodnosti: japonska vlada si je zastavila cilj za 1,4 milijona gorivnih celic, nameščenih do leta 2020, Evropska unija pa predvideva, da bo do leta 2020 uvedenih 50.000 sistemov, ki jim bo sledila uvedba komercialnih izdelkov [(Hara, 2013), (Riddoch, 2013)].



Slika 21: Skupno število mikro-SOFC sistemov na gorivne celice v treh glavnih regijah, kar kaže na zgodovinsko rast (polne črte) in kratkoročne projekcije (pikčaste črte)
Vir: [(Hara, 2013), (Riddoch, 2013), (Staffell & Green, 2009), (Kasuh, 2013), (Park, 2011), (Kim, 2013), (Staffell, University of Birmingham, 2010), (Callux, 2013)].

Japonska je tudi na čelu razvoja SOFC. Podjetja, kot so Kyocera, Nippon Oil in Toto, se od leta 2007 ukvarjajo s demonstracijami sistemov 0,7-1 kW. Kyocera in Eneos sta leta 2012 lansirala dva modela EneFarm-S, v prvih dveh letih pa so prodali več kot 1000 takšnih sistemov (Brandon, 2013). Cilj vladnega načrta je bila pospešena komercializacija SOFC med leti 2015 in 2020.

1.6.6 Ostale vodikove ogrevalne tehnologije

V gospodinjstvih bi vodik lahko uporabljali za:

- napajanje mikro-gorivnih celic za sproizvodnjo energije in toplote (SPTE);
- neposredno izgorevanje v kotlih s pomočjo plamena (podobno kot obstoječi kotli na zemeljski plin). Funkcionalno je enak plinskim kotlom za oskrbo s centralnim ogrevanjem stanovanj (DECC Department of Energy and Climate Change, 2011), le da namesto zemeljskega plina uporablja vodik. Tako kot pri kotlih na zemeljski plin tudi pri neposrednem zgorevanju vodika nastane vrsta plamenskih curkov, ki ogrevajo vodo. Z vidika potrošnikov med njimi ni razlike v videzu ali delovanju;
- katalitične kotle in toplotne črpalke na plinski pogon. Katalitični kotel prepušča vodik preko visoko reaktivnega kovinskega katalizatorja, ki je podvržen eksotermni kemični reakciji, da proizvede toploto za ogrevanje prostora in tople vode brez plamena. Rezultat postopka je zelo nizka emisija dušikovega oksida, toplotna moč pa je lažje nadzorovana kot pri gorilniku z odprtim plamenom [(Haruta & Sano, 1981), (Haruta M. S., 1982)];
- plinske toplotne črpalke, ki delujejo podobno kot električne toplotne črpalke in nadgrajujejo toploto iz zraka, tal ali vode na uporabne temperature. Delovna tekočina s fazno spremembo se uporablja za absorpcijo toplote iz zunanjega vira in za njeno prenos v sistem ogrevanja stavbe. Namesto električnega parnega kompresorja izgoreva plin, ki zagotavlja ogrevalno energijo za fazno spremembo. Plinske toplotne črpalke uporabljajo ta hladilni cikel za povečanje dobavljene toplotne energije nad tisto, ki bi jo dobili samo z neposrednim zgorevanjem plina. Do danes so bili v glavnem razviti za večje poslovne stavbe, čeprav so bili modeli rezidencialnih meril uspešno uvedeni tudi na nemškem trgu (Delta Energy & Environment , 2012);
- različne večje naprave za daljinsko ogrevanje in sproizvodnjo energije in toplote, ki uporabljajo zemeljski plin, bi lahko preoblikovali tudi za uporabo vodika (Chiesa, Lozza, Mazzocchi, & L., 2005);
- nadomestitev zemeljskega plina tudi v industrijskih procesih (IEA International Energy Agency, 2005). Na primer: vodik bi lahko uporabili kot gorivo v cementnih pečeh kljub potrebi po obsežni spremembi tehnologije (Hoenig, Hoppe, & Emberger, 2007).

1.7 RAZISKAVE IN RAZVOJ V EU

1.7.1 Tehnična vprašanja, ki še potrebujejo rešitve

Že več desetletij shranjujemo vodik pod pritiskom. Običajno ga shranjujemo v jeklenkah pod 200 bar, gostota in s tem tudi količina pa se povečata, če ga shranimo pod 300 bar. Ker je vodik shranjen pod pritiskom, predstavlja nevarnost eksplozije, zato morajo biti standardi za primeren rezervoar visoki. Najprimernejša je dvostenska tlačna posoda v valjasti ali sferični obliki, vendar pa ni idealna, saj zavzame več prostora kot tlačne posode drugih oblik (Povel, Feucht, Gelse, & Withalm, 1989).

Vodik, kljub odkrivanju novih učinkovitejših metod, še vedno ostaja cenovno neugoden. Glavni ekonomski problem predstavljajo proizvodnja, transport in shramba. Še vedno nimamo dovolj razvite infrastrukture. Omejena je tudi izbira komponent za vodikove tehnologije zaradi pomanjkanja industrije na tem področju. V prihodnosti pa bo potrebno več pozornosti posvetiti infrastrukturi za transport vodika po cevovodih.

Da bodo vodikove tehnologije konkurirale fosilnim gorivom, je potrebno izboljšati tudi učinkovitost proizvodnje. Trenutno najbolj učinkovita proizvodnja je elektroliza vode, ki ima učinkovitost med 75 in 80 %. Najmanj učinkovita pa je fermentacija odpadne vode, ki ima učinkovitost nekaj več kot 30 % (Lui, Chen, Tsang, & You, 2020).

Strategija za prehodno obdobje, ki jo je treba še razviti v smeri gospodarstva z vodikom in Evropa največ investira v proizvodnjo vodika s postopkom elektrolize, saj ta postopek obeta največ. Z uporabo majhnih elektrolizerjev (približno 100–500 kW) so stroški vodika nad 0,23 EUR na kWh, če pa uporabimo večje elektrolizerje (nad 4000 kW), so skupni stroški proizvodnje vodika pod 0,15 EUR / kWh. Upoštevajte, da obstaja razlika med kW_{Ele} ter kW_{H2} zaradi učinkovitosti postopka, s katerim pridobivamo energijo. Tako so številke stroškov, povezane s kW_{H2} , vedno višje. V literaturi je to pogosto težava, saj razlika ni vedno jasna. Danes delujejo predvsem majhni sistemi z močjo pod 500 kW. Vendar že obstajajo načrti za gradnjo naprav z močjo 10 MW ali več. To bi izjemno zmanjšalo specifične stroške pridobivanja vodika z elektrolizo oz. elektrolizerjev (Ajanovic & Haas, 2018).

1.7.1.1 Napredek konkurenčnih tehnologij v prihodnjih letih,

kot so biogoriva, motorji z notranjim zgorevanjem, električna energija, mikro turbine in obnovljivi viri energije. (Kaj prinaša prihodnost glede vodika?)

1.7.1.1.1 Biodiesel

Biodizel je gorivo obnovljivih virov za dizelske motorje, ki je pridobljeno iz živalskih maščob ali rastlinskih olj. Trenutno je večina biodizla narejenega iz sojinega, repičnega ter palmovega olja. Zaradi uporabe sojinega olja v prehrabni industriji je proizvodnja cenovno ugodnega biodizla zelo zahtevna. Vendar pa obstajajo velike količine poceni olj in maščob (npr. odpadki iz restavracij, goveji loj, svinjska mast in rumena mast), ki bi jih lahko pretvorili v biodizel. Biodizel je nevnetljiv in ne eksploziven, v nasprotju z navadnim dizlom, ki ima plamenišče pri 63 °C. Zaradi te lastnosti so vozila na biodizel v nesrečah veliko varnejša kot vozila z dizelskim gorivom ali bencinom. Za razliko od dizla je biodizel biološko razgradljiv in nestrupen. Kot gorivo pri izgorevanju znatno zmanjša toksične in druge emisije (Demirbas, 2011).

1.7.1.1.2 Biološki etanol

Trenutno se večina etanola proizvaja iz sladkornega trsa ali koruze. Proizvodnja škroba ali etanola na osnovi sladkorja je vzrok za dvig cen v prehrabni industriji. Da bi zadostili sedanjim in prihodnjim zahtevam, je proizvodnja etanola iz fermentacije lignocelulozne biomase izvedljiva možnost, ki ne konkurira oskrbi s hrano. Vendar je trenutno etanol, proizveden iz lignoceluloze, dražji od etanola iz škroba. Bioetanol se lahko uporablja neposredno v avtomobilih, zasnovanih za pogon na čisti etanol, ali v mešanici z bencinom za izdelavo „gasohola“. Za uporabo mešanice običajno ni potrebna nobena sprememba motorja. Za mešanje z bencinom je potreben brezvodni etanol. Ob trenutnem trendu uporabe etanola se bo povpraševanje v bližnji prihodnosti verjetno znatno povečalo (Demirbas, 2011).

1.7.1.1.3 Koruzni butan

Večji energijski izkoristek in transportne prednosti butana v primerjavi z etanolom spodbujajo naložbe industrije. Stari fermentacijski postopki so vsebovali nizko produktivnost in koncentracijo topila. Novejše raziskave na podlagi uporabe koruze so namenjene razvoju procesa z visokim donosom, koncentracijo in produktivnostjo izdelka (Tao & Aden, 2009).

1.7.1.1.4 Bio-olje

Bio-olje je viskozna, jedka in nestabilna zmes velikega števila kisikovih molekul. Pridobivamo ga s postopkom pirolize, ki skupaj s izbranimi surovinami za biomaso vplivajo na zgoraj omenjene lastnosti. Zaradi visoke vsebnosti kisika je ogrevalna vrednost za polovico manjša kot pri nafti. Bio-olje potrebuje nadgradnjo, preden ga je možno uporabljati kot tekoče gorivo. Bio-olje lahko pridobivamo iz lesne biomase in kmetijskih odpadkov. Katalizirana piroliza biomase ponuja velik potencial za prihodnji razvoj kot pot za spreminjanje lastnosti bio-olja. Bio-olje ni stabilno in se ne meša s konvencionalnimi tekočimi gorivi (Demirbas, 2011).

1.7.1.2 Prihodnost goriv za motorje z notranjim izgorevanjem

Ocenjujejo, da bi se lahko poraba goriva v vozilih na notranje izgorevanje v ZDA v primerjavi s trenutnim poprečjem zmanjšala za kar 50 %. Z obstoječimi katalizatorji in nadzornimi sistemi, (ki se še naprej izboljšujejo) se lahko delci NO_x, UHC in CO zmanjšajo na zanemarljivo raven tako pri bencinskih kot pri dizelskih motorjih. CO₂, ki ga odda motor, se s tehnološkimi izboljšavami nenehno zmanjšuje. Cilj izdelave tako imenovanih "vozil brez emisij" je zelo blizu, zahvaljujoč naprednim načinom zgorevanja in inovativnim sistemom naknadne obdelave, ki vključujejo obsežno uporabo katalizatorjev in visokoučinkovitih filtrov za trdne delce (Boretti, 2017).

1.7.1.3 Mikro-plinske turbine (Micro Gas Turbine – mGT)

Zaradi zelo nihajoče in nepredvidljive narave se proizvodnja obnovljivih virov energije iz vetra in sonca sooča z nekonstanto proizvodnjo energije. Da bi ohranili uravnoteženo povpraševanje in se hkrati izognili morebitnim izpadom električne energije, potrebujemo prilagodljivo omrežje. Mikroplinske turbine (mGT) lahko zagotovijo takšno prilagodljivost pri porazdeljeni proizvodnji električne energije. Vendar pa je zaradi precej visokih investicijskih stroškov (med 1500 in 2500 EUR/kWh) in precej nizkim izkoristkom (30 % za tipično enoto 100 kWh), bistvenega pomena optimizacija turbine za ekonomsko donosnost. V dejanskih pogojih delovanja so obratovalni parametri, ki določajo mGT in njegovo zmogljivost, negotovi. Odstopanja pri teh parametrih bodo vplivala tako na zasnovo omrežja kot na njegovo delovanje, kar lahko vodi do različnih ekonomskih rezultatov. Tako je za načrtovalce in upravljavce bistveno, da pri načrtovanju omrežij in določanju operativne strategije upoštevajo te negotovosti (Paepe, et al., 2019).

2 METODOLOGIJA

Za namene raziskovalne naloge smo uporabili znanstveni pristop sistematičnega pregleda literature. Zbirali smo informacije v povezavi z vodikom, vodikovimi tehnologijami in skladiščenjem le-tega.

Tabela 13: Raziskovalni protokol

Korak	Naloga	Opis	Število publikacij
Korak 1.	Identifikacija raziskovalnega problema	Ustvarili smo ožji seznam recenziranih, revidiranih akademskih revij, ki objavljajo gradivo na področju vodika.	
	Ključne besede	Naslednji korak te raziskave je bil filtriranje baz podatkov s pomočjo izbranih ključnih besed: ("hydrogen*") AND ("technologies*") AND ("transport*") AND ("storage*")	385
Korak 2.	Iskanje - Scopus	i) Potrebno poiskati iskalni niz v spletni bazi Scopus	96
		ii) Omejitev na časovno obdobje: 2000 - 2019 iii) Jezik publikacij: Angleški iv) Tip publikacij: Akademski članki	
	Odstranjevanje podvojenih oz. nerelevantnih zapisov	Navedki so bili vstavljeni v programsko orodje Mendeley. Duplikati so bili odstranjeni.	
Korak 3.	Filtriranje naslovov in povzetkov	Naslov in povzetki vseh izbranih prispevkov se preučijo in filtrirajo. Merila za vključitev: raziskave s področja vodika v EU in širše, značilnosti tehnologij namenjenih skladiščenju, kakšna je trenutna polnilna infrastruktura in kakšne so trenutne usmeritve ter pogoji za javno sprejeto in širšo implementacijo vodika.	
Korak 4.	Analiza pridobljenih dokumentov	Analiza podatkov	
		Rezultati	
		Diskusija	

V tabeli 13 je prikazan raziskovalni protokol. V okviru protokola smo pregledali literaturo 385 znanstvenih publikacij, ki smo jih našli v raziskovalni bazi Scopus glede na zastavljen iskalni koren. Po hitrem pregledu smo na nadaljnji seznam uvrstili 96 znanstvenih virov, ki smo jih podrobneje analizirali. Literaturo smo iskali na podlagi ključnih besed, ki temeljijo na našem preliminarnem raziskovalnem vprašanju. Tako so besede zbrane na podlagi teme: Analiza tehnologij pridobivanja vodika in njegove hrambe v polnilnici. Ugotavljali smo tudi trenutne usmeritve raziskav s področja vodika v EU in širše, prav tako smo ugotavljali značilnosti

tehnologij, namenjenih skladiščenju, kakšna je trenutna polnilna infrastruktura in kakšne so trenutne usmeritve ter pogoji za javno sprejeto in širšo implementacijo. Po končanem pregledu smo opravili analizo pridobljenih podatkov. Za analizo smo uporabili orodja Microsoft Excel ter VOSViewer 1.6.11.

Izbrana raziskovalna metodologija je sestavljena iz štirih korakov. Najprej smo poiskali in izbrali zbirke podatkov Scopus. Naslednji korak te raziskave je bil filtriranje v izbrani zbirki podatkov z izrazi »Hydrogen« in »Technologies« in »Transport« in »skladiščenje«. Filtriranje je bilo omejeno glede na primernost teme, naslova, povzetka ali ključnih besed. Filtri za časovno omejitev niso bili uporabljeni. Tretji korak je bil prebrati povzetke izbrane literature, da se potrdi ustreznost prispevkov. Po izbiri člankov smo natančno preučili izbrane dokumente in pripravili kategorizacijo.

Primarni namen tega pregleda literature je bil najti ustrezne znanstvene raziskave in odgovoriti na predhodno zastavljena raziskovalna vprašanja:

- **Raziskovalno vprašanje 1:** Ali vodik predstavlja velik potencial uporabe v energetske sektorju?
- **Raziskovalno vprašanje 2:** Ali vodik predstavlja trajnostno rešitev na področju transporta?
- **Raziskovalno vprašanje 3:** Ali vodik predstavlja substitut namesto fosilnih goriv za globalno reševanje energetske okoljske krize: izvedljivo ali ne?
- **Raziskovalno vprašanje 4:** Kakšna je učinkovitost sedanjih tehnologij za proizvodnjo/uporabo vodika (kot alternativa fosilnim gorivom) za splošne potrebe?
- **Raziskovalno vprašanje 5:** Kakšni so trenutni problemi shranjevanja vodika?
- **Raziskovalno vprašanje 6:** Kakšna bo učinkovitost energijskega mix-a v prihodnje?
- **Raziskovalno vprašanje 7:** Kakšna je trenutna stopnja razvoja vodikovih tehnologij?
- **Raziskovalno vprašanje 8:** Kakšna je trenutna usmerjenost raziskav v EU in globalno?

Tako so bili v naslednjem poglavju rezultati sistematično urejeni in prikazani z rezultati in obsegi iskanja. V poglavju Razprava smo razpravljali o ugotovitvah in opažanjih med pregledom literature.

3 REZULTATI



Graf 1: Avtorji z največ pripsevki

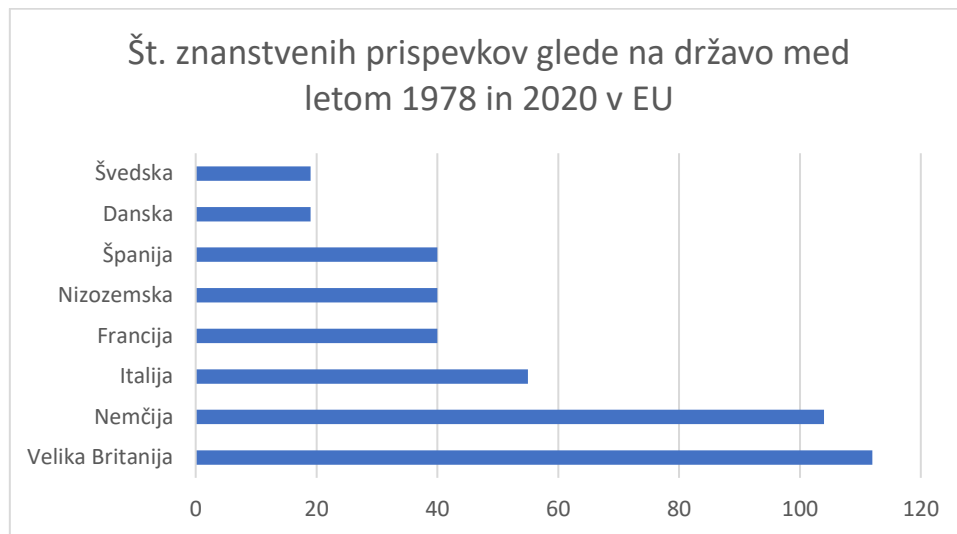
Graf 1 predstavlja količino prispevkov na posameznega avtorja. Iz grafa 1 je razvidno, da imata največ prispevkov Robinius in Stolten. Izdala sta jih vsak po 6. Nato sledi McDowall s petimi prispevki. Vsak po 4 prispevke pa imajo Anderson, Buisman, Cormos, Dufour, Grube, Lenz in Samsatli.



Graf 2: Ustanove z največ znanstvenimi raziskavam s področja vodika

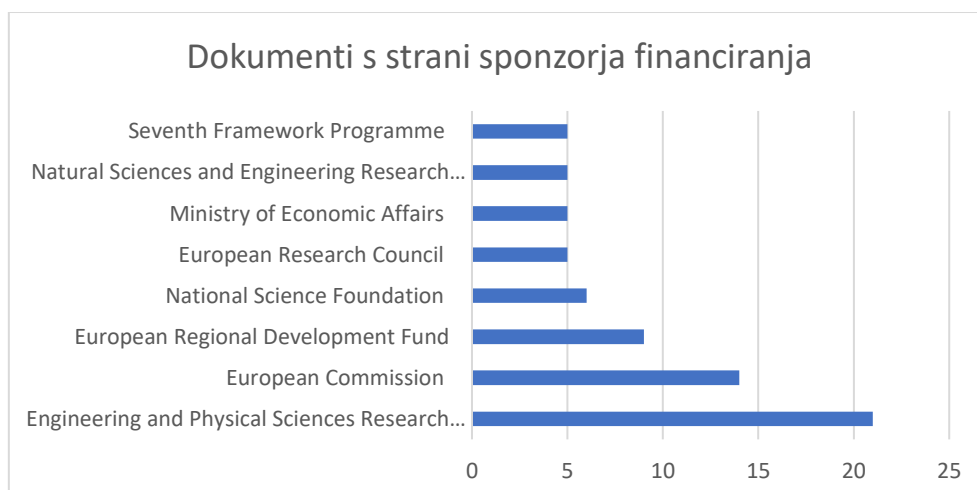
Graf 2 predstavlja količino raziskav, ki jih je izvedla posamezna ustanova. Področje vodika največ raziskuje ustanova Imperial College London, saj je izvedla 20 raziskav. S 13 raziskavami sledi Forschungszentrum Jülich FZJ ter UCL z 12 raziskavami. Nato sledi University of Cambridge z 10 raziskavami. Vsaka po 8 raziskav imajo Instituto Superior

Técnico, Delft University of Tecnology in CNRS Centre National de la Recherche Scientifique. Vsaka po 7 raziskav imajo Chalmers University of Tecnology, University of Manchester in Danmarks Tekniske Universitet.



Graf 3: Število znanstvenih prispevkov glede na državo med letom 1978 in 2020 v EU

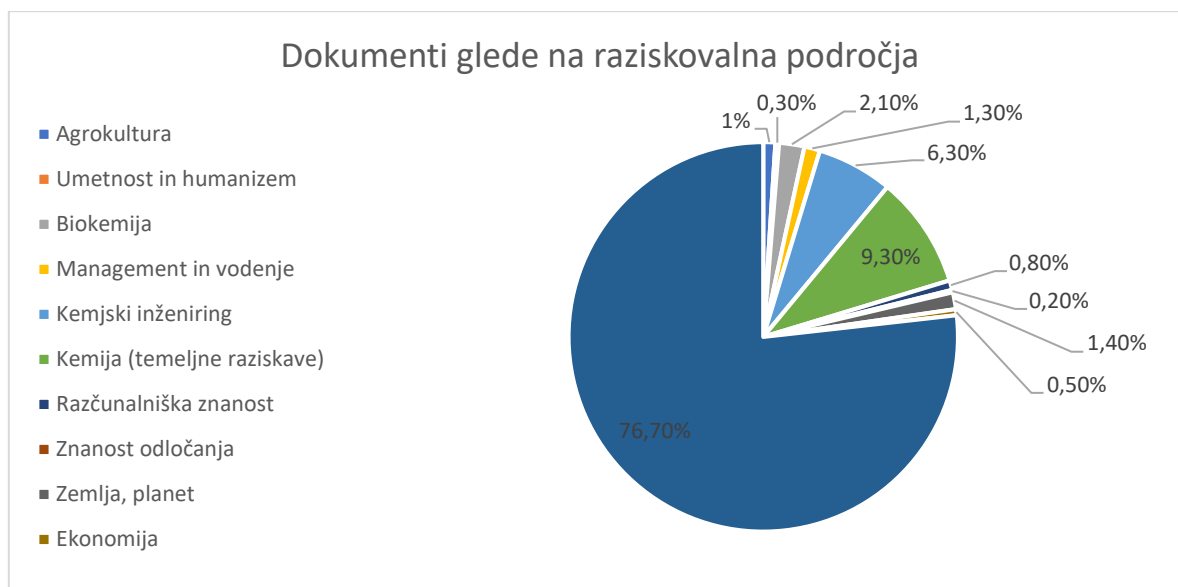
Graf 3 prikazuje število znanstvenih prispevkov med leti 1978 ter 2020 iz posameznih držav znotraj Evropske unije. Največ sta jih prispevali Velika Britanija (112) in Nemčija (104), kar kaže, da sta močno ozaveščeni o posledicah podnebnih sprememb. Sledita Italija s 55-timi znanstvenimi prispevki ter Francija. Nizozemska in Španija imata vsaka 40 raziskav. Danska ter Švedska sta prispevali vsaka po 19 znanstvenih prispevkov. Iz grafa je razvidno, da večina znanstvenih prispevkov prihaja iz močno razvitih držav, z močnim kapitalom.



Graf 4: Dokumenti s strani sponzorja financiranja

Graf 4 prikazuje število sponzoriranih dokumentov od posameznih institucij. Največ člankov je sponzoriral Engineering and Physical Sciences Research Council, in sicer kar 21. Sledi mu

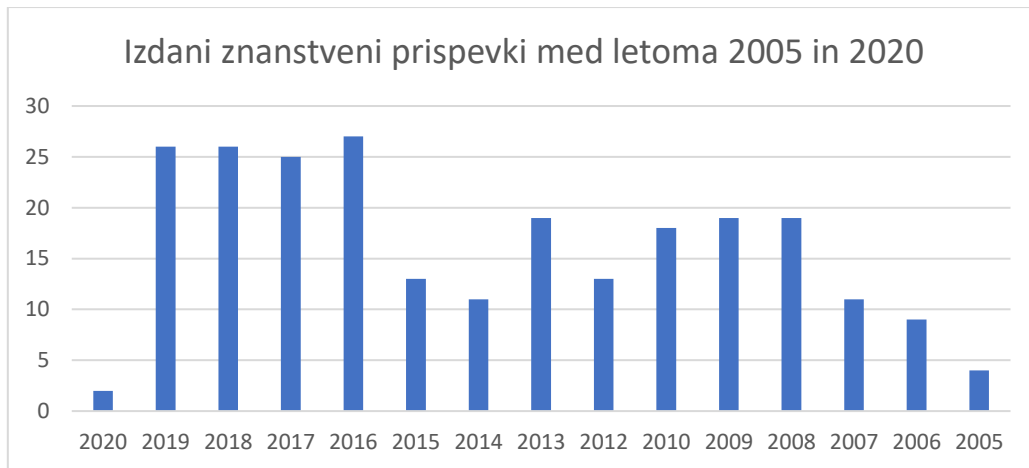
European Commission s 14-imi sponzoriranimi članki ter European Regional Development Fund z 9-imi. National Science Foundation je prispeval 6 dokumentov, med tem ko so ostali na grafu prispevali vsak po 5. Iz grafa je razvidno, da je največ sponzoriranih dokumentov s področja inženirstva ter znanosti. Razvidno je tudi, da je večina dokumentov sponzoriranih iz evropskih institucij.



Graf 5: Dokumenti glede na raziskovalna področja

Na grafu 5 lahko razberemo deleže najbolj raziskanih znanstvenih področij. Največji delež med njimi zavzemajo temeljne raziskave v kemiji z 9,3 % in kemijski inženiring s 6,3 %, tudi tretje najbolj raziskano področje je z 2,1 % povezano s kemijo, in sicer področje biokemije. Z 1,4 % sledijo raziskave v zvezi z Zemljo, planetom. Management in vodenje zavzemata 1,3 %, agrikultura pa 1 %. Področja računalniške znanosti, ekonomije, umetnosti in humanizma ter znanosti odločanja so zastopane v deležih manj kot 1 odstotek. Preostali delež 76,7 % pripada ostalim področjem znanstvenega raziskovanja.

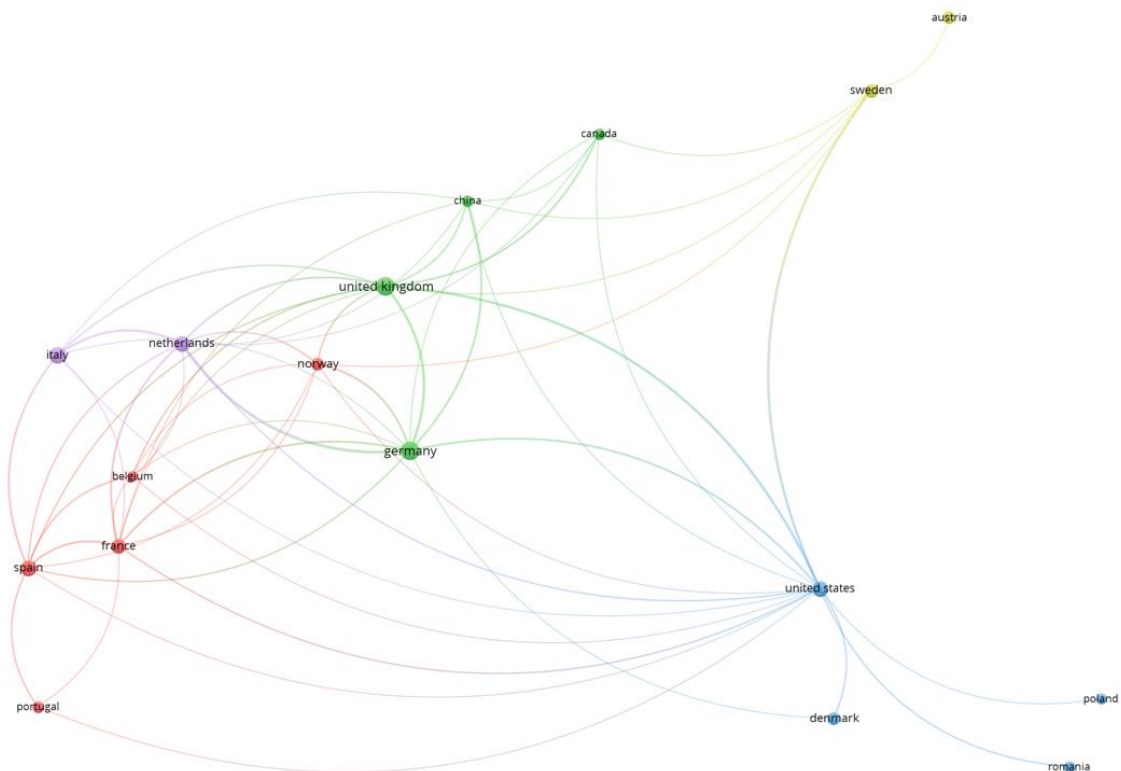
Grafikon kaže, da največji delež znanstvenih raziskav poteka na naravoslovnem področju, kjer daleč najbolj prednjači področje kemije. Ali sta vodik in njegove tehnologije prav tako umeščena v področje kemijskih raziskav, iz grafa ni jasno razvidno. Možno je predvidevanje, da je del teh raziskav glede možnosti pridobivanja vodika vendarle zajeto znotraj omenjenega področja. V kolikor ta predpostavka ne drži, potem za vodik in vodikove tehnologije ni navedenega konkretnega podatka, je pa moč sklepati, da v okviru ostalih področij v grafikonu, v primerjavi z ostalimi navedenimi področji, ne zavzema bistvenega deleža izvedenih znanstvenih raziskav.



Graf 6: Izdani znanstveni prispevki med letoma 2005 in 2020

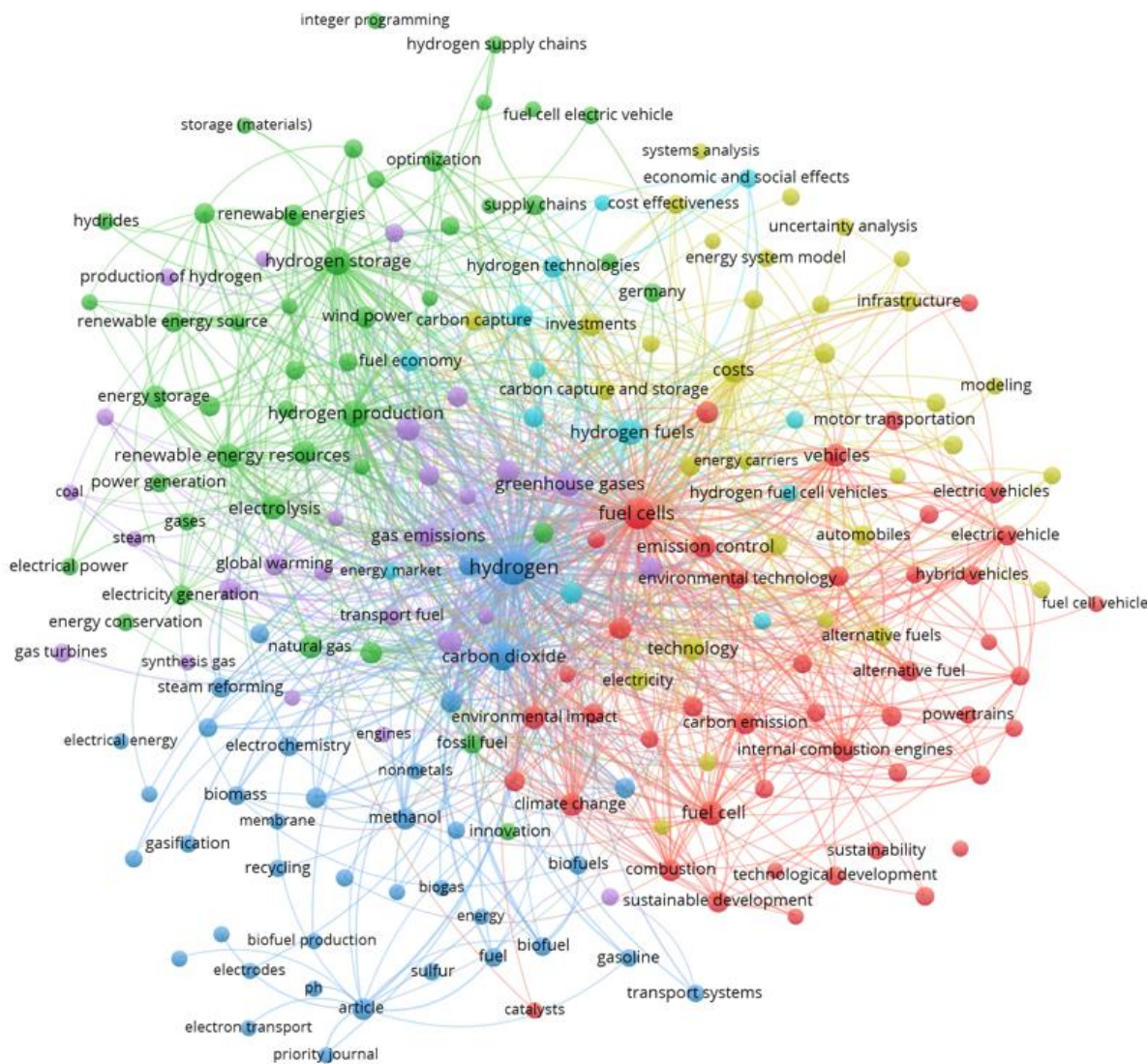
Na grafu 6 opazimo, da je bilo med leti 2005 in 2020 na temo vodika izdanih največ znanstvenih člankov v letu 2016, in sicer 27, sledi obdobje v letih 2018 in 2019, ko jih je bilo izdanih po 26, v letih 2008, 2009 in 2013 pa je bilo izdanih po 19 znanstvenih člankov v vsakem letu, v ostalih letih niha njihovo število med 9 in 13, le na začetku spremljanega obdobja v letu 2005 so bili izdani samo štirje znanstveni članki na obravnavano tematiko.

Kljub temu da za leto 2020 na grafu niso prikazani relevantni podatki, lahko razberemo naraščajoči trend znanstvenega dela na področju vodika in vodikovih tehnologij.



Graf 7: Povezanost držav glede na citiranje in povzemanje literature - globalno

Graf 7 prikazuje medsebojno povezanost držav in njihovih znanstvenikov glede citiranja in povzemanja literature. Iz grafa je mogoče razbrati pet opaznejših skupin, ki sodelujejo na področju raziskovanja vodika ter vodikovih tehnologij. V prvi skupini imajo vodilno vlogo ZDA, katerih znanstveniki citirajo in povzemajo literaturo raziskovalcev praktično vseh držav, ki raziskujejo obravnavano področje, ob tem pa najtesneje sodelujejo z Dansko, Poljsko in Romunijo. Slednje pa z drugimi državami praktično niso povezane. V drugi skupini nosita vodilni vlogi Združeno Kraljestvo, ki sodeluje z največ državami in ima tudi najmočnejši vpliv med vsemi navedenimi državami, ki raziskujejo obravnavano področje, ter Nemčija z nekoliko manj povezanosti z drugimi državami in tudi z nekoliko manjšim obsegom raziskav. Njim sta pridruženi še Kanada in Kitajska. Naslednjo, tretjo skupino držav s precej enakovredno zastopanostjo tvorijo Španija, Portugalska, Belgija, Norveška in Francija. Slednja ima sicer malenkost višji obseg citiranja in povzemanja literature glede na ostale. Gledano v celoti, skupina je povezana z vsemi državami, največ z Italijo in Nizozemsko, vendar vsaka posamezna država te skupine z ostalimi sodeluje le v omejenem obsegu. Nizozemska, ki prevzema vodilno vlogo v skupni povezavi z Italijo, je jedro četrte skupine, ki prav tako sodeluje z večino držav v okviru obravnavane tematike. Iz grafa ni razvidno, da bi državi imeli kakršnokoli povezavo s skupino, ki jo tvorita Švedska in Avstrija. Švedska ima v peti skupini z Avstrijo prevladujočo vlogo, saj je, v primerjavi z Avstrijo, povezana tudi z drugimi državami. Zraven ZDA se največ povezuje z državami iz druge skupine (Združeno Kraljestvo, Kanada in Kitajska) ter Norveško. Iz grafa je razvidno, da je vodilna država z največ znanstvenimi prispevki, citati in povzemanjem literature na področju vodika in vodikovih tehnologij Združeno Kraljestvo, njej pa sledijo Nemčija, Nizozemska in ZDA. Prav tako je razvidno, da so izven svojih nacionalnih meja z znanstveniki drugih držav najbolj povezani prav znanstveniki ZDA.



Graf 8: Povezanost ključnih raziskovalnih besed in področij

Graf 8 prikazuje povezanost ključnih raziskovalnih besed in področij. V povezavi z našo raziskovalno temo je moč razbrati, da prva skupina, z vodilnimi ZDA, posveča največ raziskav samemu vodikumu ter v večjem delu virom, iz katerih pridobivamo vodik kot energent prihodnosti. Druga skupina z vodilnim Združenim Kraljestvom največ raziskuje načine pridobivanja zelenega vodika, shranjevanja in transporta ter oskrbe posrednikov ali končnih porabnikov vodika. Največ raziskav od navedenih se nanaša predvsem na shranjevanje vodika. Osrednja raziskovalna tematika tretje skupine držav z vodilno Francijo se nanaša na gorivne celice, ki na grafu zraven vodika predstavljajo največji delež vseh raziskav. Pretežni del ostalih raziskav v tej skupini držav se osredotoča na transport in vozila, ki temeljijo na pogonih na gorivne celice in na primerjavo z vozili, ki za pogon uporabljajo motorje z notranjim izgorevanjem. Četrta skupina z vodilno Nizozemsko največ raziskuje področja škodljivih izpustov toplogrednih plinov in drugimi emisijami ter njihovim vplivom na globalno

segrevanje. V peti skupini Švedska in Avstrija največ preiskujeta stroške in investicije uvajanja vodikovih tehnologij, njihove ekonomske in socialne vplive, potrebno infrastrukturo ter različne energijske modele za doseg ustrežne energijske mešanice. Največji deleži raziskav v sklopu obravnavane tematike se usmerjajo v sam vodik, njegovo shranjevanje in vodikove gorivne celice.

V nadaljevanju so prikazani kritični izsledki pregleda izbrane literature. Tabela 13 vsebuje vse kritične ugotovitve in omejitve, ki smo jih opazili med pregledom literature. Ta tabela vsebuje 96 citatov, objavljeno leto, morebitno uporabljeno metodologijo, reference, v katerih smo našli citate, državo izdaje in raziskovalno področje.

Tabela 14: Pregled literature

Leto	Država	Raziskovalno področje	Ključni izsledki pregleda	Avtor
2019	Združeno kraljestvo	*Vodikove tehnologije *Energetski sistem	* Vodikove verige lahko ponujajo potencial za razogljičenje in prilagodljivost v energetskih sistemih prihodnosti.	(Quarton & Samsatli, 2019)
2019	Danska	*Trajnostni energetski sistem *Scenariji sektorskega povezovanja	* Prispevek predstavlja raziskavo vloge različnih tehnologij shranjevanja. Globalno zmanjšanje CO2 je mogoče doseči s pristopom povezovanja energetskih sektorjev in predstavlja veliko sporočilo za politike na prehodu v življenje z nizkimi emisijami ogljika v Evropi. *V bližnji prihodnosti uporaba črpanega shranjevanja vodika v Evropi ni pričakovana. *Obstaja potreba po oblikovanju medsebojno povezanih sistemov obnovljive energije. * Optimalni sistem za zmanjšanje CO2 vključuje električne baterije in hranilnik vodika, kar ustreza 1,4 - 19,4-krat več od povprečne urne potrebe po električni energiji.	(Victoria, Zhu, Brown, Andresen, & Greiner, 2019)
2019	Portugalska	* Elektrodialitične tehnologije *Proizvodnja vodika	* Učinkovitost pretvorbe električne energije v gorivni celici je odvisna od kakovosti proizvedenega plina H2. * obstaja veliko novih možnosti za proizvodnjo H2.	(Magro, Almeida, Paz-Garcia, Mateus, & Ribeiro, 2019)
2019	Danska	* Modeliranje pomorskega tovora v povezavi z nevtralizacijo CO2 * Metoda za določanje emisij toplogrednih plinov	* Glede na ekonomski in socialno stroškovni pogled na goriva, je vodik eno najbolj primernih goriv glede negotovosti razvoja stroškov in varnostnih zahtev v prihodnosti. *Za uvedbo potrebnih sprememb za doseganje nevtralnega prevoza ogljika je treba zahtevati močne regulativne proračune za ogljik ali cene ogljika za CO2. * Potrebne so potencialne raziskave na področju alternativnih tehnologij in infrastrukture za zeleno gorivo. *Politiki na tem področju morajo določiti jasne podnebno nevtralne cilje za prihodnost. Prav tako je treba uvesti ustrezne meritve na lestvici (davek, dajatev, sistem CO2).	(Brahim, Wiese, & Münster, 2019)
2019	Nemčija	* Trajnostni energetski sistem * Uporabljeni optimizacijski model *Skupni letni strošek	* Obstaja problem občutljivosti vodikovih cevovodov v prihodnosti. * Cevovodi so lahko stroškovno optimalni (iz regij z večjim potencialom vetra). * Potrebujemo se učinkovite zasnove sistemov in prostorsko združevanje vetrnih regij.	(Caglayan, Heinrichs, Linszen, Robinius, & Stolten, 2019)

			* Zaradi vremenskih sprememb je treba modelirati različne spremembe.	
2019	Španija	* kreiranje trajnostnega energetskega sistema * Metode ocenjevanja samostojnih mikro-mrež * Shranjevanje vodika	* Vodik obljublja veliko pri prometnih tehnologijah za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov. * Nov model mikro-mreže, vključno z vodikovimi tehnologijami, je mogoče enostavno uporabiti brez poglobljenega znanja.	(Sánchez-Sáinz, García-Vázquez, & Fernández-Ramírez, 2019)
2019	Nemčija	* Energetski sistem prihodnosti * Distribucija vodika * Solne jame * Vodikovi cevovodi	* Najbolj koristna oskrbovalna veriga vodika je lahko skladišče solnih jam v kombinaciji s prenosom po cevovodih in distribucijo GH2. * Oskrba z vodikom lahko v prihodnosti predstavlja najnižje stroške in emisije CO2. * Obstaja podpora postopnem prehodu k ponudbi tovarnjakov na plin * Znatno zmanjšanje stroškov zahteva poceni tehnologije obnovljivih virov energije in inovativno zasnovane bencinskih črpalk.	(Reuß, Grube, Robinius, & Stolten, 2019)
2019	Češka	* Strategija evropske mreže * Implementacija vodika na Češkem	* Potrebna je aktivna vloga javnih organov pri nacionalnem spodbujanju EU glede na izvajanje vodikove mobilnosti. * Pričakovani vplivi uporabe vodika so na primer zmanjšanje emisij CO2 in gospodarska rast. * Potreben je stalen dialog z nacionalno politiko.	(Stehlik, Tkac, & Bouzek, 2019)
2019	Nemčija	* Vodikove mreže * Vodikove celice v povezavi s transportom * Primerjava stroškov proizvodnje vodika	* Avtotermična predelava biomase s katalizatorjem iz plemenitih kovin je ena od prihodnjih proizvodov vodika. * Obseg proizvodnje vodika mora biti različen in raznovrsten.	(Rau, Herrmann, Krause, Fino, & Trimis, 2019)
2019	Združeno kraljestvo	* Vodikove razvojne tehnologije * Proizvodnja vodika s uplinjanjem odpadkov biovodik	* Prihranek ogljika za biovodik obljublja več kot druge alternativne tehnologije. * Vodik z nizkimi emisijami ogljika je prepoznan kot ključni element prihodnosti. * Kombinacija uplinjanja s fluidiziranim slojem s paro in kisikom ter rafiniranja plazme lahko zagotovi visokokakovosten plin.	(Materazzi, Taylor, & Cairns-Terry, 2019)

			*Ocenjeno je, da ima biovodik z zajemom in shranjevanjem ogljika intenzivnost toplogrednih plinov za več kot 230% nižjo od fosilnih goriv	
2019	Italija	<ul style="list-style-type: none"> * Proizvodnja vodika s preoblikovanjem pare * Simulacija naprave za proizvodnjo vodika * Učinkovitost pretvorbe vodika * Splošna učinkovitost vodika 	* Model predstavlja uporabno orodje za prihodnje preiskave učinka zajema pare.	(Capocelli, 2019)
2019	Francija	<ul style="list-style-type: none"> * Vodikovo gospodarstvo *Prodor na trg 	<ul style="list-style-type: none"> * Vodik za mobilnost ima enega izmed najbolj obetavnih trgov (do leta 2040). * Povečanje vozil na gorivne celice na 6,2 milijona in napovedi naraščajočih bencinskih črpalk do 1200, na primer v Južni Koreji. * Trenutno pomanjkanje sprožitve trga z vodikom. * Velik vpliv države pri uvajanju trga vodika. * Potreba po izvajanju več-sektorskega pristopa je ključnega pomena za prilagodljivost električnega omrežja. 	(Tili, Mansilla, Frimat, & Perez, 2019)
2019	Združeno kraljestvo	<ul style="list-style-type: none"> * Trajnostni energetski sistem *Energetska učinkovitost 	<ul style="list-style-type: none"> * Delež električne energije bo v bližnji prihodnosti zrasel do 60 % celotnega povpraševanja. * Problemi neposredne elektrifikacije (sončne in vetrne). * Vodik je ena od rešitev na področju komplementarne elektrifikacije, ki bo zadovoljila potrebe sektorja končne uporabe. 	(Philibert, 2019)
2019	Italija	<ul style="list-style-type: none"> * Vodikovo gospodarstvo * Shranjevanje vodika 	<ul style="list-style-type: none"> *Stisnjen vodik je primeren material z lastno poroznostjo. Ti materiali imajo prednosti pred kovinskimi hibridi, primernimi za shranjevanje vodika. * Zasnova rezervoarja za transport vodika v prihodnosti je tudi posledica stroškov proizvodnje teh materialov in njihovega nizkega onesnaževalnega učinka. Tudi te vplive bo treba preučiti. 	(Coppola, et al., 2019)
2019	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Obnovljivi viri energije 	* Vodik, proizveden z elektrolizo, je obetavna rešitev za preoblikovanje energetskega sektorja.	(Emonts, et al., 2019)

		<ul style="list-style-type: none"> * Gospodarstvo z vodikom * Električna vozila na gorivne celice 	<ul style="list-style-type: none"> * Za vlaganje v vodikove tehnologije je treba določiti konkurenčne in podnebju prijazne poti. * Tržni delež električnih vozil na gorivne celice do leta 2050 doseže do 7 5%. * Najučinkovitejšo oskrbo z vodikom lahko dosežemo s skladiščem v kavernah in cevovodih. * Tovornjaki LH2 in LOHC so stroškovno učinkoviti. 	
2019	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Električna vozila na gorivne celice * Trajnostna zasnova energetskega sistema 	<ul style="list-style-type: none"> * Vzoredna gradnja polnilnic za električna vozila in vozila z gorivnimi celicami ne poveča skupnih stroškov. * S sistemskih stališča kombinirane polnilne postaje predstavljajo optimalen model z majhnimi izgubami in so energetske učinkovite. 	(Michalski, Poltrum, & Büngrer, 2019)
2019	Španija	<ul style="list-style-type: none"> * Trajnostno načrtovanje energetskega sistema * Gospodarstvo z vodikom * Proizvodnja vodika 	<ul style="list-style-type: none"> * Z vidika trajnosti je nizkotemperaturna elektroliza najboljši možni kandidat za proizvodnjo vodika v stanju dinamičnega ravnovesja v scenarijih morskih obnovljivih virov in trenutno ni donosna. * Zaradi velikih energetskih potreb je popolnoma neprimeren za pridobivanje zelenega vodika iz morske vode. 	(d'Amore-Domenech & Leo, 2019)
2019	Nizozemska	<ul style="list-style-type: none"> * Gospodarstvo z vodikom * Energetski sistem 	<ul style="list-style-type: none"> * Še vedno obstajajo ovire za vključitev omrežij zemeljskega plina. Nizke injekcije za vodik in dovodne tarife. * Obstaja veliko ovir pri mešanju vodika z zemeljskim plinom. * V industriji ni promocije vodika (certificiranje). * Manj pozornosti zainteresiranih strani. * Za vodikov sistem je še vedno veliko pravnih ovir. 	(Dolci, et al., 2019)
2019	Hrvaška	<ul style="list-style-type: none"> * Gospodarstvo z vodikom * Tehnologije za razvoj vodika 	<ul style="list-style-type: none"> * Boljša avtonomija kolesa na vodikov pogon v primerjavi s komercialnimi električnimi kolesi. * Hitro polnjenje goriva v primerjavi s kolesom. 	(Kovač & Paranos, 2019)
2019	Združeno kraljestvo	<ul style="list-style-type: none"> * Gospodarstvo z vodikom * Trajnostna zasnova energetskega sistema * Napajanje na plin 	<ul style="list-style-type: none"> * Prekomerno vbrizgavanje vodika pomeni zmanjšanje Wobbejevega indeksa, hkrati pa poveča potencial zgorevanja. * Uporaba cevovodov za zemeljski plin lahko v primeru vbrizga povzroči težave s kakovostjo vodika. Sestava plina se namreč lahko spremeni. * Vbrizg vodika lahko spremeni tlak plina v cevovodu (padeč) 	(Gu, Tang, Xiang, & Xie, 2019)

2019	Švedska	<ul style="list-style-type: none"> * Energetska tehnologija na osnovi vodika * Shranjevanje vodika 	* PEDOT polimer z organsko prevodnostjo - energija absorpcije vodika	(Wadnerkar, Berggren, & Zozoulenko, 2019)
2019	Francija	* Tehnologija vodikovih gorivnih celic	<ul style="list-style-type: none"> * Potrebe 2019 vodikove energetske infrastrukture na letališču. * Nov model oskrbovalne verige z vodikom. 	(Robles, Billoud, Azzaro-Pantel, & Aguilar-Lasserre, 2019)
2019	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Vodikovo gospodarstvo * Obnovljivi viri energije * Tehnologija transporta 	<ul style="list-style-type: none"> * Koncept FCEV ni konkurenčen na področju emisij ter stroškov. * Cena proizvodnje vodika je za 60 odstotkov večja od cene električne energije. * Koncept FCEV je konkurenčen, če se vodik proizvaja z večjim deležem energije iz obnovljivih virov. * Prihodnost je v hibridizaciji običajnih dizelskih motorjev. 	(Wolff, Fries, & Lienkamp, 2019)
2019	Norveška	<ul style="list-style-type: none"> * Varnost pri vodik * Ocena tveganja pri vodik * Dinamični postopek za identifikacijo nenavadnega scenarija (DyPASI) 	<ul style="list-style-type: none"> * Obstaja povezava med maso vodika v posodi, njegovim tlakom in potrebno razdaljo do BLEVE izhodom nadtlaka * Predstavlja osnovo za oblikovanje robustnih varnostnih ovir. * Obstaja velika potreba po dodatni varnosti. 	(Ustolin, Paltrinieri, & Guozheng, 2019)
2019	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Tehnologija vodikovih gorivnih celic * Električna vozila na gorivne celice 	<ul style="list-style-type: none"> • V prihodnosti je možen ekonomsko dosegljiv trg vodika. • Svetovne zaloge platine so zadostne. • Uravnavanje toplogrednih plinov z vodikom je zaenkrat negotovo, zaradi zapletenih mehanizmov v dobavni verigi. 	(Wanitschke & Hoffmann, 2019)
2019	Avstrija	<ul style="list-style-type: none"> * Shranjevanje vodika * Porazdelitev vodika * Učinkovitost procesa 	<ul style="list-style-type: none"> * Omrežje zemeljskega plina je lahko uporabno za distribucijo vodika. * HyhyPure ekstrakcija - ekstrakcija mešanice zemeljskega plina. 	(Liemberger, Miltner, & Harasek, 2019)
2018	Italija	* Električno vozilo z gorivnimi celicami LCA	<ul style="list-style-type: none"> * Potrebni so okviri LCA tehnologije. * Pogonski sklopi na osnovi vodika imajo višje stroške za namestitev in vzdrževanje. 	

			* Obstaja potreba po kompletni analizi integriranih hibridnih vhodno-izhodnih , vključno z električnimi vozili na baterije (BEV) in priključnimi hibridi (PHEV).	
2018	Nizozemska	* Metoda spremembe energije v tekočino (Power to liquid) * Modeliranje energetskih sistemov	* Potrebno je večje povpraševanje po vodik. * Razvoj gorivnih celic in sinteze goriv se mora nadaljevati saj je ključen za vodikove tehnologije. *Potrebno je določiti cilje, ki spodbujajo razvoj vodikovih tehnologij. * Demonstracijski projekti, ki zajemajo ogljik so nujno potrebni, zlasti za nadaljnji razvoj konceptov, kjer je uporaba ogljika z dodatkom vodika največja. * Metoda spremembe energije v tekočino (Power-to-Liquid) predstavlja glavno prednost v sektorju končne uporabe, saj je pri izvajanju sprememba obstoječe infrastrukture minimalna.	
2018	Španija	* Sistemi vodika * Eksperimentalna zanka PbLi	* Pristop prisilnega prodiranja vodika v tekočo kovino, skozi prepustno membrano z uporabo konfiguracije cev znotraj cevi, je zelo učinkovit.	(Garcinuño, Rapisarda, Moreno, Sanz, & Ibarra, 2018)
2018	Združeno kraljestvo	* Shramba obnovljive energije v vesolju * Poskusi proizvodnje vodika s spuščanjem stolpov * Raznolika topografija katalizatorja	* Avtor poudarja pomen morfologije elektrod, ki igra pomembno vlogo pri izvajanju fotokemičnih reakcij v mikro-gravitacijskih pogojih. * Generiranje vodika s svetlobo je zelo učinkovito v mokrem gravitacijskem okolju, kar dokazuje fotokemični let, izveden s poskusom.	(Brinkert, in drugi, 2018)
2018	Nemčija	* LCA za transport in distribucijo vodika	* Cevovod je najugodnejša rešitev za distribucijo. Distribucija LOHC predstavlja ekonomsko prednost v primerjavi z običajnim prevozom na dolge razdalje. * Potrebne so raziskave LCA na resničnem primeru in ne samo z povzetkom problema. Potrebna bi bila tudi razprava o možnosti zagotavljanja toplote za dehidrogenacijo LOHC, saj študije kažejo velik negativni vpliv na okolje.	(Wulf, in drugi, 2018)
2017	Grčija	* Shranjevanje energije z Vodikovo tehnologijo	* Optimalna rešitev za shranjevanje vodika * Optimalna velikost shramb vodika * Vpliv uporabe skuterjev na vodik na otokih na porabo goriva.	(Kavadias, Apostolou, & Kaldellis, 2018)

2019	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Proizvajanje vodika iz pajkove svile * Ekološko proizveden vodik 	<ul style="list-style-type: none"> * Pajkova svila se lahko z kombinacijo zlata in titana uporablja za proizvodnjo vodika Dve nasprotno naelektreni vlakni sta bili spremenjeni v film ki je proizvajal vodik * To delo nam daje osnovno znanje o tehnologijah za proizvodnjo vodika iz recikliranih hibridnih materialov 	(Herold, in drugi, 2019)
2018	Združene države Amerike	<ul style="list-style-type: none"> * Bio olje iz hitre pirolize biomase * Živiljenjski cikel toplogrednih plinov 	<ul style="list-style-type: none"> * Molekula vodika je potrebna za prekinitev ogljikove vezi in druga za odstranitev atoma kisika v kisikovitih bio-oljnih spojin. * Količina vodika, ki se porabi v vsakem od hidro obdelovalnih naprav. 	(Sorunmu, Billen, & Elangovan, 2018)
2012	Avstralija	<ul style="list-style-type: none"> * Materiali ojačani z materiali v vozilih * Trdnost hibridnih kompozitov 	<ul style="list-style-type: none"> * Pet vrst kompozitnih laminatov je bilo preizkušenih pod napetostjo, stiskanjem in upogibanjem v treh točkah. * Sedanji kompozitni sistem je pokazal več odpovedi matrice pri upogibni obremenitvi in več odpovedi ojačitve pri tlačni obremenitvi. 	(Zhang, Chaisombat, He, & Wang, 2012)
2018	Nizozemska	<ul style="list-style-type: none"> * Procesi na solarno energijo z H₂O in CO₂ * Tehnologije, potrebne za proizvodnjo obnovljivega vodika 	<ul style="list-style-type: none"> * Cena goriv REN se bo precej znižala. * Proizvodnja goriv REN lahko postane dragocen prispevek k vzpostavitvi CO₂ nevtralnega energetskega sistema. 	(Detz, Reek, & van der Zwaan, 2018)
2018	Anglija	<ul style="list-style-type: none"> * Tehnologije, ki se uporabljajo za pridobivanje biometana in vodika. * Razogljičenje energetskega sistema v prihodnosti 	<ul style="list-style-type: none"> Povezava virov energije, upravljanje pri porabnikih , rezervna energija pridobljena iz plina in shramba plina ter elektrike. * Dekarbonizirano plinsko omrežje predstavlja pomembno prednost pred elektroenergetskimi omrežji in predstavlja relativno poceni shranjevanje energije. 	(Speirs, in drugi, 2018)
2018	Francija	<ul style="list-style-type: none"> * Vpliv tehnologij sekundarnih virov * Strategije upravljanja z energijo na sistemu za shranjevanje energije. 	<ul style="list-style-type: none"> * Primerjave mase, stroškov in porabi goriva normalnih in hibridnih vozil ki imajo daljši dolet. * Obstajajo 3 strategije za optimalno hibridno porabo energije. Prvi temelji na ločevanju velike in majhne moči, druga dva pa na izračunavanju cikla moči. 	(Bendjedja, Rizoug, Boukhnifer, Bouchafaa, & Benbouzid, 2018)
2018	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Dobavne omrežne verige * Energijo lahko pretvorimo v vodik in nazaj 	<ul style="list-style-type: none"> * Znižanje cene električne energije lahko naredi tehnologijo elektrolize vode konkurenčno fosilnim gorivom. * Tehnologija uplinjanja premoga je trenutno še vedno prevladujoča tehnologij tako z vidika gospodarnosti kot tudi izvedbe. 	(Ochoa Bique & Zondervan, 2018).

2018	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Verige za oskrbo z vodikom za mobilnost * Ocena stroškov LCA 	<ul style="list-style-type: none"> * Biometan bi lahko proizvajali le iz odpadne biomase. * Da bi zmanjšali razdaljo med gospodarsko in okolju prijazno proizvodnjo, se bodo morali investicijski stroški za vetrno in sončno energijo znižati. 	(Wulf & Kaltschmitt, Hydrogen supply chains for mobility-Environmental and economic assessment, 2018)
2018	Norveška	<ul style="list-style-type: none"> * Preoblikovanje parnega metana * Kemična predelava fosilnih goriv ali biomase 	<ul style="list-style-type: none"> * Ekstrakcija vodika preko H2 vlaknenih membran * Če se stroški membrane znižajo, lahko ta proizvodnja postane popularnejša od proizvodnje vodika kot preoblikovanje parnega metana. 	(Wassie, in drugi, 2018)
2017	Italija	<ul style="list-style-type: none"> * Shranjevanje vodika * Ogljikove nanostrukture 	<ul style="list-style-type: none"> * Magnezij je ena od možnih rešitev, ki ima dobre lastnosti za shrambo H2. * Visoke temperature, ki so v procesu dehidrogenacije magnezijevega hidrida, še vedno omejujejo njegovo uporabo v mobilnih in stacionarnih aplikacijah. 	(Liu, in drugi, 2017)
2018	Indija	<ul style="list-style-type: none"> * Vpliv okoljske reforme na indijski promet * Reforme v prometnem sektorju 	<ul style="list-style-type: none"> * Promocija čistih in varčnih tehnologij vozil ter raziskave o čistih in nizkoogljicnih gorivih. * Podpora politike za čiste transportne tehnologije, elektrifikacija prometa, prehod na nizko intenzivnost oskrbe z električno energijo, ki uporablja CO2. 	(Dhar, Pathak, & Shukla, 2018)
2018	Španija	<ul style="list-style-type: none"> * Načini shranjevanja * Španske reforme glede čistejšje energije 	<ul style="list-style-type: none"> * Ocena potenciala uporabe plina v Španiji leta 2050. * Leta 2050 bi obnovljivi viri energije proizvajali več kot 63 % proizvodnje električne energije, 	(Bailera & Lisbona, 2018)
2018	Škotska	<ul style="list-style-type: none"> * Zmanjšanje ogljikovega dioksida odvisno od uporabe vodika * Tehnologije za zmanjševanje ogljika 	<ul style="list-style-type: none"> * Uporaba visokotlačnih reaktorjev za učinkovito biokatalizo celotnih celic biokatalize - Escherichia coli * E. coli ima več prednosti pri proizvodnji celoceličnih biokatalizatorjev in potencial za vključitev tega sistema v druge projekte biološke predelave. 	(Roger, Brown, Gabrielli, & Sargent, 2018)

2018	Anglija	* Pogon na metanol * Metanol kot nadomestek bencina	* Stroški nefosilnega CO2 in elektrolitskega vodika se morajo znatno zmanjšati, da bo postopek prenosa moči na gorivo ekonomsko izvedljiv. * V tej smeri je zelo aktivno raziskovalno področje hidrogeniranje CO2.	(Daggash, in drugi, 2018).
	Romunija	* Reforma zemeljskega plina * Zajemanje ogljika	* Tehnologije zajemanja, uporabe in skladiščenja ogljika so obetavne možnosti za boj proti podnebnim spremembam	(Cormos, Szima, Fogarasi, & Cormos)
2018	Romunija	* Hibridna električna vozila * Gorivne celice	* Gorivne celice lahko učinkovito pretvorijo vodik v energijo in se uporabljajo za polnjenje baterij in ultrakondenzatorjev, kar izboljša čas med polnjenjem goriva. * Cena gorivne celice PEM se je v zadnjih desetih letih znižala za tretjino in naj bi leta 2020 znašala 20 % trenutne vrednosti (na kW).	(Aschilean, in drugi, 2018)
2018	Romunija	*Gorivne celice * Hibridna električna vozila	* Vodikove gorivne celice lahko učinkovito pretvorijo vodik v energijo. *Cena PEM gorivnih celic se vidno znižuje, zato je ta tehnologija pripravljena za uporabo.	(Aschilean, et al., Hybrid Electric Powertrain with Fuel Cells for a, 2018)
2018	Združene države	*Piroliza biomase	* Obstaja možnost za veliko izboljšav pri stroških pretvorbe energije z katalitsko pirolizo.	(Iisa, in drugi, 2018)
2018	Nemčija	*Kriogeni vodikovi rezervoarji *Vodikovi rezervoarji za letalsko industrijo	*Pomembno področje nadaljnjih raziskav je integracija rezervoarja v trup letala in zmanjšanje pomanjkljivosti energetskih sistemov ter kako bi povečali gostoto zbrane energije v rezervoarju.	(Winnefeld, Kadyk, Bensmann, Krewer, & Hanke-Rauschenbach, 2018)
2017	Italija	*Gorivne celice *Vodik *Transport	*Za zdaj je najbolj učinkovita vrsta transporta prevoz z sredstvi na hibridni pogon. *Takšna vrsta pogona zmanjša čas polnjenja na 30 minut.	(Napoli, in drugi, 2017)

		*Nič emisij		
2017	Finska	*Energija za plin (P2G) *Biomasa *Energetski sistem	* Glaven namen P2G sistemov je dobava sintetičnega plina v prometni ter industrijski sektor, namesto da deluje kot hranilnik električne energije iz obnovljivih virov. * P2G mora konkurirati uplinjanju biomase pri proizvodnji sintetičnega plina.	(Pursiheimo, Holttinen, & Koljonen, 2017)
2017	Kolumbija	*Bioenergija *Proizvodnja vodika z uplinjanjem * Pinus patula	* Pridelava sadik in gojenje Pinusa patulije sta dva faktorja, ki sta glavna za emisije pri procesa pridobivanja vodika na ta način. * Prednosti pri gojenju Pinusa patulije so agrokemična uporaba in prevoz lesa iz posekane cone do zbirnega centra.	(García, M., M., Aroca, & Cardona, 2017)
2017	Nizozemska	*Gorivna celica *Baterija *Avtomobilska industrija *Prednosti in slabosti	*Vozila na vodikove gorivne celice trpijo zaradi vprašljivega shranjevanja vodika ter varnosti vozil, vozila ki uporabljajo baterije pa se soočajo z izzivi glede dosega ter dolgih polnilnih šasov. *Ugotovitve so pokazale da imajo zaenkrat več možnosti vozila na baterije v bitki z vozili na vodikove gorivne celice.	(van de Kaa, Scholten, Rezaei, & Milchram, 2017)
2017	Nemčija	* Razcep vode * Termo-kemični cikli * Žveplo	* Neposredno cepljenje termalne vode verjetno ne bo izvedljivo zaradi materialnih težav pri izredno visoki temperaturi, ki je potrebna za proces, vendar termokemični cikli ponujajo številne možnosti in priložnosti. * Dve glavni raziskovalni nalogi za razvoj termokemičnih ciklov sta izboljšanje solarnih vmesnikov in integracija shem rekuperacije toplote.	(Sattler, Roeb, Agrafiotis, & Thomey, 2017)
2017	Norveška	*Butanol *Shranjevanje energije *Transport goriva	* Metodologija omogoča, da se tekoča goriva proizvajajo iz obnovljive, vremensko odvisne električne energije v času, ko bi bila drugače okrnjena..	(Dowson & Styring, 2017)
2017	Španija	*Javni odnos *Vodikove tehnologije	* Sprejemanje in podpora HFC je v sedmih državah na splošno visoka. Na splošno je sedem preučevanih populacij po stališču do tehnologij HFC podobnih.	(Oltra, Dütschke, Sala, Schneider, & Upham, 2017)
2017	Španija in Italija	*CO ₂ *Toplogredni plini	*CO ₂ se lahko pretvori v karbonate ali različne izdelke z dodano vrednostjo, kot so biogoriva in bioplastika, ki reciklirajo CO ₂ iz fosilnih goriv.	(Godoy, Mongili, Fino, & Auxiliadora Prieto, 2017)

		*Odstranjevanje CO ₂ iz atmosfere	*Treba bi bilo raziskati nove hibridne tehnologije, da bi bil celoten postopek učinkovitejši.	
2017	Združeno kraljestvo	* Nizko ogljična infrastruktura *Vodikove tehnologije *Kritični materiali *Krožno gospodarstvo	* Skupna učinkovitost pretvorbe električne energije iz omrežja v električno energijo, ki poganja motor vozil, je za Li-ion baterije 90% v primerjavi z vodikovimi gorivnimi celicami, kjer učinkovitost znaša 56 %. * Uporaba splošnih tehnologij v nizkoogljčnih infrastrukturah ustvarja priložnosti za ponovno uporabo komponent v različnih infrastrukturnih sektorjih.	(Busch, Dawson, & Roelich, 2017)
2017	Nizozemska	*Analiza cene energije *Avtomobili na gorivne celice *Pametno mesto	* Ugotovljeno je bilo, da lahko za pametna mestna z elektriko pridobljeno iz obnovljivih virov energije natančneje solarno ter vetrno, skupaj z električnimi vozili na gorivne celice kot generatorji in distributerji energije ter vodik kot nosilec energije zagotovijo 100 % obnovljiv, zanesljiv in stroškovno učinkovit energetske sistem za električno energijo, toploto in prevoz.	(Oldenbroek, Verhoef, & van Wijk, 2017)
2016	Francija	*Shranjevanje vodika *Kovinski hidridi * Kompozitne tlačne posode *Kriogene posode	* Magnezijev hidrid je eden najbolj obetavnih načinov za shranjevanje vodika v trdnem stanju. * Kar zadeva kompozitne tlačne posode, ostajajo izzivi za izboljšanje trajnosti in zanesljivosti, hkrati pa morajo še vedno zagotavljati varnost jeklenk v obdobju 20 let in več za visokotlačno skladiščenje.	(Barthelemy, Weber, & Barbier, 2016)
2017	Avstralija	*Recikliranje vodika *Elektrokemični sistem	* Rezultati, pridobljeni z elektrokemijskim sistemom za recikliranje vodikovega plina (HRES) za pridobivanje tehničnega amonijevega nitrata (TAN), so zelo obetavni * Poleg tega bi bilo recikliranje vodika lahko zanimiva možnost za pridobivanje TAN iz odpadnih voda, ki nimajo dovolj biorazgradljive organske snovi za trenutno proizvodnjo.	(Kuntke, in drugi, 2017)
2016	Italija	*Gorivne celice proti baterijam *Elektroletalstvo *Shranjevanje energije	* Za začetno vrednost energijske vsebnosti (1,9 MJ) se je izkazalo, da so baterije zaradi manjše skupne mase, ki je potrebna glede na gorivno celico zmagale proti gorivnim celicam, zlasti pa je bila tehnologija LiFP6 najboljša glede na največjo bruto vzdržljivost in LiPo baterija, ki ima najmanj emisij.	(Donato, Ficarella, Spedicato, Arista, & Ferraro, 2016)
2016	Združeno Kraljestvo	*PEM Gorivne celice *Vodikove tehnologije *Avtomobili na gorivne celice	* Zmanjšanje vplivov na okolje, povezanih s proizvodnjo vozil na gorivne celice, še vedno predstavlja pomemben izziv, ki ga je treba obravnavati v prihodnjih letih ter strmeti za čim manjšim onesnaževanjem okolja.	(Evangelisti, Tagliaferr, Brett, & Lettieri, 2016)

2017	Nizozemska	*Dvostopenjski sistem za čiščenje hranil in energije iz urina	* Prvi korak: fosfor - (P) smo predelali v reaktorju MAP (magnezijev amonijev fosfat). * Drugi korak: odtok iz reaktorja MAP se uporablja za skupno pridobivanje amoniaka in dušika (TAN) in proizvodnjo vodika v mikrobnih elektroliznih celicah (MEC). . Ta MEC je bil povezan z modulom Transmembranechemisorption (TMCS), v katerem je bil TAN pridobljen kot raztopina amonijevega sulfata.	(Zamora, in drugi, 2017)
2017	Italija	*Avtobusni javni prevoz na Trapani Sicilija	* Razpoložljivost biomase, vetra in morskega plimovanja ter valovanja kaže, da bi uporaba teh virov za proizvodnjo elektrolitskega vodika omogočila nadomestitev celotne flote mestnih avtobusov, ki jih poganja dizelsko gorivo, z enakim številom vozil na vodik.	(Franzitta, Curto, Milone, & Trapanese, 2017)
2017	Nemčija	* Pot do 100-odstotne oskrbe z obnovljivimi viri na Kanarskih otokih do leta 2050	* Združuje dve metodi: - Model Mesap-PlaNet - Model REMix * Obstajajo možnosti za popolnoma obnovljivo oskrbo arhipelaga z energijo, toploto in energijo kopenskega prometa. * Predlagano je prilagodljivo delovanje polnjenja BEV, vodikove elektrolize, naprav za razsoljevanje morske vode z reverzno osmozo, električnega ogrevanja, SPTE in električnega hlajenja. * Treba je omogočiti inteligentno polnilno infrastrukturo ter shranjevanje toplote, vodika in vode. * Podvojitve zmogljivosti vetra je potrebna do leta 2020 in ponovno do leta 2025, * Do leta 2020 je treba potrojiti sedanje PV naprave, do leta 2025 pa še ponovno podvojiti. * morske kableske povezave med vsemi otoki kanarskega arhipelaga lahko omogočijo znižanje stroškov oskrbe za 15 %.	(Gils & Simon, 2017)

2016	Norveška	* Sklad CO2 za industrijo na Norveškem	<p>* Udeleženci sklada bodo plačali (nižjo) udeležbo v zameno za zavezo k ukrepom za zmanjšanje emisij.</p> <p>* Po študiji je stroškovno najučinkovitejše usmerjati subvencije sklada k alternativam za biodizel (največji prispevek k zmanjšanju CO2 na področju železniškega voznega parka).</p> <p>* Sklad bi moral razmisliti tudi o subvencioniranju dražjih obnovljivih tehnologij, ki temeljijo na bioplinu, elektriki ali vodik.</p>	(Pinchasik & Hovi, 2016)
2016	Združeno kraljestvo	* Študija verige oskrbe z vodikom do leta 2070 v Veliki Britaniji	<p>* Študija predstavlja kompromis med:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Optimalno (centralizirana) proizvodnjo H2: SMR s CCS v kombinaciji s sistemom cevovodnega transporta, - Brez zajemanja in shranjevanja ogljika: uvoz H2, razpršena elektroliza (manjše rastlinske tehnice - za izravnavo stroškov prevoza), ki se napaja iz občasnih obnovljivih virov energije 	(Moreno-Benito, Agnolucci, & Papageorgiou, 2016)
2016	Italija	<p>* Transport vodika</p> <p>* Vodikovi izdelki</p>	<p>* V bližnji prihodnosti bi se omrežje zemeljskega plina lahko soočalo z vse večjim deležem alternativnih goriv, kot sta biometan in vodik.</p> <p>* Ta pot je pravzaprav še posebej obetavna za doseganje okoljskih ciljev zmanjšanja emisij CO2, tako v toplotni kot v končni električni uporabi.</p> <p>* Rezultati kažejo, da so dovoljene frakcije vodika omejene in zelo občutljive na profil in velikost odvodnih priključkov na cevovodu.</p>	(Guandalini, Colbertaldo, & Campanari, 2016)
2016	Italija	<p>* Dovodna veriga vodika</p> <p>* Shranjevanje vodika</p>	<p>* Kljub napredku na področju raziskav in tehnologij se vodik še vedno trudi uveljaviti, predvsem zaradi težav na področju razširitve infrastrukture, ki je tesno povezana z naložbenimi napori.</p> <p>* Vendar je mogoče pokazati, da bo s prihodnjim razvojem vodik izvedljiva izbira kot gorivo za zadovoljevanje potreb po energiji, zlasti v urbanih območjih * Vodik je vsestranski in se lahko uporablja tako za mobilnost kot za potrebe toplote in elektrike v stanovanju. Razvoj takšnega sistema je bil raziskan z uporabo energetskega modela TIMES (REACCESS), ki zajema ves svet, še posebej podrobno pa Evropo.</p>	(R. & Grosso, 2016)

2016	Španija	* Model, ki združuje pogon na plin (P2G elektroliza H ₂) in prekomerni sintetični zemeljski plin (SNG) (metanacija) za integracijo v energetske sistem.	* H ₂ kot vmesni produkt; možnost 1: ponovna pretvorba nazaj v električno energijo, možnost 2: izdelava SNG za vbrizgavanje v plinsko omrežje (prednost pri skladiščenju, prevozu in uporabi); Model temelji na: - Delovanju elektrolizatorja z uporabo nihajnih vplivov z visokim deležem obnovljivih virov za proizvodnjo vodika. - Z uporabo optimiziranega procesa metanacije z omejenim dvigom temperature z recikliranjem reagiranih plinov hkrati z odstranjevanjem vode, ki nastane med sintezo metana; brez omejitev ga je mogoče dodati v distribucijsko omrežje plina. * Zmanjšanje rezervne porabe energije je možno le pri velikem pomnilniku, kjer lahko shramba P2G doseže sprejemljivo ekonomičnost v takem obsegu.	(Gutierrez-Martin & Rodriguez-Anton, 2016)
2016	Francija	* Analiza obdobja med letom 2015 in 2055, ko zamenjava vozil z motorjem na notranje zgorevanje (ICEV) z vozili na gorivne celice (FCV) postane družbeno-ekonomsko donosna.	* Analiza upošteva mešanico petih tehnologij za proizvodnjo vodika: procesi reformiranja zemeljskega plina z ali brez zajemanja in shranjevanja ogljika, elektroliza, procesi bioplina in proizvodnja na kraju samem. - Avtorji napovedujejo, da bi lahko trg ogljika financiral približno 10% stroškov uvajanja prevoza na osnovi vodika in da bi se lahko zgodila gospodarska preusmeritev v FCV.	(Cantuarias-Villesuzanne, Weinberger, Roses, Vignes, & Brignon, 2016)
2016	Združeno kraljestvo	* Gorivne celice na vodik * Proizvodnja energije z vodikom	* Delovanje tekoče kovinske anode SOFC, ki se napaja z vodikom preko kemijsko-elektrokemičnega mehanizma, je bilo raziskano z novo tako imenovano anodno injekcijsko kulometrijo * Tehnika omogoča določanje dinamičnega koeficienta izkoriščenosti kisika, $\bar{\eta}$, ki ima pomembne posledice pri načrtovanju in delovanju SOFC anodnih tekočih kovin.	(Toluova, Maskell, Yufit, Shearing, & Brett, 2016)
2016	Kanada	* Vodik za transport * Infrastruktura za proizvodnjo vodika	* V raziskavi je opazno število anketirancev, ki so kljub obveščeni o okoljskih koristih vodika iz obnovljivih virov še vedno izjavili, da želijo znižanje cen glede na običajna goriva.	(Southall & Khare, 2016)

			<p>* Dokazano je, da na stroške proizvedenega vodika močno vplivajo ekonomije nameščene opreme za proizvodnjo električne energije.</p> <p>* Študija je ugotovila, da je finančno in tehnološko izvedljivo proizvajati vodik na prodajnem mestu za območja v Združenem kraljestvu, ki se srečujejo s povprečno nacionalno hitrostjo vetra.</p> <p>* Solarne celice ni mogoče uporabiti kot obliko proizvodnje električne energije v konfiguraciji vodikove proizvodnje, da bi zadostili zahtevam za izdelavo goriva.</p>	
2016	Italija	<p>* Proizvodnja vodika</p> <p>* Vodikove lastnosti</p> <p>* Vodikova industrija</p>	<p>Postopek OSH (vodik v enem koraku) ponuja privlačno rešitev sanj o ugodnem črpanju vodika iz vode.</p> <p>* Vključuje uporabo fosilnega vira, zemeljskega plina, vendar so emisije ogljika okolju prijazne, saj se CO2 dovaja kot tekoči tok, ki ne zahteva nadaljnega upravljanja.</p> <p>* Ta pristop bi lahko v naslednjih nekaj desetletjih, dokler ne bodo tehnološko in ekonomsko na voljo alternativni primarni viri energije, znatno prispeval k nadzoru emisij toplogrednih plinov.</p>	(Sanfilippo, 2016)
2016	Italija		<p>Postopek OSH (vodik v enem koraku) ponuja privlačno rešitev sanj o ugodnem črpanju vodika iz vode.</p> <p>* Vključuje uporabo fosilnega vira, zemeljskega plina, vendar so emisije ogljika okolju prijazne, saj se CO2 dovaja kot tekočina, ki ne zahteva nadaljnega upravljanja.</p> <p>* Ta pristop bi lahko v naslednjih nekaj desetletjih, dokler ne bodo na voljo tehnološko in ekonomsko dostopni alternativni primarni viri energije, znatno prispeval k nadzoru emisij toplogrednih plinov.</p>	(Molinas, et al., 2016)
2015	Južna Afrika	<p>* Vodik za transport</p> <p>* Proizvodnja energije</p>	<p>* Povpraševanje po vodiku naj bi sledilo splošnemu profilu bencina. Najvišje povpraševanje po gorivu se pojavi pred in po delovnem času, ko potrošniki napolnijo svoja vozila na poti v službo in domov.</p> <p>* Dodatna električna energija, ki jo zahteva porazdeljeni elektrolitski sistem, zahteva natančnejšo preučitev, ker bo v času največje obremenitve morda potrebno vključiti elektrolitski postopek, kar bi dodatno obremenilo proizvodnjo električne energije in porabo električne energije po višji ceni.</p>	(Gajjar & Mondol, 2015)
2016	Poljska	<p>* Proizvodnja vodika</p> <p>* Učinkovitost proizvodnje</p>	<p>* Najpomembnejša zahteva, ki jo morajo izpolnjevati proizvajalci vodika, je donos energije 60 g (H₂) / kWh.</p> <p>* Nekatere plazemske tehnologije izpolnjujejo zahteve donosa energije.</p> <p>* Sklep iz te ocene stroškov je, da čeprav je metoda plazmatrona zelo učinkovita pri proizvodnji vodika, so naložbe in tekoči stroški za ta pristop razmeroma visoki.</p>	(Mizeraczyk & Jasiński, 2016)

2016	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Vodikove lastnosti * Struktura vodika 	<ul style="list-style-type: none"> * Hidrogenaze so metaloencimi, ki katalizirajo reverzibilno heterolitično cepitev vodika v protone in elektrone * Razumevanje arhitekture in funkcije predorov, je ključnega pomena za prilagajanje značilnosti tolerance O2 v podskupini [NiFe] hidrogenaz 	(Kalms, et al., 2016)
2015	Združeno kraljestvo	<ul style="list-style-type: none"> * Vodikove lastnosti * Reakcije v gorivnih celicah 	<ul style="list-style-type: none"> * Stabilnost in temperatura v vodiku sta pomembni za učinkovito kemično reakcijo. * Nova spoznanja imajo pomembne posledice za uporabo nanodelcev v kemijskih procesnih tehnologijah, vključno s transportnimi gorivi in nadzorom emisij 	(Gai, et al., 2015)
2015	Nemčija	<ul style="list-style-type: none"> * Elektrokatalizatorji vode * Proizvodnja vodika 	<ul style="list-style-type: none"> * Nove bi-funkcionalne elektrode lahko povečajo stabilnost dvo-funkcionalnega elektrokatalizatorja, ki je sicer omejen s korozijskimi procesi. * Ta pristop lahko pomaga tudi pri težavah z nestabilnostjo, ki so bolj povezane z elektrodami v elektrolizatorjih. 	(Martindale & Reisner, 2015)
2016	Španija	<ul style="list-style-type: none"> * Vodik za transport * Javno mnenje o vodiku 	<p>Rezultati ozaveščenosti o vodiku za prevoz na podlagi raziskave s 1005 anketiranci:</p> <ul style="list-style-type: none"> - visoka raven zavedanja o obstoju raziskovalne dejavnosti na vodiku kot gorivu za prevoz, - močna socialna podpora v vzpostavitvi lokalnih postaj za oskrbo z vodikom, vendar po možnosti stran od stanovanjskih naselij, - potreben je prodor na množični trg, ki vodi do dostopnih cen vozil, - močna socialna podpora za uvedbo cenovno ugodnega davka za uporabo vodika v sistemu javnega prevoza. 	(Iribarren, Martín-Gamboa, Manzano, & Dufour, 2016)
2014	Združene države Amerike	* Zmanjšanje emisij toplogrednih plinov	<ul style="list-style-type: none"> * Po mnenju strokovnjakov so kratkoročno stroškovno učinkovite rešitve lahko sestavljene iz treh glavnih raziskovalnih področij: - vlaganje v učinkovitejša vozila z obstoječimi tehnologijami, izdelava manjših, lažjih vozil in naprednih motorjev z notranjim zgorevanjem (ICE), - zmanjšanje celotnega povpraševanja po cestnem prometu, - spodbujanje zakonodaje o zmanjšanju emisij CO2. 	(Luè, et al., 2014)

2015	Združeno kraljestvo	<ul style="list-style-type: none"> * Shranjevanje energije iz obnovljivih virov * Plinsko omrežje * P2G "plačaj in se odpelji" 	<ul style="list-style-type: none"> * Rezultati kažejo, da lahko P2G za scenarij National Grid 'Gone Green' v Veliki Britaniji povzroči dodatno vključitev 35,6 TWh / letno iz proizvodnje obnovljivih virov in 23,9 TWhgas/letno plina. 	(Clegg & Mancarella, 2015)
2015	Nizozemska	<ul style="list-style-type: none"> * Vodikove lastnosti * Kvantna kemija vodika 	<ul style="list-style-type: none"> * Molekularni vodik je najbolj razširjena molekula. Opazovanja so pokazala, da lahko ta molekula tvori in preživi v ekstremnih pogojih, kot so močna polja UV / X-žarkov, hladni in topli plini in prah ali regije po šoku. 	(Cazaux, et al., 2015)
2015	Nizozemska	<ul style="list-style-type: none"> * Vodik za prihodnje razogljčenje * Vodik kot dolgoročna rešitev 	<ul style="list-style-type: none"> * Železarski in jeklarski sektor bo glavni potrošnik novih vodikovih tehnologij. Pomemben je tudi prodor vodika v prometni sektor, pa tudi proizvodnja in skladiščenje, ki imata tudi pomembno vlogo pri povečanju prožnosti sistema. * Toda prodiranje vodika v energetske sistem zahteva znatno povečanje naložb v pripadajočo infrastrukturo za proizvodnjo in dobavo vodika. 	(Sgobbi, et al., 2015)
2015	Združeno kraljestvo	<ul style="list-style-type: none"> * Proizvodnja vodika * Razogljčenje z vodikom 	<ul style="list-style-type: none"> * Povpraševanje po domačem prometu v Veliki Britaniji je mogoče zadostiti z uporabo samo kopnega vetra prek ustrezno zasnovanega omrežja. * Vendar niso vse vetrne elektrarne na idealni lokaciji in potrebujejo dražje skladišče, da jih lahko izkoristijo v energetske omrežju. Brez podzemnega skladišča je optimalno omrežje 25% dražje, kar kaže, kako pomembni so veliki sezonski skladiščni prostori. 	(Samsatli, Staffell, & Samsatli, 2015)
2016	Italija	<ul style="list-style-type: none"> * Proizvodnja vodika * Vodikova energija za promet 	<ul style="list-style-type: none"> * Proizvodnja vodika bi lahko omogočila nadomestitev celotnega voznega parka mestnih avtobusov. * Glede na tri različne scenarije bi bile potrebe po električni energiji teh avtobusov zadovoljene s petimi turbinami za manjša mesta. * Vendar problemu uravnoveženja energije med povpraševanjem in realno proizvodnjo niso posvetili pozornosti. 	(Franzitta, Curto, Rao, & Viola, 2016)

4 RAZISKOVALNI TRENDI PRI RAZISKOVANJU VPLIVA VODIKA IN VODIKOVIH TEHNOLOGIJ

Na podlagi pregleda literature je bilo opredeljenih deset ključnih dejavnikov, ki bodo vplivali na nadaljnji razvoj vodika in z njim povezanih tehnologij. Glavni dejavniki vključujejo ekonomijo vodika, vodikove tehnologije, varnost, proizvodnjo vodika, distribucijo vodika, shranjevanje vodika, energetske sisteme, LCA, okoljske vidike uporabe vodika ter uporaba vodika v transportu. Na podlagi tega pregleda so v tabeli 14 dejavnikom dodane razvojne usmeritve v prihodnosti.

Tabela 15: Glavna razvojna usmeritev

Ključni dejavniki	Trenutno aktualna raziskovalna področja	Raziskovalni trendi v prihodnosti
Ekonomija vodika	<ul style="list-style-type: none"> - Trenutno je trg vodikovih nezanimiv. - Vlade imajo velik vpliv v povezavi z implementacijo vodika. - Trenutno uporaba H iz vidika ekonomije še ni učinkovita. - Pomanjkanje promocije tehnologije H - Pomanjkanje pozornosti vlagateljev - Veliko pravnih vprašanj s področja implementacije H - neprimerna proizvodnja H iz morske vode - slabe finančne injekcije v razvoj vodika - vzpostavitev cevovodov predstavlja najugodnejšo rešitev - Slaba podpora politika za čiste transportne tehnologije 	<ul style="list-style-type: none"> - Hitro razvijajoč trg - Povečan trg proizvodnje H vozil - Elektroliza predstavlja dober potencial z proizvodnjo H - Investicije v H predstavljajo konkurenčno prednost - nižji stroški proizvodnje materialov za rezervoarje - Tržni delež el. Vozil z gorivnimi celicami bo do leta 2050 dosegel 75 % - učinkovito skladiščenje v kavernah in cevovodih - ekonomsko dosegljiv trg vodika ob znižanju cen el. energije
Vodikove tehnologije	<ul style="list-style-type: none"> - Cyro kompresija - Elektroliza - Organska kondukcija PEDOT - HyhyPure ekstrakcija - Ekonomski model – proizvodnja cena - PEM Gorivne celice - Uplinjanje premoga - Ekstrakcija vodika preko H₂ vlaknenih membran - Magnezij – ena izmed rešitev za shranjevanje H - Neposredno cepljenje termalne vode 	<ul style="list-style-type: none"> - Uporaba visokotlačnih reaktorjev za učinkovito biokatalizo celotnih celic biokatalize - Escherichia coli - Obetavnost elektrokemijskega sistema za recikliranje vodikovega plina (HRES) - Inteligentna polnilna infrastruktura - Optimalno (centralizirana) proizvodnjo H₂: SMR s CCS v kombinaciji s sistemom cevovodnega transport - Postopek OSH (vodik v enem koraku)
Varnost	<ul style="list-style-type: none"> - Oblikovanje robustnih varnostnih ovir - Varnost visokotlačnega skladiščenja vodika - Varnost uporabe v zaprtih prostorih 	<ul style="list-style-type: none"> - varnostne zahteve in zakoni - potreba po dodatni, izboljšani varnosti - varnost samega vozila - varnost v primeru nesreče
Proizvodnja vodika	<ul style="list-style-type: none"> - Kakovostna proizvodnja vodika - Proizvodnja kombinacija uplinjanja s fluidiziranim slojem s paro in kisikom ter rafiniranja plazme - Uporaba modela? - Proizvodnja iz recikliranih hibridnih materialov 	<ul style="list-style-type: none"> - Razvoj novih tehnologij za proizvodnjo vodika - Vodik z nizkimi emisijami ogljika - Elektroliza z zeleno elektriko - Znižanje cen proizvodnje
Distribucija vodika	<ul style="list-style-type: none"> - Distribucija z GH₂ - Polnilne postaje - Domača proizvodnja vodika - Tekoči vodik je shranjen v 	<ul style="list-style-type: none"> - Uporaba omrežja zemeljskega plina - Mešanje vodika z zemeljskim plinom - Shramba P2G omogoča učinkovitejšo ter cenejšo shrambo

	<ul style="list-style-type: none"> izolirane sferične posode, da zmanjšamo izgube. -Dostava z vlaki ali tovornjaki - Cevovodi so stroškovno optimalni 	<ul style="list-style-type: none"> - Izbira načina distribucije glede na potrebe določenega območja
Shranjevanje vodika	<ul style="list-style-type: none"> -Uporaba omrežja zemeljskega plina za shranjevanje in distribucijo vodika -Uporaba magnezija za shrambo H₂ v trdnem stanju -Uporaba kovinskih hibridov za shranjevanje vodika - shranjevanje in pretvorba vodika v druge energije 	<ul style="list-style-type: none"> -Optimalna rešitev za shranjevanje vodika -Optimalna velikost shrambe za vodik -Zasnova rezervoarja za transportna vozila na vodik -Kompozitne tlačne posode -Uporaba materialov z lastno poroznostjo za shranjevanje vodika
Energetski sistemi	<ul style="list-style-type: none"> -Prodiranje vodika v energetski sistem zahteva znatno povečanje naložb v pripadajočo infrastrukturo - Vetna in sončna energija v energetskem sistemu - Optimalni sistem vključuje električne baterije in hranilnik vodika - Kombinirane polnilne postaje (elektrika, vodik) -Metoda spremembe energije v tekočino potrebuje minimalne spremembe obstoječe infrastrukture 	<ul style="list-style-type: none"> - Vodikove verige povečajo prilagodljivost energetskih sistemov - Prostorsko združevanje vetrnih regij. -Za uresničitev optimalnega energetske mešanice so potrebne vizije. - Ideja o energetski "srebrni krogli" (en sam vir energije, ki bi lahko zadostil vsem civilizacijskim potrebam), je jedrska energija četrte generacije -Oblikovanje energetske mešanice ki je varna pred vsemi predvidenimi scenariji
LCA – Analiza življenjskega cikla	<ul style="list-style-type: none"> - Pomanjkanje raziskav s področja LCA - Potrebni so okvirni LCA tehnologije - Potreba po kompletni hibridni vhodno-izhodni analizi raznolikega portfelja, vključno z električnimi vozili na baterije (BEV) in priključnimi hibridi - Potrebne so raziskave LCA na resničnem primeru in ne samo z povzetkom problema. - Ni raziskav za presojo P2G modela v daljšem časovnem obdobju 	<ul style="list-style-type: none"> - Za zmanjšanje razlike med ekonomično in okolju prijazno proizvodnjo, se bodo morali investicijski stroški za vetrno in sončno energijo znižati
Okoljski vidiki	<ul style="list-style-type: none"> - Globalno zmanjšanje CO₂ s pristopom energetskega združevanja - Potrebna je ostra ogljična proračunska politika ali CO₂ takse. - Določiti jasne podnebno nevtralne cilje. - biovodik z zajemom in shranjevanjem ogljika ima za več kot 230 % nižji vpliv na toplogredne pline od fosilnih goriv (ocena) - Koncept FCEV je konkurenčen, če se vodik proizvaja z večjim deležem energije iz obnovljivih virov - Goriva iz obnovljivih virov lahko postanejo dragocen prispevek k vzpostavitvi CO₂ nevtralnega energetskega sistema. - Stroški nefosilnega CO₂ se morajo znižati. V tej smeri je zelo aktivno raziskovalno področje hidrogenacije CO₂ - Tehnologije zajemanja, uporabe in skladičenja ogljika so obetavne možnosti za boj proti podnebnim spremembam. - Pridelava sadik in gojenje Pinusa patulije sta dva faktorja, ki sta glavna za emisije pri procesu pridobivanja vodika. - Sprejemanje in podpora HFC je v sedmih državah na splošno visoka. - CO₂ se lahko pretvori v karbonate ali različne izdelke z dodano vrednostjo, kot so biogoriva in bioplastika, ki reciklirajo CO₂ iz fosilnih goriv. - Tehnologije nizkoogljicnih infrastruktur omogočajo ponovno uporabo komponent v različnih infrastrukturnih sektorjih - Pametna mestna lahko z elektriko, pridobljeno iz sonca in vetra, skupaj z električnimi vozili na gorivne celice kot generatorji in distributerji energije ter vodik kot nosilec energije zagotovijo 100 % obnovljiv, zanesljiv in stroškovno učinkovit energetski sistem za električno energijo, toploto in prevoz. - Baterija LiPo ima najmanj emisij. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vodik je obetajoča tehnologija v transportnem sektorju za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, - Nizkoogljicni vodik je prepoznan kot ključni element prihodnosti - Za vlaganje v vodikove tehnologije je treba določiti konkurenčne in podnebju prijazne poti. - Raziskati nove hibridne tehnologije, da bi bil celoten postopek odstranjevanja CO₂ iz atmosfere učinkovitejši. - Pomemben izziv je zmanjšanje vplivov na okolje, povezanih s proizvodnjo vozil na gorivne celice. - Trg ogljika bi lahko financiral približno 10 % stroškov uvajanja prevoza na osnovi vodika. - Raziskovanje treh kratkoročno stroškovno učinkovitih rešitev: - vlaganje v učinkovitejša vozila z obstoječimi tehnologijami, izdelava manjših, lažjih vozil in naprednih motorjev z notranjim zgorevanjem (ICE) - Zmanjšanje celotnega povpraševanja po cestnem prometu - Spodbujanje zakonodaje o zmanjšanju emisij CO₂

	<ul style="list-style-type: none"> - Razpoložljivost obnovljivih virov energije (Trapani-Sicilija) bi omogočilo proizvodnjo elektroliznega vodika za nadomestitev celotne flote mestnih avtobusov na dizelski pogon z enakim številom vozil na vodik. - Norveška: Sklad CO₂ za industrijo. Udeleženci sklada bodo plačali (nižjo) udeležbo v zameno za zavezo k ukrepom za zmanjšanje emisij. Stroškovno najučinkovitejše so subvencije sklada biodizel (največji prispevek k zmanjšanju CO₂ na področju železniškega voznega parka). - Združeno kraljestvo: V raziskavi je opazno število anketirancev, ki so kljub obveščenosti o okoljskih koristih vodika iz obnovljivih virov še vedno izjavili, da želijo znižanje cen glede na običajna goriva. 	
Vodik v povezavi s transportom	<ul style="list-style-type: none"> -Hibridna prevozna sredstva -LH2 in LOHC -Kombinirane polnilnice -PEM gorivne celice -Zmanjšanje emisij CO₂ -Zmanjšanje stroškov vodikovih tehnologij 	<ul style="list-style-type: none"> -Hibridizacija dizelskih motorjev -Hidrogeniranje CO₂ -Javni prevoz -Pridelava vodika na mestu polnilnice -Varnost v vodikovih tehnologij v prometu -Izdelava manjših, lažjih in bolj ekonomičnih vozil

Glede na tabelo 15 ugotavljamo, da je trg vodika trenutno zelo nezanimiv, saj je cena vodika visoka. To se lahko spremeni v prihodnosti, saj države uvajajo tehnologije brez emisij. Na tem področju se izvaja vse več raziskav, te pa bodo omogočile znižanje cene vodika in ta bo lahko konkuriral ostalim gorivom. Odkritih je že bilo kar nekaj tehnologij na različnih področjih, od pridobivanja vodika do shrambe in uporabe le-tega. Pri proizvodnji se išče postopek, ki bi proizvajal čist in poceni vodik, hkrati pa ne bi v okolje spuščal emisij. Vodik lahko transportiramo na različne načine in v različnih fizikalnih stanjih. Trenutno se največ vodika transportira v plinastem stanju. V tem stanju ga distribuirajo tudi polnilne postaje, s katerimi polnimo vozila na vodik ter hibridna vozila. Prav tako pa je za izbiro idealnega distribucijskega sistema potrebno upoštevati razdaljo distribucije in količino vodika. Shranjevanje vodika v tekočem stanju ali pod pritiskom zahteva energijo, ki pa dviguje ceno vodika. Zato je potrebno vodik čim prej transportirati do porabnikov. Ena iz med možnosti shrambe vodika je shranjevanje v cevovodu zemeljskega plina. Za shranjevanje vodika v manjših količinah pa je trenutno najprimernejša tehnologija, ki uporablja magnezij za shranjevanje vodika v trdnem stanju. Prav tako pa lahko vodik pretvorimo v druge energije in jih nato shranimo. Potrebne so še raziskave, ki bi predstavila najprimernejše materiale za izdelavo vodikovih tankov ter prostornino le-teh. Da bi lahko vodik vključili v energetske sisteme bi bilo potrebno vložiti precej denarja v infrastrukturo. V energetskih sistemih se vodik povezuje s vetrno in sončno energijo, ki je potrebna pri proizvodnji vodika. Idealen energetski sistem uporablja vodik in baterije za pogon vozil. Za izboljšanje analize življenjskega cika (LCA) so potrebne še dodatne raziskave. Potrebno bi bilo narediti vhodno-izhodne analize raznolikega portfelja, tudi za vozila

na baterije. Dobro bi bilo raziskati LCA tudi na resničnem primeru. Prav tako pa manjkajo raziskave za presojo P2G (Power to gas) modela za daljše obdobje. Z energetskega združevanjem bi dosegli znižanje emisij CO₂ in s tem bi izboljšali okoljsko sliko. Razvijajo se tehnologije zajema, uporabe in shrambe ogljika. Ogljik se pretvori v karbonate ali druge izdelke, npr. biogoriva. Pametna mesta z učinkovito proizvodnjo in distribucijo električne energije dosegajo obnovljiv in stroškovno učinkovit energetske sistem. Z razpoložljivimi obnovljivimi viri energije bi dosegli zamenjavo dizelskih avtobusov z avtobusi na elektrolitski vodik. Povečala se bo uporaba hibridnih vozil. Za ta vozila potrebujemo kombinirane polnilnice. Povečala se bo tudi uporaba gorivnih celic PEM. S tem se bodo zmanjšale emisije CO₂. V prihodnosti bo mogoče predelati motorje na dizel v motorje na vodik. Večina potniškega prometa se bo preusmerila v javni prevoz. Vendar pa imajo vozila na vodik še nekatere varnostne ovire, ki jih bo potrebno v prihodnosti rešiti.

4.1 PREVERJANJE RAZISKOVALNIH VPRAŠANJ

Za namene raziskovalne naloge smo si zastavili raziskovalna vprašanja, na katera bomo v nadaljevanju skušali odgovoriti.

Raziskovalno vprašanje 1: Vodik predstavlja velik potencial uporabe v energetske sektorju?

Vodik kot zelo lahek plin predstavlja veliko alternativo fosilnim gorivom, posebej v transportu. Potrebno je rešiti še nekaj ključnih vprašanj, kot sta vprašanja shranjevanja in uhajanja. Velik problem pa je tudi izkoristek pri procesu pridobivanja in shranjevanja. V prihodnjih letih se bo vodikova tehnologija primorana razvijati zaradi vseh okolijskih sporazumov na svetovni ravni, kar bo rezultiralo več uporabe vodika. S čedalje več sporazumi in strožjimi zakoni na področju avtomobilske industrije se obeta velik napredek, še posebej pri vozilih na vodikove gorivne celice. V industriji so se že pojavile raziskave ter tudi realni primeri viličarjev na vodikov pogon, ki pa se niso obnesli, saj so bili glavni problemi veliki investicijski stroški ter varnost polnilne postaje v primeru nesreče na delovnem mestu, ki je običajno zaprt prostor. V primeru eksplozije rezervoarja, ki je pod visokim tlakom (200-300 Bar), lahko nastane velika škoda in ogrožena je varnost delavcev. Vodik ni vedno neposredno pretvorljiva energija, zlasti v nekaterih industrijskih procesih. Kot primer lahko uporabimo jeklarsko industrijo, ki ni odvisna le od premoga ali koksa, kot vira toplotne energije, temveč tudi od električne energije, potrebne pri končni obdelavi izdelka. Potreba po zmanjšanju emisij CO₂ je še posebej velika pri jeklarstvu, saj predstavlja enega najbolj energetsko požrešnih industrijskih procesov na svetu. Železarska in jeklarska industrija predstavljata tretjino svetovnih industrijskih emisij CO₂, kar pritiska na industrijo, da preide na bolj trajnostne načine proizvodnje. Vendar pa za industrijo, za katero sta značilni odvisnost od poti in tehnološke zapore, prehodi glede trajnosti niso enostavni. Na Švedskem se s pobudo, imenovano „Tehnologija za preoblikovanje vodika“ (HYBRIT, 2016), ki je še vedno v eksperimentalni fazi, zavezujejo k proizvodnji jekla brez fosilnih proizvodov. Cilj je, da bo železna in jeklarska industrija do leta 2045 imela nič emisij (PR, 2017). Tehnologija je končni cilj v industriji, saj na Švedskem ni na voljo nobene druge tehnologije, ki bi v enaki meri odpravila emisije CO₂. V skladu z vladnim ciljem proizvodnje brez fosilnih goriv do leta 2045 naj bi se ta prehod zgodil v naslednjih treh desetletjih, kar bi bilo drugje zaznati kot dolgotrajno.

Raziskovalno vprašanje 2: Vodik predstavlja trajnostno rešitev na področju transporta?

Onesnaževanje okolja s transportom ima velik vpliv na globalno segrevanje, ki pa je trenutno velik problem. Pri prehodu na brezogljivo vrsto transporta imajo velik vpliv električni avtomobili ter avtomobili, ki jih poganjajo vodikove gorivne celice. Vsak izmed dveh ima svoje prednosti ter slabosti. Izkazalo se je, da imajo trenutno prednost električni avtomobili, kar pa je tudi opazno v vsakodnevnem življenju, kajti vozil na vodikove celice zaenkrat še ni opaziti na naših cestah. Avtomobili na vodik imajo prednost pri kratkih polnilnih časih, medtem ko je slabost električnih avtomobilov dolg polnilni čas. Pri vodikovih celicah je pomembno, da za pogon uporabljamo čist vodik, ki ga proizvajamo z zeleno elektriko ali kako drugače. Pomembno je, da za vodik, ki ga proizvedemo, poskrbimo ustrezno shranjevanje brez uhajanja, in s tem povišamo izkoristek samega procesa. Tako pri cestnem kot tudi pri zračnem prometu pa se pojavlja vprašanje, kako je najbolje shraniti vodik in v kakšnem stanju naj ga shranimo. Za zdaj nam obljublja največ kirokompresija, saj lahko tako shranimo veliko energije v majhne volumnu. Problem pri tovrstnem shranjevanju je predvsem uhajanje, saj je vodik v plinastem stanju ter pod visokim tlakom, kar je tudi vprašljivo glede varnosti. V letalski industriji vodik postaja vse bolj priljubljen, kar dokazujejo tudi številne pogodbe letalskih družb s proizvajalci letal. Na področju letalstva pa se vodik že množično uporablja za pogon brezpilotnih letal (dronov), ti pa dosegajo dolge čase letenja, zahvaljujoč vodik, ki je kot gorivo zelo lahek v primerjavi z drugimi. V preteklosti so že imeli tudi vlak, ki so ga poganjale gorivne celice, a so jih trenutno premagali današnji električni vlaki. Vodik na področju transporta torej obljublja veliko, a je potrebno rešiti še veliko vprašanj.

Raziskovalno vprašanje 3: Vodik namesto fosilnih goriv za globalno reševanje energetske okoljske krize: izvedljivo ali ne?

Zaradi onesnaževanja okolja se je v zadnjih letih pokazala potreba po prehodu na obnovljive vire energije, pri čemer lahko kot gorivo uporabljamo tudi vodik, ki ga uporabimo v gorivnih celicah za proizvodnjo električne energije, ta pa poganja elektromotor. Vodik je uporaben zlasti zaradi količine energije, ki jo lahko shranimo v rezervoarju. Če primerjamo gostoto shranjene energije s fosilnimi gorivi, opazimo, da ima vodik večjo gostoto energije, če ga shranimo pod tlakom. Trenutno je sama proizvodnja vodika še zelo drag proces, zato je drag tudi vodik. V prihodnosti je načrtovana izgradnja več polnilnih postaj, kar bi pozitivno vplivalo na cene vodika kot energenta, moramo pa upoštevati tudi, da trenutno na cestah še ni opaziti veliko

vozil, ki uporabljajo vodikove gorivne celice za pogon. Cena vodika se bo po napovedih zniževala, ker bo na cestah vse manj vozil, ki bi uporabljala fosilna goriva. Pri proizvodnji in transportu vodika do polnilnic pa je za zdaj še veliko izgub, zato je najbolj učinkovit pristop proizvodnja vodika na mestu polnilne postaje, saj se tako izgubi veliko manj s transportom. Za reševanje globalne energetske okoljske krize pa je potrebno vodik proizvajati iz obnovljivih virov energije, kar pomeni, da mora biti elektrika, s katero izvedemo elektrolizo, zelena. Če je ta elektrika proizvedena v termoelektrarni, je naš postopek pridobivanja vodika umazan, kar pomeni, da tako ne bomo rešili energetske okoljske krize. Predstavljeni so bili že modeli, kjer bi na mestu polnilne postaje ter elektrolizerja stala še vetrnica ter bi se električna energija, proizvedena z vetrno elektrarno, uporabljala za elektrolizo vode. Tako bi dobili zeleni vodik brez stroškov transporta v polnilnice za avtomobile na gorivne celice. Ta model bi znatno zmanjšal ceno vodika ter pripomogel k zmanjšanju uporabe fosilnih goriv v dobro okolja. Trenutno so naprave za elektrolizo še drage, a se zdijo dobra investicija za prihodnost. Vodik namesto fosilnih goriv je torej izvedljiv, gledano na dolgi rok, pri tem pa morajo svoj del prispevati tudi proizvajalci avtomobilov, ki bi si morali prizadevati za izdelavo čim več avtomobilov, ki uporabljajo zeleno energijo kot gorivo ter zmanjšanje proizvodnje avtomobilov z motorji na notranje izgorevanje. Pri izvedljivosti tovrstnih ukrepov pa imajo velik vpliv tudi same države, ki lahko svoje cilje dosežejo le z omejitvami ter zakoni. Veliko pa k zmanjšanju okoljske energetske krize pripomorejo tudi svetovni sporazumi.

Raziskovalno vprašanje 4: Kakšna je učinkovitost sedanjih tehnologij za proizvodnjo/uporabo vodika (kot alternativa fosilnim gorivom) za splošne potrebe?

Trenutno se vodikove tehnologije še močno razvijajo in kljub temu da že obstaja nekaj vozil z vodikovimi tehnologijami, vodik še vedno ni konkurenčen fosilnim gorivom. Predvsem velika težava se pojavi pri proizvodnji vodika, ki mora doseči enake ali nižje stroške kot proizvodnja fosilnih goriv. Zaenkrat obstaja mnogo različnih načinov proizvodnje vodika, kot so: Cyro kompresija, elektroliza, organska kondukcija PEDOT, HyhyPure ekstrakcija, uplinjanje premoga, ekstrakcija vodika preko H₂ vlaknenih membran, neposredno cepljenje termalne vode ... Trenutno najbolj učinkovit način proizvodnje je piroliza, ki zna biti v prihodnosti konkurenca fosilnim gorivom. Naslednji problem zajema transport vodika, saj se pri transportu izgubi kar velik delež učinkovitosti, ki je odvisna od tlaka, pod katerim je vodik shranjen. Ena izmed rešitev je proizvodnja in shranjevanje vodika kar na mestu polnilnice. V tem primeru pa moramo v prihodnosti odkriti ustrezen in cenovno ugoden način proizvodnje na mestu. Vodik

ima veliko prednost pred fosilnimi gorivi, ker je čisti vir energije, vendar gledano s strani kupcev transportnih sredstev se trenutno veliko bolj splača nakup vozila z motorjem na notranje izgorevanje, ki ima vgrajen napredni način zgorevanja in mnogo inovativnih sistemov naknadne obdelave, ki spravijo strupene izpušne pline ter CO₂ na zanemarljivo raven.

Raziskovalno vprašanje 5: Kakšni so trenutni problemi shranjevanja vodika?

Trenutno se ogromno raziskuje na področju shranjevanja vodika, saj moramo izpolniti mnogo pogojev za pravilno shranjevanje vodika in njegov čim večji izkoristek. Ena izmed največjih težav je ustvariti kompaktno in čim bolj učinkovito enoto za shranjevanje. Izbrati moramo materiale, ki so primerni za shranjevanje vodika in so zmožni zdržati visoke tlačne obremenitve. Med raziskovanjem smo naleteli na več načinov shranjevanja vodika: shranjevanje na mestu proizvodnje, shranjevanje na mestu pridobivanja električne energije iz obnovljivih virov ter shranjevanje znotraj že obstoječe infrastrukture zemeljskega plina. Najbolj učinkovito shranjevanje bi bilo na mestu polnilnih postaj s samo proizvodnjo, saj bi tako preskočili postopek transporta in prihranili na energiji ter izgubah, ki se pojavljajo med transportom. Pri dolgoročnem shranjevanju se pojavljajo predvsem težave z uhajanjem plina in manjšanjem tlaka znotraj shranjevalne enote, kar pa posledično pripelje do manjšega izkoristka. Iz literature smo razbrali, da je možno tudi shranjevanje vodika v trdnem stanju znotraj magnezija. Težave se pojavljajo tudi na področju varnosti shranjevanja, ker je vodik lahko vnetljiv in zelo eksploziven plin. Zato moramo poskrbeti tudi za ustrezno varnost shranjevalne enote pred okoljskimi in človeškimi vplivi. Izgradnja novih shramb oz. hranilnic je odvisna tudi od investitorjev, saj je postavitve vodikove infrastrukture trenutno cenovno zelo neugodna.

Raziskovalno vprašanje 6: Kakšna bo učinkovitost energijskega mix-a v prihodnje?

Tiha prevzgoja svetovnega prebivalstva v skladu z zakonitostmi ekonomije potrošnje je v razvitem svetu vzpostavila model življenja, kjer se posamezniki borijo za svoj status v družbi, merilo statusa pa so največkrat materialne in nematerialne dobrine, do katerih lahko dotični posameznik dostopa. Proizvodnja omenjenih dobrin pa je neločljivo povezana s proizvodnjo energije zanje. Ta način življenja, ki smo se ga privadili, je večini s stališča ugodja sicer všečen, vendar za naravo in njeno stanje v prihodnosti na žalost poguben.

Svetovna rast prebivalstva ima namreč močan vpliv na naraščanje potreb po proizvodnji in porabi energije. Po projekcijah mednarodne agencije za energijo (IEA) iz leta 2011 bo do leta 2030 na svetu okrog osem milijard ljudi, do leta 2050 pa devet. Od tega se v državah članicah OECD predvideva mnogo nižji prirast populacije (okoli 250 tisoč ljudi letno) kot pa v državah, ki niso članice OECD (okoli 200 milijonov ljudi letno). V povezavi s pridobivanjem energije je razvidno, da so gospodarsko najbolj razvite države že spoznale pomen negativnih vplivov proizvodnje energije na celoten zemeljski ekosistem. Nenazadnje temu pritrjuje tudi obseg raziskovalnih dejavnosti na področjih izkoriščanja alternativnih virov energije, zavzemanja za čisto energijo ter odstranjevanje škodljivih izpustov v zemljino ozračje. Trendi in predvidevanja kažejo na to, da gospodarsko najbolj razvite države stremijo za tem, da bi kljub naraščanju števila prebivalstva obdržale količino proizvedene energije ali ga morebiti celo zmanjšale, medtem ko se v državah nečlanicah OECD pričakuje eksponentna rast proizvodnje in porabe primarne energije, kar je neskladno celo s predvidevanji naraščanja števila prebivalstva teh držav, ki bo naraščalo linearno.

Najpomembnejši energenti za proizvodnjo primarne energije, ki jih najdemo v naravi, so voda, veter, sonce, biomasa, geotermalna energija, premog in zemeljski plin. Prvi štirje med naštetimi veljajo za obnovljive vire energije. Tehnologija omogoča tudi pridobivanje ali proizvodnjo alternativnih nosilcev energije, kot sta npr. sintetični plin in vodik, ali pa proizvodnjo jedrske energije.

Tehnologije za proizvodnjo čiste energije še niso dodelane do te mere, da bi bile ekonomsko vzdržne, človeški nezavedni samouničevalni nagon brez potrebne samoomejitve pa njega samega žene po brezkompromisnem izkoriščanju vseh naravnih dobrin za njeno proizvodnjo, ne glede na končne posledice, ki bodo v okolju verjetno nepopravljive.

Zadovoljevanje potreb človeštva po primarni energiji zahteva od načrtovalcev, da je energetska sistem zadosten glede količine proizvedene energije, da je stabilen in čim bolj prilagodljiv možnostim participacije obnovljivih virov energije znotraj njegovih okvirov. Različne usmeritve in kompromisi bodo potrebni za uravnoteženo izkoriščanje naravnih energentov (energetska mešanica). Temeljna razporeditev uporabe energentov za proizvodnjo primarne energije zapoveduje njihovo razpršenost in da noben izmed energentov ne sme presegati 35 odstotkov.

Model energetske mešanice za proizvodnjo primarne energije, brez vključene jedrske energije, upošteva energetske potrebe do leta 2030 napoveduje, da bo uporaba premoga kot fosilnega

goriva in kot največjega generatorja toplogrednih plinov še narasla na okoli 35 % vseh energentov, zmanjšala se bo uporaba kombiniranega cikla uplinjanja zemeljskega plina (NG IGCC) na približno 11 %, v manjši meri bo naraščala uporaba biomase do obsega 17 %, postopoma, a tudi v manjšem obsegu, bo naraščala uporaba obnovljivih virov energije. Od tega se bo uporaba geotermalne energije zvišala na 14 %, sončne na 10 %, na 9 % in vodne na 4 %.

Model energetske mešanice za proizvodnjo primarne energije, vključno z jedrsko energijo, upošteva energetske potrebe do leta 2030, pa napoveduje 35 % uporabe jedrske energije, 13 % uporabe biomase, zmanjšanje uporabe premoga na 24 %. Zanimiv pa je preobrat pri uporabi obnovljivih virov, kjer uporaba geotermalne energije naraste na 12 %, proizvodnja sončne energije se zmanjša na vsega 6 %, vetrna se počasi povzpne na 10 % in vodna naraste na 4 %.

Nekako največji precep doživlja zavzemanje za ali proti proizvodnji jedrske energije. Katastrofi v Černobilu in Fukušimi sta svet dodobra prestrašili glede varnosti proizvodnje jedrske energije. Tako se tudi modeli energetskih mešanic delijo na modele z jedrsko in modele brez jedrske energije. V smislu proizvodnje toplogrednih plinov jedrska energija velja za "čisto" energijo, ki bi lahko pripomogla k temu, da bi se toplogredni plini zmanjšali za polovico, kar bi pomenilo enormni dosežek. Četrta generacija jedrskih reaktorjev, delujočih pri višji temperaturi, ki bi jo lahko izrabili tudi za druge tehnološke procese, obeta tudi možnost reciklaže odpadnega jedrskega goriva in s tem popolnoma čisto energijo.

Svetovni preboj za trajnostno vzdržnost celotnega planeta bo dosežen, ko se bo trend na relaciji ekonomija-politika-okolje obrnil v nasprotno smer. Trenutno temelji na modelu potreb ekonomije, katera neusmiljeno narekuje politične odločitve nacionalnih ali mednarodnih odločevalcev; temu obratno bi bilo potrebno prisluhniti potrebam za vzdržnost vseh zemeljskih ekosistemov, ki bi morale narekovati mednarodne in nacionalne politike, čemur pa se mora prilagoditi razvojna naravnost držav s svojimi ekonomijami. To bi bil približek idealnem modelu, vsekakor pa so tudi v slednjem skrite (pre)mnoge pasti. Nekaterim smo priča že danes, ko lahko "ekološka" združenja brez tehtnih argumentov, nasproti vsem znanstvenim študijam, ovirajo razvojne projekte.

Menimo, da je pristop k zaustavljanju podnebnih sprememb zaradi škodljivih vplivov toplogrednih plinov preveč pasiven. Idealizem posameznikov ne zadostuje za spremembe, pač pa bi se morali nekoliko v prihodnost zazreti pomembni politični odločevalci. Ker širše družbeno obnašanje temelji na posnemanju praktičnih vzorcev, menimo, da mora proces osveščanja in izobraževanja s področja trajnostnega življenjskega vzorca glede okolju prijazne

in učinkovite proizvodnje ter rabe energije nujno doseči in nagovoriti večino civilnega prebivalstva na eni strani kot tudi večino deležnikov in potencialnih investitorjev v ekonomskem sektorju na drugi strani.

Raziskovalno vprašanje 7: Kakšna je trenutna stopnja razvoja vodikovih tehnologij?

Trenutno največja ovira pri razvoju vodikovih tehnologij je majhna zainteresiranost vlagateljev, saj je vodik kot energent precej drag. Vendar pa zaradi nizkih emisij predstavlja dobro alternativo fosilnim gorivom, ki se počasi umikajo s trga, saj pri izogrevanju spuščajo okolju škodljive emisije. Danes so že v uporabi vozila na vodik. Vendar pa je za množično uporabo le-teh potrebno razviti infrastrukturo. Večino teh vozil poganjajo gorivne celice, ena izmed možnosti pa je tudi predelava motorjev z notranjim izogrevanjem. Trenutno je največ vodika proizvedenega s pirolizo biomase. Piroliza biomase ni tako čista kot elektroliza vode, ampak je cenovno ugodnejša. Za pocenitev pridobivanja vodika s pirolizo je potrebno znižati ceno električne energije in razviti cenovno ugodnejše materiale za katalizatorje.

Raziskovalno vprašanje 8: Kakšna je trenutna usmerjenost raziskav v EU in globalno?

Ugotovili smo, da se trenutne raziskave usmerjajo predvsem v čim bolj učinkovito proizvodnjo vodika, kar bi močno pripomoglo k cenovno ugodni proizvodnji vodika. Nekatere države pa raziskujejo najbolj učinkovito postavitev trenutno že dosegljivih tehnologij in s tem pripomorejo doseči čim višje izkoristke. Veliko se raziskuje na področju Evrope in Amerike. Znotraj Evrope se raziskuje veliko o učinkoviti proizvodnji iz zelenih virov energije ter čim bolj učinkoviti implementaciji samega sistema. Raziskuje se tudi čista proizvodnja jekla in železa z uporabo vodika. Na področju Amerike pa raziskujejo predvsem vodikove tehnologije znotraj avtomobilske industrije ter proizvodnjo kompaktne shranjevalne enote.

5 ZAKLJUČEK

Pri preučevanju tematike vodikovih tehnologij smo ugotovili, da je omenjeno področje trenutno zelo aktualno, še posebej na področju prehoda v nizkoogljično družbo, ter da obstajajo utemeljena predvidevanja po obširnem razvoju na tem področju v prihodnjih letih.

Največ vodika trenutno pridobivamo s pirolizo, vendar se trend spreminja, kar pomeni prehod na uporabo elektrolize. Skupaj z elektriko, pridobljeno iz obnovljivih virov energije, elektroliza predstavlja ekološko najčistejši proces. Trenutna tehnologija elektrolize ima precej slabe izkoristke v primerjavi z drugimi procesi, kar rezultira visokim cenam vodika, zato trg za implementacijo vodikovih tehnologij še ni zanimiv. Elektroliza torej še ni pripravljena na množično uporabo, kot se pričakuje s strani transportnega sektorja.

Veliko je nedorečenega tudi pri tehnologijah shranjevanja vodika, kjer je eden izmed glavnih problemov odkrivanje primernih materialov za čim manjše izgube pri shranjevanju vodika. Eno izmed ključnih vprašanj pri shranjevanju je tudi zagotovitev ustrezne varnosti. Trenutno je zanimiva predvsem kirokompresija ter shranjevanje vodika pod tlakom v večplastnih posodah. Vendar je potrebno vso pozornost usmeriti k varnosti pri ravnanju z vodikom, saj lahko ta, v povezavi z zunanjimi vplivi oziroma z nepravilnim načinom shranjevanja, privede do nesreč, ki so lahko zelo nevarne ravno zaradi visokih tlakov in fizikalnih lastnosti vodika.

V naslednjih letih se pričakuje velik razvoj pri vodikovih tehnologijah na področju prometa (kopenskega, zračnega in vodnega). Zaradi čedalje strožjih ukrepov in sporazumov držav na področju onesnaževanja in segrevanja ozračja zaradi toplogrednih plinov bo vedno več poudarka na tovrstnih tehnologijah, ki imajo blažji vpliv na okolje oz. ga sploh nimajo. To bi privedlo do velikega skoka v razvoju vodikovih tehnologij. V cestnem prometu je trenutno zanemarljivo malo število avtomobilov, ki uporabljajo gorivne celice za svoj pogon. Trenutno je zelo aktualno raziskovanje načrtovanja delovanja polnilnih postaj, saj je to področje še precej nerazvito in so postaje neprimerne za vsakdanjo uporabo. Gledano s strani potrošnika je potrebno upoštevati dejstvo, da je dostop do polnilnih postaj, kot primarne uporabniške infrastrukture, trenutno omogočen le v nekaj državah in v zelo majhnem obsegu, kar v bistvu predstavlja poglobitni dejavnik pri izbiri avtomobila. V prihodnosti se v tem pogledu pričakuje znatno izboljšanje infrastrukture za polnjenje avtomobilov in ostalih cestnih prevoznih sredstev na vodikov pogon.

Vodik je aktualen tudi na področju letalske industrije, kjer so tehnologije že v razvoju ter se od njih veliko pričakuje, kajti letala so veliki okoljski onesnaževalci. Vodik je za letalsko industrijo idealen, saj ima dobro razmerje med težo in količino pridobljene energije na kilogram vodika, kar bi letalom omogočilo dolge čase letenja, praktično brez onesnaževanja. Velika letalska podjetja so že naznanila prehod na zeleni pogon brez emisij v naslednjih letih.

Tudi na železnicah se pripravljajo na prehod uporabe vodika za pogon lokomotiv. Po ugotovitvah imajo vodikove tehnologije možnost za 48 % zmanjšanje porabe goriva, kar pomeni, da bi lokomotive imele ne le večji izkoristek, ampak bi tudi množično pripomogle k zmanjšanju toplogrednih plinov.

V vodnem prometu vodikove tehnologije še niso tako razvite kot na drugih področjih, saj so nedorečena vprašanja glede shranjevanja vodika, kar je odlično področje za prihodnje raziskovanje, saj so ladje med največjimi onesnaževalci okolja, takoj za letalskim prometom.

Vodik pa je uporaben tudi na področju ogrevanja industrijskih in individualnih stavb. Ugotovili smo, da je idealen pri sistemu kogeneracije oz. sočasnem proizvodni električne in toplotne energije, saj nam postopek elektrolize lahko proizvede električno energijo in hkrati se sprosti tudi veliko toplotne energije, ki pa jo lahko uporabimo za ogrevanje stanovanja in sanitarne vode. Sistem gorivnih celic v kogeneraciji pa lahko zaradi elektro-kemičnega načina proizvodnje energije doseže še višje izkoristke v primerjavi z drugimi gorivi. Trenutno se tehnologije za ogrevanje na vodik že pojavljajo na trgu.

Vodikove tehnologije zajemajo mnogo področij, ki jih bo potrebno še dodatno raziskati z namenom, da bo vodik postal zanesljiv energent v prihodnosti. Glede na današnje trende odločitev političnih odločevalcev bo vodik, kljub mnogim neodgovorjenim vprašanjem, počasi začel prevzemati pomembno vlogo v obstoječem energetske sektorju in bo odigral ključno vlogo pri vzpostavitvi prihodnosti brez emisij.

6 BIBLIOGRAFIJA

- Abdin, Z., & Merida, W. (2019). Hybrid energy systems for off-grid power supply and hydrogen production based on renewable energy: A techno-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 1068-1079.
- Acar, C., & Dincer, I. (2019). Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of Cleaner Production*, 835-849.
- Administration, U. E. (2017).
- Agency, International Energy. (2010). *World Energy Outlook 2010*. Paris: International Energy Agency.
- Ajanovic, A., & Haas, R. (2020). Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Ajanovic, A., & Haas, R. (2018). Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector. *Energy Policy*, 9.
- Andrews, J., & Shabani, B. (2012). Re-envisioning the role of hydrogen in a sustainable energy economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1184-1203.
- Antolini, E. (2009). Palladium in fuel cell catalysis. *Energy Environ Sci*, 2:915-31.
- Aouali, F. Z., Becherif, M., Ramadan, H. S., Emziane, M., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2017). Analytical modelling and experimental validation of proton exchange membrane electrolyser for hydrogen production. *Science Direct*, 1-9.
- Aschilean, I., Varlam, M., Culcer, M., Iliescu, M., Raceanu, M., Enache, & ... Filote, C. (2018). Hybrid Electric Powertrain with Fuel Cells for a Series Vehicle. *Energies*.
- Aschilean, I., Varlam, M., Culcer, M., Iliescu, M., Raceanu, M., Enache, A., . . . Filote, C. (2018). Hybrid Electric Powertrain with Fuel Cells for a. *Energies*, 12.
- Babonneau, F., Vial, J. P., & Apparigliato, R. (2010). Robust optimization for environmental and energy planning. In: Filar JA, Haurie A, editors. Uncertainty and environmental decision making. *International series in operations research & management science*, vol. 138, 79-126.

- Bailera, M., & Lisbona, P. (2018). Energy storage in Spain: Forecasting electricity excess and assessment of power-to-gas potential up to 2050. *Energy*, 900-910.
- Baroutaji, A., Wilberforce, T., Ramadan, M., & Ghani Olabi, A. (2019). Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10.
- Barthelemy, H., Weber, M., & Barbier, F. (2016). Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives . *ScienceDirect*, 9.
- Bendjedja, B., Rizoug, N., Boukhnifer, M., Bouchafaa, F., & Benbouzid, M. (2018). Influence of secondary source technologies and energy management strategies on Energy Storage System sizing for fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11614-11628.
- Bicer, Y. D. (2018). Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: A life cycle approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1179-1193.
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *ScienceDirect*, 17.
- Boonrod, B., Prapainainar, P., Varabuntoonvit, V., Sudsakorn, K., & Prapainainar, C. (2020). Environmental impact assessment of bio-hydrogenated diesel from hydrogen and co-product of palm oil industry. *ScienceDirect*, 16.
- Boretti, A. (2017). The Future of the Internal Combustion Engine After “Diesel-Gate”. *SAE Technical Paper Series*.
- Brady, M. D., Sampaio, R. N., Wang, D., Meyer, T. J., & Meyer, G. J. (2017). Dye-Sensitized Hydrobromic Acid Splitting for Hydrogen Solar Fuel Production. *Journal of the American Chemical Society*, 15612-15615.
- Brahim, T. B., Wiese, F., & Münster, M. (2019). Pathways to climate-neutral shipping: A Danish case study. *Energy*.
- Brandon, N. (2013). Recent developments in solid oxide fuel cells. *Solid oxide fuel cells for next generation power plants*.
- Brett, D. J., Atkinson, A., Brandon, N. P., & Skinner, S. J. (2008). Intermediate temperature solid oxide fuel cells. . *Chem Soc Rev*, 37:1568-78.

- Brinkert, K., Richter, M. H., Akay, O., Leditke, J., Giersing, M., Fountaine, K. T., & Lewerenz, H.-J. (2018). Efficient solar hydrogen generation in microgravity environment. *Nature Commun.*
- Brook, B., Bles, T., Wigley, T., & Hong, S. (2018). Silver Buckshot or Bullet: Is a Future “Energy Mix” Necessary? *Sustainability*, 1-14.
- Busch, J., Dawson, D., & Roelich, K. (2017). Closing the low-carbon material loop using a dynamic whole system approach . *Journal of Cleaner Production*, 11.
- Caglayan, D. G., Heinrichs, H. U., Linssen, J., Robinius, M., & Stolten, D. (2019). Impact of different weather years on the design of hydrogen supply pathways for transport needs. *International journal of Hydrogen Energy*, 25442-25456.
- Callux. (2013). *Field test of residential fuel cells - background & activities*. Pridobljeno iz Callux: <http://www.callux.net/home.English.html>
- Cantuarias-Villessuzanne, C., Weinberger, B., Roses, L., Vignes, A., & Brignon, J.-L. (2016). Social cost-benefit analysis of hydrogen mobility in Europe. *ScienceDirect*.
- Carapellucci, R., & Giordano, L. (2020). Steam, dry and autothermal methane reforming for hydrogen production: A thermodynamic equilibrium analysis . *Journal of Power Sources* , 12.
- Cazaux, S. B., Rougeau, N., Reitsma, G., Hoekstra, R., Teillet-Billy, D., & Schlathölter, T. (2015). The sequence to hydrogenate coronene cations: A journey guided by magic numbers. *Scientific Reports*.
- Certifhy. (22. 6 2015). *Certifhy*. Pridobljeno iz Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas: https://www.certifhy.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdf
- Chalvatzis, K. J., & Hooper, E. (2009). Energy security vs. climate change: theoretical framework development and experience in selected EU electricity markets. *Renew Sust Energy Rev*, 2703-2709.
- Chapman, L. (2007). Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography* 15, 354–367.

- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production . *Science Direct*, 5.
- Chiesa, P., Lozza, G., Mazzocchi, & L. (2005). Using hydrogen as gas turbine fuel. *J. Eng Gas Turbines Power*, 127:73-80.
- Chu, S., Cui, Y., & Liu, N. (2016). The path towards sustainable energy. *Nature materials*, 16-22.
- Clegg, S., & Mancarella, P. (2015). Storing renewables in the gas network: modelling of power-to-gas seasonal storage flexibility in low-carbon power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 566 – 575.
- Cormos, A., Szima, S., Fogarasi, S., & Cormos, C. (brez datuma). Economic assessments of hydrogen production processes based on natural.
- Correa, G., Muñoz, P., Falaguerra, T., & Rodriguez, C. (2017). Performance comparison of conventional, hybrid, hydrogen and electric urban buses using well to wheel analysis. *Energy*, 44.
- Creutzig, F., McGlynn, E., Minx, J., & Edenhofer, O. (2011). Climate policies for road transport revisited: Evaluation of the current framework. *Energy Policy*, 2396–2406 .
- D’ovidio, G., Carpenito, A., Masciovecchio, C., & Ometto, A. (2017). Preliminary analysis on advanced technologies for hydrogen light-rail trains application in sub-urban non electrified routes. *Ingegneria Ferroviaria*, 2.
- D’Ovidio, G., Ometto, A., & Valentini, O. (2020). A novel predictive power flow control strategy for hydrogen city rail train. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4922-4931.
- Daggash, H. A., Patzschke, C. F., Heuberger, C. F., Zhu, L., Hellgardt, K., Fennell, P. S., & Mac Dowell, N. (2018). Closing the carbon cycle to maximise climate change mitigation: power-to-methanol vs. power-to-direct air capture. *Sustainable Energy & Fuels*, 1153-1169.
- Dalena, F. S. (2018). Chapter 1 - Methanol Production and Applications: An Overview. *Methanol*, 3-28.
- DECC Department of Energy and Climate Change. (2011). *Great Britain's housing energy fact file*. London, UK: Department of Energy and Climate Change.

- Delta Energy & Environment . (2012). *Delta Energy & Environment* . Pridobljeno iz Gas-driven heat pumps: opening opportunities in the UK retrofit sector?: http://www.delta-ee.com/images/downloads/Level005/Delta-ee_Whitepaper_Gas_Heat_Pumps_September2012.pdf
- Delta-ee. (2013). *Delta-ee*. Pridobljeno iz Micro-CHP annual roundup. 2012. : <http://www.delta-ee.com/research-consulting-services/micro-chp-service>.
- Demirbas, A. (2011). Competitive liquid biofuels from biomass. *Applied Energy*, 17-28.
- Derwent, R. G., Stevenson, D. S., Utembe, S. R., Jenkin, M. E., Khan, A. H., & Shallcross, D. E. (2020). Global modelling studies of hydrogen and its isotopomers using STOCHEM-CRI: Likely radiative forcing consequences of a future hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1-11.
- Derwent, R., Simmonds, P., O'Doherty, S., Manning, A., Collins, W., & Stevenson, D. (2006). Global environmental impacts of the hydrogen economy. *INDERSCIENCE online*, 1-10.
- Detz, R. J., Reek, J. N., & van der Zwaan, B. C. (2018). The future of solar fuels: when could they become competitive? *Energy & Environmental Science*, 1653-1669.
- Dhar, S., Pathak, M., & Shukla, P. R. (2018). Transformation of India's transport sector under global warming of 2 °C and 1.5 °C scenario. *Journal of Cleaner Production*, 417-427.
- Dincer, I., & Acar, C. (2017). Innovation in hydrogen production. *ScienceDirect*, 22.
- Dincer, I., & Acar, C. (2017). Innovation in hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(22): 14843–14864.
- Ding, J., & Somani, A. (2010). A long-term investment planning model for mixed energy infrastructure integrated with renewable energy. *Green technologies conference* (str. 1-10). IEEE.
- Dodds, P. E., Staffell, I., Hawkes, A. D., Li, F., Grünewald, P., McDowall, W., & Ekins, P. (2015). Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2065–2083.
- Donateo, T., Ficarella, A., Spedicato, L., Arista, A., & Ferraro, M. (2016). A new approach to calculating endurance in electric flight and comparing fuel cells and batteries . *Applied Energy*, 13.

- Dowson, R. M., & Styring, P. (2017). Demonstration of CO₂ conversion to synthetic transport fuel at flue gas concentrations. *frontiers in Energy Research*, 11.
- E4tech Ltd. (2019). *H₂ emission potential literature review*. United Kingdom: Department for Business Energy & Industrial Strategy.
- Edwards, P., Kuznetsov, V. I., David, W. I., & Brandon, N. P. (2008). Hydrogen and fuel cells: Towards a sustainable energy future. *Energy Policy*, 4356–4362.
- El-Emam, R. S., & Ozcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 593-609.
- Energy, U. S. (2015). *Energy, United States Department of Energy*. Pridobljeno iz Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan.: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/fuel-cell-technologies-office-multi-year-research-development-and-22>
- Evangelisti, S., Tagliaferr, C., Brett, J. L., & Lettieri, P. (2016). Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles . *Cleaner Production*, 42.
- Evropska komisija. (8. 7 2020). *Sporočilo komisije evropskemu parlamentu, Svetu, evropskemu ekonomsko-socialnemu odboru in Odboru regij*. Pridobljeno iz Strategija za vodik za podnebno nevtrarno Evropo: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9390-2020-INIT/sl/pdf>
- Ferro, J. (2009). *PAFC history and successes. MCFC and PAFC R&D workshop*. Palm Springs: UTC Power.
- Franzitta, V., Curto, D., Milone, D., & Trapanese, M. (2017). Energy Saving in Public Transport Using. *Sustainability*, 1-19.
- Franzitta, V., Curto, D., Rao, D., & Viola, A. (2016). Hydrogen Production from Sea Wave for Alternative Energy Vehicles for Public Transport in Trapani (Italy). *Energies*, 90-133.
- Fritz, I. (2011). *UTC power e establishing a dynamic and profitable stationary fuel cell industry*. Berlin: IPHE Hydrogen and Fuel Cells Stakeholders' Roundtable.
- Fuel Cell Today. (2013). *Fuel Cell Today*. Pridobljeno iz A turning Point for high-temperature PEM fuel cells.: <http://tinyurl.com/pwljvaa>.

- Fuel Cell Today. (2013). *Fuel Cell Today*. Pridobljeno iz The fuel cell industry review. .
- Gai, L. P., Yoshida, K., Ward, R. M., Walsh, M., Baker, T. R., Water, D. V., . . . Boyes, D. E. (2015). Visualisation of single atom dynamics in water gas shift reaction for hydrogen generation. *Catalysis Science & Technology*, 2214-2227.
- Gajjar, H., & Mondol, J. D. (2015). Techno-Economic Comparison of Alternative. *International Journal of Sustainable Transportation*, 579-589.
- Gallucci, F., Fernandez, E., Corengia, P., & van Sint Annaland, M. (2013). Recent advances on membranes and membrane reactors. *Chemical Engineering Science*, 40-66.
- García, A. C., M., M., M., Q. J., Aroca, G., & Cardona, A. C. (2017). Environmental assessment of hydrogen production based on Pinus patula plantations in Colombia. *Energy*, 11.
- Garcinuño, B., Rapisarda, D., Moreno, C., Sanz, J., & Ibarra, A. (2018). Design of a System for Hydrogen isotopes Injection into Lead-Lithium. *Fusion Engineering and Design*, 427-434.
- Ghouse, M., Abaoud, H., & Al-Boeiz, A. (brez datuma). Operational experience of a 1 kW PAFC stack. *Appl Energy* 2000, 65:303-14.
- Gielen, D. S. (2020). Renewables-based decarbonization and relocation of iron. *Energies*.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 38-50.
- Gils, H. C., & Simon, S. (2017). Carbon neutral archipelago – 100% renewable energy supply for the Canary Islands. *Applied Energy*, 188: 342-355.
- Godoy, S. M., Mongili, B., Fino, D., & Auxiliadora Prieto, M. (2017). About how to capture and exploit the CO₂ surplus that nature, per se, is not capable of fixing . *microbial biotehnology*, 10.
- Goltsov, V., Veziroglu, T., & Goltsova, L. (2006). Hydrogen civilization of the future—A new conception of the IAHE. *International Journal of Hydrogen Energy*, 153-159.
- Grammelis, P. (433-445). Perspectives of Hydrogen Automotive Applications in Croatia. *Energy, Transportation and Global Warming*, 2016.
- Guandalini, G., Colbertaldo, P., & Campanari, S. (2016). Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines. *Applied Energy*, 1712-1723.

- Guo, X. M.-P. (2010). Hydrogen production from agricultural waste by dark. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10660-10673.
- Haghi, E., Shamsi, H., Dimitrov, S., Fowler, M., & Raahemifar, K. (2020). Assessing the potential of fuel cell-powered and battery-powered forklifts for reducing GHG emissions using clean surplus power; a game theory approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34532-34544.
- Hallenbeck, P. C. (2013). Chapter 2 - Fundamentals of Biohydrogen. *Biohydrogen*, 25-43.
- Hara, I. (2013). *Current status of H₂ and fuel cell programs of Japan*. . Fukuoka, Japan: 20th IPHE Steering Committee Meeting.
- Haris, I., & Ibrahim, D. (2020). Evaluation of a wind energy based system for co-generation of hydrogen and methanol production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15869-15877.
- Hart, D., Howes, J., Lehner, F., Dodds, P., Hughes, N., Fais, B., . . . Crowther, M. (2015). *Scenarios for deployment of hydrogen in contributing to meeting carbon budgets and the 2050 target*. London: UCL Energy Institute, University College London.
- Haruta, M. S. (1982). Catalytic combustion of hydrogen III d Advantages and disadvantages of a catalytic heater with hydrogen fuel. *Int J Hydrogen Energy*, 7:737-40.
- Haruta, M., & Sano, H. (1981). Catalytic combustion of hydrogen I d its role in hydrogen utilization system and screening of catalyst materials. *Int J Hydrogen Energy* , 6:601-8. .
- Haseli, Y., Naterer, G., & Dincer, I. (2008). Comparative assessment of greenhouse gas mitigation of hydrogen passenger trains. *ScienceDirect*, 9.
- Hawkes, A., & Brett, D. J. (2013). *IEA ETSAP 13-fuel cells for stationary applications*. International Energy Agency.
- Herold, H. M., Aigner, T. B., Grill, C. E., Krüger, S., Taubert, A., & Scheibel, T. (2019). SpiderMAEn: recombinant spider silk-based hybrid materials for advanced energy technology. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 99-108.
- Hobbs, M. (2018). *Green mobility The future of electric cars and low carbon transport*. West England: IPR Institute for Policy Research.

- Hoenig, V., Hoppe, H., & Emberger, B. (2007). *European Cement Research Academy*. Pridobljeno iz Carbon capture technology e options and potentials for the cement Industry. : <http://stuff.mit.edu/afs/athena/dept/cron/project/concrete-sustainability-hub/Literature%20Review/Building%20Energy/Concerte%20Industry%20Reports/PCA%20CD%20Cement%20Research%20Library%202008/reports/SN3022.pdf>.
- Hosseini, S. E., & Butler, B. (2019). An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles. *International Journal of Green Energy*, 13-37 .
- Houf, W. G., Evans, G. H., Ekoto, I. W., Merilo, E. G., & Groethe, M. A. (2013). Hydrogen fuel-cell forklift vehicle releases in enclosed spaces. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8179-8189.
- Hua, T., Ahluwalia, R., Eudy, L., Singer, G., Jermer, B., Asselin-Miller, N., . . . Marcinkoski, J. (2014). Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide. *Journal of Power Sources*, 19.
- Hwangbo, S., Beum Lee, I., & Han, J. (2017). Mathematical model to optimize design of integrated utility supply network and future global hydrogen supply network under demand uncertainty. *Applied Energy*, 11.
- Hybrit Development AB. (2017). *Hybrit Development AB*. Pridobljeno iz Hybrit brochure: file:///C:/Users/Uporabnik/Downloads/Hybrit_brochure.pdf
- Hydrogen Council. (2017). *Hydrogen Council*. Pridobljeno iz Hydrogen scaling up: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf
- Hydrogen Council. (20. January 2020). *Hydrogen Council*. Pridobljeno iz Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective: <https://hydrogencouncil.com/en/category/studies/>
- Hydrogen Tools. (20. 3 2021). *Hydrogen Tools*. Pridobljeno iz Hydrogen Compared With Other Fuels: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>
- IEA. (April 2011). *IEA*. Pridobljeno iz Clean Energy Progress Report: http://www.iea.org/papers/2011/CEM_Progress_Report.pdf
- IEA International Energy Agency. (2005). *Prospects for hydrogen and fuel cells*. . Paris, France: International Energy Agency.

- Iida, S., & Sakata, K. (2019). Hydrogen technologies and developments in Japan. *Clean Energy*, 105–113.
- Iida, S., & Sakata, K. (2020). What are the critical barriers to the development of hydrogen refueling. *Energy Policy*, 105–113.
- Iisa, K., Robichaud, J. D., Watson, J. M., ten Dam, J., Dutta, A., Mukarakate, C., . . . Baldwin, M. R. (2018). Improving biomass pyrolysis economics by. *Green Chemistry*, 16.
- İnci, M., Büyük, M., Demir, M. H., & İlbey, G. (2021). A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Iniyar, S., & Sumathy, K. (2000). An optimal renewable energy model for various end-uses. *Energy*, 563-575.
- Institute for Industrial Productivity. (2019). *Institute for Industrial Productivity*. Pridobljeno iz Ammonia.: <http://www.iipinetwork.org/>
- International Energy Agency. (2010). *Energy Balances of Non-OECD Countries*. Paris: International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2010). *Energy Balances of OECD Countries*. Paris: International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2011). Energy Outlook 2030. *International Energy Agency*.
- International Energy Agency. (16. 11 2020). *International Energy Agency*. Pridobljeno iz CO2 emmissions: <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySource>
- Iribarren, D., Martín-Gamboa, M., Manzano, J., & Dufour, J. (2016). Assessing the social acceptance of hydrogen for transportation in Spain: An unintentional focus on target population for a potential hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5203-5208.
- Jebaraj, S., & Iniyar, S. (2006). A review of energy models. *Renew Sust Energy Rev*, 563-575.
- Kalms, J., Schmidt, A., Frielingsdorf, S., van der Linden, P., von Stetten, D., Lenz, O., & ... Scheerer, P. (2016). Krypton Derivatization of an O₂-Tolerant Membrane-Bound

- [NiFe] Hydrogenase Reveals a Hydrophobic Tunnel Network for Gas Transport. *Angewandte Chemie International Edition*, 5586-5590.
- Kasuh, T. (2013). *Why does Japan believe in domestic fuel cell? Adaptation to European market?* Paris: European Gas technology conference.
- Kavadias, K., Apostolou, D., & Kaldellis, J. (2018). Modelling and optimisation of a hydrogen-based energy storage system in an. *Applied Energy*, 574-586.
- Kendall, K., & Singhal, S. C. (2003). Solid oxide fuel cells. *Elsevier Science*.
- Keskin, T. H. (2012). Hydrogen production from sugar industry wastes using single-stage photofermentation. *Bioresource Technology*, 131-136.
- Kim, J. W. (2013). *Recent achievements in hydrogen and fuel cells in Korea*. . Fukuoka, Japan:: International Hydrogen Energy Development Forum .
- Kim, M. L.-W.-Y. (2013). Hydrogen and methane production from untreated. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8648-8656.
- Koltsaklis, N. E., Dagoumas, A. S., Kopanos, G. M., Pistikopoulos, E. N., & Georgiadis, M. C. (2014). A spatial multi-period long-term energy planning model: a case study of the greek power system. *Appl Energy*, 456-482.
- Kuntke, P., Rodriguez Arredondo, M., Widyakristi, L., Ter Heijne, A., Sleutels, H. J., Hamelers, V. M., & Buisman, J. N. (2017). Hydrogen Gas Recycling for Energy Efficient Ammonia Recovery in Electrochemical Systems . *Environmental Science and Tehnology*, 24.
- Kuroda, K. (2011). *Present and future of PAFC at Fuji electric*. . Tokyo: 4th IPHE Workshop e Stationary Fuel Cells.
- Lazaro, C. Z. (2012). Hydrogen production and consumption of organic acids. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11691-11700.
- Lemus, R. G., & Martínez Duart, J. M. (2010). Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3929-3936.
- Léonardi, J., & Baumgartner, M. (2004). CO2 efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 451-464.

- Li, B., Roche, R., Paire, D., & Miraoui, A. (2017). Sizing of a stand-alone microgrid considering electric power, cooling/heating, hydrogen loads and hydrogen storage degradation. *Applied Energy*, 16.
- Li, Z., Guo, P. H., R., & Sun, H. (2018). Current status and development trend of wind power generation based hydrogen production technology. *Energy Exploration & Exploitation*.
- Liemberger, W. H., Miltner, M., & Harasek, M. (2019). Efficient extraction of hydrogen transported as co-stream in the natural gas grid – The importance of process design. *Applied Energy*, 747-763.
- Lightfoot, H., Manheimer, W., Meneley, D., Pendergast, D., & Stanford, G. (2006). Nuclear fission fuel is inexhaustible. *In Proceedings of the EIC Climate Change Technology*, 1-8.
- Liu, W., Setijadi, E., Crema, L., Bartali, R., Laidani, N., Aguey-Zinsou, K. F., & Speranza, G. (2017). Carbon nanostructures/Mg hybrid materials for hydrogen storage. *Diamond and Related Materials*, 19-24.
- Lo Basso, G. d. (2017). The Potential of Hydrogen Enriched Natural Gas deriving from Power-to-Gas option in Building Energy Retrofitting. *Energy and Buildings*, 12.
- Lubitz, W., & Tumas, W. (2007). Hydrogen: An Overview. *Chemical Reviews*, 3900–3903.
- Luè, A., Bresciani, C., Colorni, A., Lia, F., Maras, V., Radmilović, Z., & ... Anoyrkati, E. (2014). Future priorities for a climate-friendly transport: A European strategic research agenda toward 2030. *International Journal of Sustainable Transportation*, 236-246.
- Lui, J., Chen, W. H., Tsang, D. C., & You, S. (2020). A critical review on the principles, applications, and challenges of waste-to-hydrogen technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Maddison, A. (2009). Statistics on World Population, GDP and Per Capita GDP, 1e2008 AD. AD.
- Magro, M., Almeida, J., Paz-Garcia, J. M., Mateus, E. P., & Ribeiro, A. B. (2019). Exploring hydrogen production for self-energy generation in electroremediation: A proof of concept. *Applied Energy*, 1-8.

- Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, H., Senior, B. T., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect. *Applied Sciences*.
- Mansour-Saatloo, A., Agabalaye-Rahvar, M., Mirzaei, M. A., Mohammadi-Ivatloo, B., Mehdi-Abapour, & Zare, K. (2020). Robust scheduling of hydrogen based smart micro energy hub with integrated demand response. *Journal of Cleaner Production*.
- Martindale, M. C., & Reisner, E. (2015). Bi-Functional Iron-Only Electrodes for Efficient Water Splitting with Enhanced Stability through In Situ Electrochemical Regeneration. *Advanced Energy Materials*.
- Materazzi, M., Taylor, R., & Cairns-Terry, M. (2019). Production of biohydrogen from gasification of waste fuels: Pilot plant results and deployment prospects. *Waste Management*, 95-106.
- McKinsey & Company. (2019). *McKinsey & Company* . Pridobljeno iz McKinsey Global Energy Perspective. : <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2019>
- Mellino, S. P., Ciolotti, V., Autorino, C., Jannelli, E., & Ulgiati, S. (2017). A Life Cycle Assessment of lithium battery and hydrogen-FC powered electric bicycles: Searching . *Science Direct*, 1-11.
- Meza, J., Yildirim, M., & Masud, A. (2000). A multiobjective evolutionary programming algorithm and its applications to power generation expansion planning. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part A: Syst Hum* , 1086-1096.
- Mishra, Y., Ledwich, G., Ghosh, A., & George, T. (2012). Long term transmission planning to meet renewable energy targets in australia. *Power and energy society general meeting*, 1-7.
- Mizeraczyk, J., & Jasiński, M. (2016). Plasma processing methods for hydrogen production. *The European Physical Journal Applied Physics*, 80-231.
- Mohan, S. V. (2013). Biohydrogen Production: An Introduction. *Biohydrogen*, 1-24.
- Molinas, B., Pontarollo, A., Scapin, M., Peretti, H., Melnichuk, M., Corso, H., & ... Montone, A. (2016). The optimization of $MmNi_{5-x}Al_x$ hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 14484-14490.

- Moradi, R. G. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15.
- Morožan, A., Jousselme, B., Palacin, & and, S. L.-p. (2011). Low-platinum and platinum-free catalysts for the oxygen reduction reaction at fuel cell cathodes. *Energy Environ Sci*, 4:1238-54.
- Mulder, M., Perey, P. L., & Moraga, J. L. (13. 11 2019). *University of Groningen*. Pridobljeno iz Outlook for a Dutch hydrogen market: <https://core.ac.uk/download/pdf/232526673.pdf>
- Nakicenov, N. (2000). Emissions Scenarios: a Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge Univ. Press*.
- Napoli, G., Micari, S., Dispenza, G., Di Novo, S., Antonucci, V., & Andaloro, L. (2017). Development of a fuel cell hybrid electric powertrain: A real case study on a Minibus application. *ELSEVIER*, 14.
- Nikolaidis, P. P. (2018). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 598-610.
- Nikolaidis, P., & Poulikkas, A. (2018). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 598-610.
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 597-611.
- Ochoa Bique, A., & Zondervan, E. (2018). An outlook towards hydrogen supply chain networks in 2050 — Design of novel fuel infrastructures in Germany. *Chemical Engineering Research and Design*, Pages 90-103.
- Oldenbroek, V., Verhoef, A. L., & van Wijk, J. M. (2017). Fuel cell electric vehicle as a power plant: Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas. *ScienceDirect*, 31.
- Oltra, C., Dütschke, E., Sala, R., Schneider, U., & Upham, P. (2017). THE PUBLIC ACCEPTANCE OF HYDROGEN FUEL CELL APPLICATIONS IN EUROPE. *Sociologia*, 15.

- Otto, A., Robinius, M., Grube, T., Schiebahn, S., Praktiknjo, A., & Stolten, D. (2017). Power-to-Steel: Reducing CO₂ through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry. *Energies*.
- Paepe, W. D., Coppitters, D., A. S., Tsirikoglou, P., Ghorbaniasl, G., & Contino, F. (2019). Robust Operational Optimization of a Typical micro Gas Turbine. *Energy Procedia*, 5795-5803.
- Park, D. (2011). *Initial stage of commercialization of residential fuel cells in Korea*. . Tokyo, Japan: 4th IPHE Workshop on Stationary Fuel Cells .
- Parra, D., Valverde, L., Pino, F. J., & Patel, M. K. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 279-294.
- Plastics Europe. (2019). *Plastics Europe*. Pridobljeno iz EcoProfiles: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/>
- Povel, R., Feucht, K., Gelse, W., & Withalm, G. (1989). Hydrogen Fuel for Motorcars. *Interdisciplinary Science Reviews*, 367-373.
- Princerichard, S., Whale, M., & Djilali, N. (2005). A techno-economic analysis of decentralized electrolytic hydrogen production for fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1159-1179.
- Pursiheimo, E., Holttinen, H., & Koljonen, T. (2017). Path toward 100% renewable energy future and feasibility of power-to-gas technology in Nordic countries. *IET Renewable Power Generation*, 12.
- Quarton, C. J., & Samsatli, S. (2019). The value of hydrogen and carbon capture, storage and utilisation in decarbonising energy: Insights from integrated value chain optimisation. *Applied Energy*, 1-23.
- R., G., & Grosso, D. (2016). Testing future hydrogen penetration at local scale through an optimisation tool. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22626-22634.
- Rau, F., Herrmann, A., Krause, H., Fino, D., & Trimis, D. (2019). Efficiency of a pilot-plant for the autothermal reforming of biogas. *International journal of Hydrogen energy*, 19136-19140.

- Remick, R. J., Wheeler, D., & Singh, P. (2010). *MCFC and PAFC R&D workshop summary report*. Available at: U.S. Department of Energy. Pridobljeno iz U.S. Department of Energy: <http://tinyurl.com/kckvtln>
- Reuß, M., Grube, T., Robinius, M., & Stolten, D. (2019). A hydrogen supply chain with spatialre solution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany. *Applied Energy*, 438-453.
- Riahi, K., Dentener, F., Gielen, D., Grubler, A., Jewell, J., Klimont, Z., . . . Wilson, C. (2012). Chapter 17: Energy Pathways for Sustainable Development. V K. Riahi, *Global Energy Assessment*. Cambridge: Cambridge University press.
- Riddoch, F. (2013). *Ene.field European-wide field trials for residential fuel cellmicro-CHP*. Brussels: FCH-JU Programme Review.
- Robles, J. O., Billoud, G. M., Azzaro-Pantel, C., & Aguilar-Lasserre, A. A. (2019). Optimal Design of a Sustainable Hydrogen Supply Chain Network: Application in an Airport Ecosystem. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 17587-17597.
- Roger, M., Brown, F., Gabrielli, W., & Sargent, F. (2018). Efficient Hydrogen-Dependent Carbon Dioxide Reduction by Escherichia coli. *Current Biology*, 140-145.
- Samsatli, S., & Samsatli, N. J. (2019). The role of renewable hydrogen and interseasonal storage in the carbonising heat - comprehensive optimisation for future renewable energy value chains. *Applied Energy*, 854-893.
- Samsatli, S., Staffell, I., & Samsatli, J. N. (2015). Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 447-475.
- Sánchez-Sáinz, H., García-Vázquez, C. A., & Fernández-Ramírez. (2019). Methodology for the Optimal Design of a HybridCharging Station of Electric and Fuel Cell VehiclesSupplied by Renewable Energies and an Energy Storage System. *Sustainability* , 1-20.
- Sanfilippo, D. (2016). One-step hydrogen through water splitting with intrinsic CO₂ capture in chemical looping. *Catalysis Today*, 58-68.
- Sangeeta, M. S., Pande, M., Rani, M., Gakhar, R., Sharma, M., Rani, J., & N., B. A. (2014). Alternative fuels: An overview of current trends and scope for future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 697-712.

- Santos, G. (2017). Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? *Transport Policy*, 71–74.
- Saratale, G. D. (2013). Biohydrogen from Renewable. *Biohydrogen*, 185-221.
- Sattler, C., Roeb, M., Agrafiotis, C., & Thomey, D. (2017). Solar hydrogen production via sulphur based thermochemical water-splitting. *Solar Energy*, 18.
- Sgobbi, A., Nijs, W., Miglio, D. R., Chiodi, A., Gargiulo, M., & Thiel, C. (2015). How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19-35.
- Shad, R., Khorrami, M., & Ghaemi, M. (2016). Developing an Iranian green building assessment tool using decision making methods and geographical information system: Case study in Mashhad city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 325-339.
- Shiva, K. S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 442-454.
- Sirikitputtisak, T., Mirzaesmaeli, H., Douglas, P. L., Croiset, E., Elkamel, A., & Gupta, M. (2009). A multi-period optimization model for energy planning with CO2 emission considerations. *Energy Procedia*, 4339-4346.
- Sorunmu, Y., Billen, P., & Elangovan, S. (2018). Life-Cycle Assessment of Alternative Pyrolysis-Based Transport Fuels: Implications of Upgrading Technology, Scale, and Hydrogen Requirement. *ACS Sustainable Chemistry and engineering*.
- Southall, D. G., & Khare, A. (2016). The feasibility of distributed hydrogen production from renewable energy sources and the financial contribution from UK motorists on environmental grounds. *Sustainable Cities and Society*, 134-149.
- Speirs, J., Balcombe, P., Johnson, E., Martin, J., Brandon, N., & Hawkes, A. (2018). A greener gas grid: What are the options. *Energy Policy*, 291-297.
- Staffell, I. (2010). *University of Birmingham*. Pridobljeno iz Fuel cells for domestic heat and power: re they worth it? [PhD thesis]. : <http://tinyurl.com/759b7yq>.
- Staffell, I., & Green, R. J. (2009). Estimating future prices for stationary fuel cells with empirically derived learning curves. . *Int J Hydrogen Energy*, 34:5617-28. .

- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., . . . Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 463-491.
- Stehlík, K., Tkac, M., & Bouzek, K. (2019). Recent advances in hydrogen technologies in the Czech Republic. *International journal of Hydrogen Energy*, 19055-19060.
- Stephen, A. J., Archer, S. A., Orozco, R. L., & Macaskie, L. E. (2017). Advances and bottlenecks in microbial hydrogen production. *Microbial biotechnology*, 1120-1127.
- Tao, L., & Aden, A. (2009). The Economics of Current and Future Biofuels. *The Economics of Current and Future Biofuels*, 199–217.
- Thangavelu, S. R., Khambadkone, A. M., & Karimi, I. A. (2015). Long-term optimal energy mix planning towards high energy security and low GHG emission. *Applied Energy*, 959-969.
- Till, C. E., & Chang, Y. I. (2011). Plentiful Energy: The Story of the Integral Fast Reactor. *CreateSpace Independent Publishing Platform: Idaho Falls*, 404.
- Toleuova, A., Maskell, W. C., Yufit, V., Shearing, P. R., & Brett, D. J. (2016). Mechanistic Studies of Liquid Metal Anode SOFCs II: Development of a Coulometric Titration Technique to Aid Reactor Design. *Chemical Engineering Science*, 100-107.
- Tschiggerl, K., Sledz, C., & Topic, M. (2018). Considering environmental impacts of energy storage technologies: A life cycle assessment of power-to-gas business models. *Energy*, 1091-1100.
- Turner, J. A. (2004). Sustainable Hydrogen Production. *Science*, 972-974.
- Turoń, K. (2020). Hydrogen-powered vehicles in urban transport systems. *Transportation Research Procedia*, 835–841.
- United Nations. (2011). *National Accounts Statistics*. New York: United Nations Statistics Division.
- Ustolin, F., Paltrinieri, N., & Guozheng, S. (2019). The influence of H₂ safety research on relevant risk assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 1393-1398.
- Valente, A., Iribarren, D., Luis Gálvez-Martos, J., & Dufour, J. (2019). Robust eco-efficiency assessment of hydrogen from biomass gasification as an alternative to conventional

- hydrogen: A life-cycle study with and without external costs. *Science of the Total Environment*, 11.
- van de Kaa, G., Scholten, D., Rezaei, J., & Milchram, C. (2017). The Battle between Battery and Fuel Cell Powered Electric Vehicles: A BWM Approach. *energies*, 13.
- Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., & Greiner, M. (2019). Theroleofstoragetechnologiesthroughoutthedecarbonisationofthesector-coupledEuropeanenergysystem. *Energy Conversion and Management*, 1-17.
- Wallace, S. W., & Fleten, S. E. (2003). Stochastic programming models in energy. In: Ruszczyński A, Shapiro A, editors. Stochastic programming. *Handbooks in operations research and management science*, 637-677.
- Wanitschke, A., & Hoffmann, S. (2019). Are battery electric vehicles the future? An uncertainty comparison with hydrogen and combustion engines. *Environmental Innovation and Societal Transitions*.
- Wassie, S. A., Cloete, S., Spallina, V., Gallucci, F., Amini, S., & van Sint Annaland, M. (2018). Techno-economic assessment of membrane-assisted gas switching reforming for pure H₂ production with CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 163-174.
- Weijermars, R., Taylor, P., B. O., Das, S. R., & Wei, Y. M. (2012). Review of models and actors in energy mix optimization – can leader visions and decisions align with optimum model strategies for our future energy systems? *Energy Strategy Reviews*, 5-18.
- Weijermars, R., Taylor, P., Bahn, O., Das, S. R., & Wei, Y. M. (2012). Review of models and actors in energy mix optimization – can leader visions and decisions align with optimum model strategies for our future energy systems? *Energy Strategy Reviews*, 5-18.
- Winnefeld, C., Kadyk, T., Bensmann, B., Krewer, U., & Hanke-Rauschenbach, R. (2018). Modelling and Designing Cryogenic Hydrogen Tanks for Future Aircraft Applications. *energies*, 23.
- Wolff, S., Fries, M., & Lienkamp, M. (2019). Technoecological analysis of energy carriers for long-haul transportation. *Journal of industrial ecology*, 165-177.

- World Steel Association. (2019). *World Steel Association*. Pridobljeno iz Steel Facts.: <https://www.worldsteel.org/aboutsteel/steel-facts.html>
- World Steel Association. (2019). *World Steel Association*. Pridobljeno iz Steel's contribution to a low carbon future and climate resilient societies.: <https://www.worldsteel.org/publications/position-papers/steel-scontribution-to-a-low-carbon-future.html>
- Wuebbles, D. J., & Jain, A. K. (2001). Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology*, 99-119.
- Wulf, C., & Kaltschmitt, M. (2018). Hydrogen supply chains for mobility-Environmental and economic assessment. *Sustainability*.
- Wulf, C., Reuß, M. G., Zapp, P., Robinius, M., Hake, J.-F., & Stolten, D. (2018). Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options. *Journal of Cleaner Production*, 431-443.
- Yeon Lee, D., Elgowainy, A., & Vijayagopal, R. (2019). Well-to-wheel environmental implications of fuel economy targets for hydrogen fuel cell electric buses in the United States. *Energy Policy*, 19.
- Yılmaz, I., Ilbas, M., Tastan, M., & Tarhan, C. (2012). Investigation of hydrogen usage in aviation industry. *Energy Conversion and Management*, 7.
- Zamora, P., Georgieva, T., Heijne, A. T., Sleutels, T. H., Sleutels, A. W., Saakes, M., . . . Kuntke, P. (2017). Ammonia recovery from urine in a scaled-up Microbial Electrolysis. *Journal of Power Sources*, 1-9.
- Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., & Wang, C. H. (2012). Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. *Materials & Design*, 75-80.
- Zhang, J., X. Z., Zhang, J., Tang, Y., S. C., N. T., & al., e. (2006). High temperature PEM fuel cells. *J Power Sources*, 160:872-91.
- Zvbakov, V. (2003). Wisdom of the earth-home. About the world outlook of the XXI century. *. Ecogeosophic almanac*, 4-5.