

Ubrzanje primjene tehnologija vodika

Ćurković, Laura

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:538400>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Prijediplomski studij naftnog rudarstva

UBRZANJE PRIMJENE TEHNOLOGIJA VODIKA

Završni rad

Laura Ćurković

N4558

Zagreb, 2024.

UBRZANJE PRIMJENE TEHNOLOGIJA VODIKA

Laura Ćurković

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

Sažetak

Analiziran je potencijal vodika kao alternativnog goriva za domaće letove u Hrvatskoj, uz detaljan proračun potrebnih količina i troškova, te infrastrukturnih zahtjeva za njegovu implementaciju. Procjene su pokazale da bi godišnja potreba za vodikom iznosila oko 286 672 kg, što je tehnički moguće skladištiti u samoj zračnoj luci, ali uz značajno povećanje u odnosu na trenutne troškove goriva.

Istaknuta je važnost podzemnog skladištenja vodika kao ključnog elementa za stabilizaciju opskrbe, omogućujući balans između proizvodnje i potrošnje. Predviđa se da bi, uz tehnološki napredak i smanjenje cijena obnovljivih izvora energije, troškovi proizvodnje vodika mogli postati konkurentniji do 2030. godine, što bi moglo poboljšati ekonomsku izvedivost projekta..

Ključne riječi: vodik, pogonsko gorivo, zrakoplovi, podzemno skladištenje plina, rezervoari vodika

Završni rad sadrži: 47 stranica, 12 tablica, 11 slika i 46 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: prof. dr. sc. Domagoj Vulin, RGNF

Pomagao pri izradi: Eduard Perković, dipl. ing. aeronaut., MORH

Ocjenjivači: prof. dr. sc. Domagoj Vulin, RGNF
izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić, RGNF
izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF

Datum obrane: 23.9.2024., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	i
POPIS TABLICA.....	ii
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA.....	iii
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	iv
1. UVOD.....	1
2. VRSTE VODIKA PREMA IZVORIMA ENERGIJE.....	3
2.1 Svojstva vodika	3
2.2 Spektar boja vodika	4
2.2.1 Zeleni vodik.....	5
2.2.2 Plavi vodik.....	6
2.2.3 Sivi vodik.....	7
2.2.4 Tirkizni vodik	8
2.2.5 Crni i smeđi vodik	9
2.2.6 Ružičasti vodik	9
2.2.7 Bijeli vodik	9
3. EUROPSKI ZELENI PLAN.....	10
3.1 Strategije i sporazumi za klimatski neutralnu Europu.....	10
3.2 Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine	11
3.3 Potencijal domaće proizvodnje vodika.....	14
4. MOGUĆNOST PRIMJENE VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA U ZRAČNOM PROMETU	17
4.1 Emisije ugljikovog dioksida u zrakoplovnom putničkom prometu.....	21
4.2 Potrošnja goriva u zrakoplovnom putničkom prometu	24
4.3 Zrakoplovi na vodik.....	30
5. PROCJENA POTREBNOG VODIKA U SLUČAJU PRIJELAZA NA VODIKOVU TEHNOLOGIJU	34
5.1 Potrebe i mogućnosti za podzemnim skladišnim prostorom za sigurnu opskrbu vodika.....	36
6. ZAKLJUČAK.....	41
7. POPIS LITERATURE.....	42

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Fazni dijagram čistog vodika. Dok nije pothlađen na manje od -240°C , vodik je u plinovitom ili superkritičnom području.....	3
Slika 2-2. Spektar boja vodika.....	5
Slika 2-3. Proizvodnja i korištenje zelenog vodika	6
Slika 2-4. Proizvodnja plavog vodika iz prirodnog plina.....	7
Slika 2-5. Prikaz proizvodnje sivog i plavog vodika.....	8
Slika 2-6. Piroliza metana.....	8
Slika 2-7. Prikaz proizvodnje smeđeg vodika	9
Slika 3-1. Opća shema vodikovog lanca vrijednosti, od proizvodnje do krajnjeg korištenja ..	15
Slika 4-1. Emisije iz tipičnog dvomotornog mlaznog zrakoplova tijekom 1-satnog leta sa 150 putnika	22
Slika 5-1. Sadržaj energije vodika.....	38
Slika 5-2. Skladišni kapacitet vodika, prema masenom balansu iz radnog volumena PSP Okoli	40

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Usporedba vodika i standardnog goriva korištenog u avioindustriji.....	19
Tablica 4-2. Usporedba svojstava mlaznog goriva i vodika.....	25
Tablica 4-3. Usporedba mase i energije te emisija za različita goriva	25
Tablica 4-4. Kratice analiziranih tipova goriva	26
Tablica 4-5. Opće karakteristike zrakoplova s najvećim brojem domaćih letova.....	26
Tablica 4-6. Standardne linije Croatia Airlines-a tijekom cijele godine	28
Tablica 4-7. Sezonski letovi Croatia Airines-a.....	28
Tablica 4-8. Udaljenost koju prijeđu sezonski letovi Croatia Airines-a.....	29
Tablica 4-9. Potrošnja zrakoplova koje koristi Croatia Airines-a	29
Tablica 5-1. Raspon vrijednosti o putovanjima u domaćim letovima	34
Tablica 5-2. Potrebni obujam spremnika za cjelogodišnju potrošnju vodika u zračnoj luci.....	37
Tablica 5-3. Skladišni kapacitet vodika, prema masenom balansu iz radnog volumena PSP Okoli	40

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
T	°C	temperatura
ρ	kg/m ³	gustoća
V	l	volumen
m	g, kg, t	masa
E	MJ, kWh	energija
p	MPa, bar	tlak
P	kW, GW	snaga
t	h	vrijeme
W _v	m ³	radni volumen
L	m, km	putna udaljenost

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

SAD	Sjedinjene Američke Države
EU	Europska unija
RH	Republika Hrvatska
IEA	Međunarodne agencije za energetiku
EU ETS	Program za trgovanje emisijama stakleničkih plinova
NRL	Naval Research Laboratory
ZEROe	Airbusov koncept zrakoplova s nula emisija
UAV	bespilotna letjelica
OIE	obnovljivi izvori enegije
EUR	euri
PEM	proton-vodikove membrane
TRL	tehnološka spremnost
CCS	hvatanje i skladištenje ugljika
SMR	parno reformiranje metana
O ₂	kisika
H ₂	vodik
LH ₂	tekući vodik
H ₂ O	vodene pare
N ₂	dušika
N ₂ O	dušikov oksid
CO ₂	ugljični dioksid
NO _x	dušikovi oksidi
HC	neizgoreni ugljikovodici
CO	ugljični monoksid
SO _x	sumporovi oksidi
CH ₄	metan

1 UVOD

Prekomjernom upotrebom fosilnih goriva dolazi do znatnog porasta koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi i povećanja prosječne globalne temperature. Klimatske promjene su primarni razlog traženja novih rješenja, koja se mogu svrstati u zelene tehnologije, tj. tehnologije u zelenoj tranziciji. Drugi element zelene tranzicije, osobito u EU odnosi se na njenu socijalnu, ekonomsku i stratešku opravdanost – zelena tranzicija ne smije negativno utjecati na tržišta rada (održavanje i stvaranje novih radnih mjesta), treba biti ekonomski opravdana, a strateški treba pružiti energetska sigurnost, kojoj su glavne pretpostavke diversifikacija (dostupnost energije iz različitih izvora i smjerova), te stabilan odnos ponude i potražnje gdje transport (udaljenost, cijena) ponovo igra ključnu ulogu. Iz svega navedenog, posljednjih godina se u svijetu nameću tehnologije vodika, koji se odlikuje velikom masenom energetskom gustoćom, ili drugim riječima, velikim potencijalom za transport velikih količina energije. Vodik se također može proizvesti na mnogo načina, gdje su usporedivi široki rasponi potencijala proizvodnje (količine), cijene (tj. tehnološke spremnosti, engl. *technological readiness level*, TRL) i procjene ugljičnog otiska u cjelokupnom krugu nastanka i pretvorbe (energije) vodika (engl. *life cycle assessment*, LCA).

Dosadašnji glavni izvori obnovljive energije su hidroenergija, sunčeva energija i energija vjetra čiju promjenjivost proizvodnje se ne može kontrolirati. U budućnosti se ne planira odmak ni od tih izvora, ali se traže i novi izvori koji bi bili pouzdaniji. Tako se svijet danas sve više okreće baterijama i vodiku koji se smatraju tranzicijskim gorivom (ili bolje rečeno: nositeljem energije, engl. *energy carrier*).

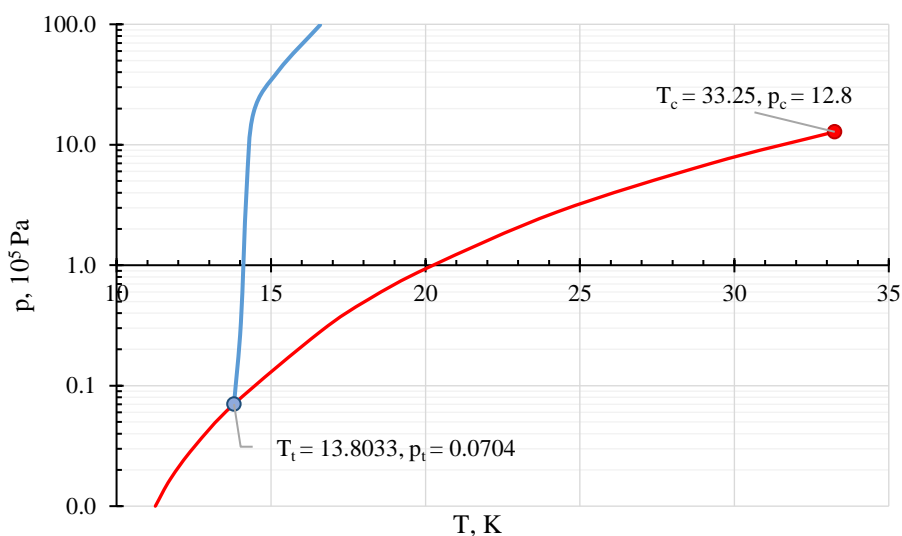
Još je u 19. stoljeću francuski romanopisac, Jules Verne, prepoznao potencijal vodika i kisika kao neograničene izvore energije i topline (Australia's Chief Scientist, 2020). Ferdinand von Zeppelin izumio je, tijekom prve polovice 20. stoljeća, prvu letjelicu na vodik, koja je kasnije je nazvana cepelin, no jedna nesreća njemačkog cepelina dovela je u pitanje sigurnost transporta na vodik te obustavila njegov razvoj na neko vrijeme. NASA je kasnije ponovno počela upotrebljavati vodik kao raketno gorivo te je nakon toga razvoj vodika išao samo uzlaznom putanjom.

Uzevši sve navedeno, cilj ovog rada je sagledati mogućnosti primjene vodika, sa specifičnim ciljem procjene potražnje za vodikom u bližoj budućnosti. Pri tome se analiza naslanja na hipotezu da vodik ima potencijal za značajnu primjenu u zračnom transportu, što je također preispitano unutar rada, uključujući validaciju sigurnosti dobave goriva, pri čemu se razmatralo spremnike vodika i potencijal za podzemno skladištenje.

2 VRSTE VODIKA PREMA IZVORIMA ENERGIJE

2.1 Svojstva vodika

Vodik, čiji je simbol H, najlakši je kemijski element koji nema boje, okusa ni mirisa te se nalazi prvi po redu u periodnom sustavu elemenata (atomska masa 1, relativna atomska masa 1,0079). Pri standardnom tlaku i temperaturi je plin, a hlađenjem i stlačenjem od područja atmosferskih tlakova i temperatura može prijeći u kapljevitu ili krutu fazu (Slika 2-1).



s

Slika 2-1. Fazni dijagram čistog vodika. Dok nije pothlađen na manje od -240°C , vodik je u plinovitom ili superkritičnom području.

Njegov atom je najjednostavnije građe (jedan proton i jedan elektron), a najrašireniji je kemijski element u svemiru (maseni udjel 75 %). Na Zemlji se nalazi gotovo svugdje budući da je sastavni dio vode i hidrata, kiselina i baza, hidrida, ugljikovodika kao i velike većine organskih spojeva. Iako je toliko raširen među spojevima, čisti vodik je lakši 14 puta od zraka zbog gravitacijskog odvajanja, u plinovitom stanju u atmosferi gotovo da ni ne postoji. Vrlo je zapaljiv što je jedan od glavnih problema pri njegovoj uporebi kao pogonsko gorivo. U doticaju s kisikom, dovoljno zagrijan, stvara plin praskavac odnosno reagira eksplozivno spajajući se u vodu prilikom čega oslobađa velike količine energije. Uz laku zapaljivost je problem i njegova

nestabilnost kao samostalnog spoja zbog čega lako reagira s velikom većinom atoma ili spojeva u blizini.

2.2 Spektar boja vodika

Prema proizvodnom procesu i razini emisija stakleničkih plinova kategoriziraju se vrste vodika. Iako nema fizički vidljive razlike budući da je vodik bezbojan plin, razlikovanje njegovih vrsta je bitno kako bi se jasno odjelilo vodik iz obnovljivih izvora i vodik s niskim udjelom ugljika (Bermudez et al., 2021). Za razlikovanje vrsta vodika u energetskej industriji, koriste se kodovi boja ili nadimci (Slika 2-2). Različite boje se dodjeljuju vodiku ovisno o načinu proizvodnje. Ali ne postoji u potpunosti univerzalna konvencija o imenovanju i ove se definicije boja mogu mijenjati tijekom vremena, pa čak i između zemalja. Standardna podjela obuhvaća sivi, plavi, tirkizni i zeleni vodik no nekad proizvodnja ne prikazuje skroz samo jednu navedenu boju pa se u literaturi još dodaje žuta, bijela, ružičasta, crna i smeđa boja.

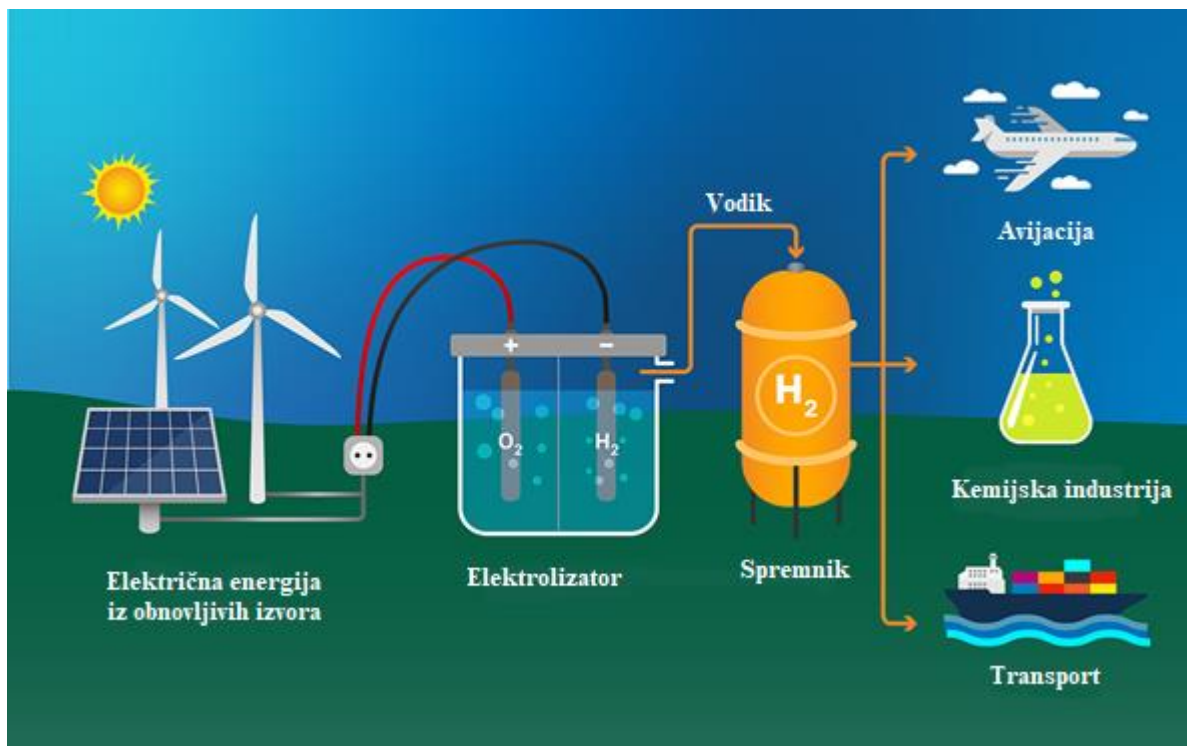
Zbog nedostatka jedinstvene terminologije na razini EU-a, u posljednje vrijeme se, također, predlaže korištenje klasifikacije na temelju sadržaja ugljika u vodiku, tj. podjela na „čisti vodik” i „niskougljični vodik”. Prema Europskoj Komisiji „čisti vodik” odnosi se na vodik proizveden elektrolizom vode uz korištenje električne energije iz obnovljivih izvora. Može se proizvoditi i reformiranjem bioplina ili biokemijskom prenamjenom biomase ako je taj proces u skladu sa zahtjevima u pogledu održivosti, a „niskougljični vodik” obuhvaća vodik proizveden iz fosilnih goriva hvatanjem ugljika i vodik proizveden uz korištenje električne energije, čije su emisije stakleničkih plinova tijekom cijelog životnog ciklusa u usporedbi s vodikom koji se proizvodi postojećim metodama. (European Commission, 2020)

Boja	Izvor energije	Kategorija	Proces	Ugljični neutralan
Zelena	Vjetar Sunce	Obnovljivi izvor energije	Elektroliza	Da
Žuta	Sunce	Obnovljivi izvor energije	Elektroliza	Da
Plava	Metan	Fosilna goriva	SMR + Razdvajanje vode POM	Da
			ATR	
Tirkizna	Metan	Fosilna goriva	Piroliza	Da, uz ugljen u čvrstom stanju
Siva	Metan	Fosilna goriva	SMR	Ne
Crna	Antracit	Fosilna goriva	Rasplinjavanje	Moguće
Smeđa	Lignit	Fosilna goriva	Rasplinjavanje	Moguće
Ljubičasta	Nuklearna energija	Alternativa	Elektroliza	Da
Ružičasta	Nuklearna energija	Alternativa	Elektroliza	Da
Bijela	Zemlja	Prirodan	Bušotina	Da

Slika 2-2. Spektar boja vodika (Economides & Hatzignatiou, 2021)

2.2.1 Zeleni vodik

U spektru vodikovih boja (Economides & Hatzignatiou, 2021), zeleni vodik je onaj koji se proizvodi bez štetnih emisija stakleničkih plinova (Slika 2-3). Zeleni vodik nastaje elektrolizom vode korištenjem čiste električne energije iz obnovljivih izvora energije, kao što su sunčane elektrane ili vjetroelektrane. U elektrolizatorima se odvija elektrokemijska reakcija razgradnje molekula vode, na vodik i kisik, pri čemu emitiraju nultu emisiju ugljičnog dioksida. Glasanjem na plenarnoj sjednici u svibnju 2021., kao odgovor na prijedlog Komisije, zastupnici su poručili da samo zeleni vodik, proizveden iz obnovljivih izvora, može dugoročno doprinijeti postizanju klimatske neutralnosti, iako trenutno čini mali postotak ukupnog vodika, jer je proizvodnja najskuplja, ali kako se trošak obnovljive energije i elektrolizator smanjuje, očekuje se da će se cijena postupka postupno smanjivati (Zeleni obnovljivi izvori, 2022).



Slika 2-3. Proizvodnja i korištenje zelenog vodika (Earth justice, 2021)

2.2.2 Plavi vodik

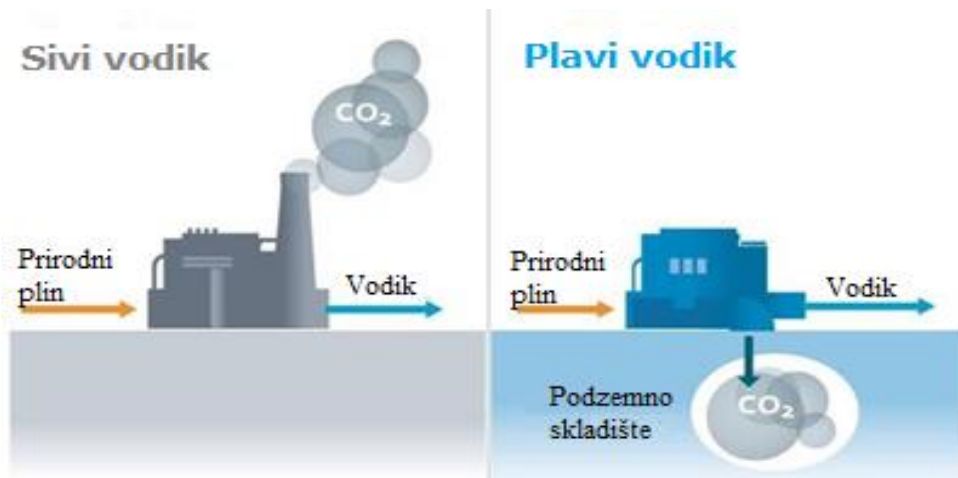
Plavi vodik se uglavnom proizvodi iz prirodnog plina, korištenjem procesa koji spaja prirodni plin i zagrijanu vodu u obliku pare (Slika 2-4). Izlazni plin je vodik, ali i ugljični dioksid kao nusproizvod. To znači da je hvatanje i skladištenje ugljika (CCS) neophodno, što značajno poskupljuje proizvodnju, pa je plavi vodik danas u svijetu razmjerno rijedak (Energetika-net, 2021). Jednostavan scenarij za plavi vodik je pretvorba proizvedenog prirodnog plina u plavi vodik na licu mjesta uz ponovno utiskivanje proizvedenog CO₂ u ležište iz kojeg je prirodni plin proizveden. Drugi scenarij može biti skladištenje vodika u iscrpljenom ležištu plina. Atraktivan koncept mogao bi biti utiskivanje vodika u proizvodno ležište prirodnog plina kao još jedan način za poboljšanje proizvodnje plina (Economides, et.al., 2021).



Slika 2-4. Proizvodnja plavog vodika iz prirodnog plina (Medium, 2021)

2.2.3 Sivi vodik

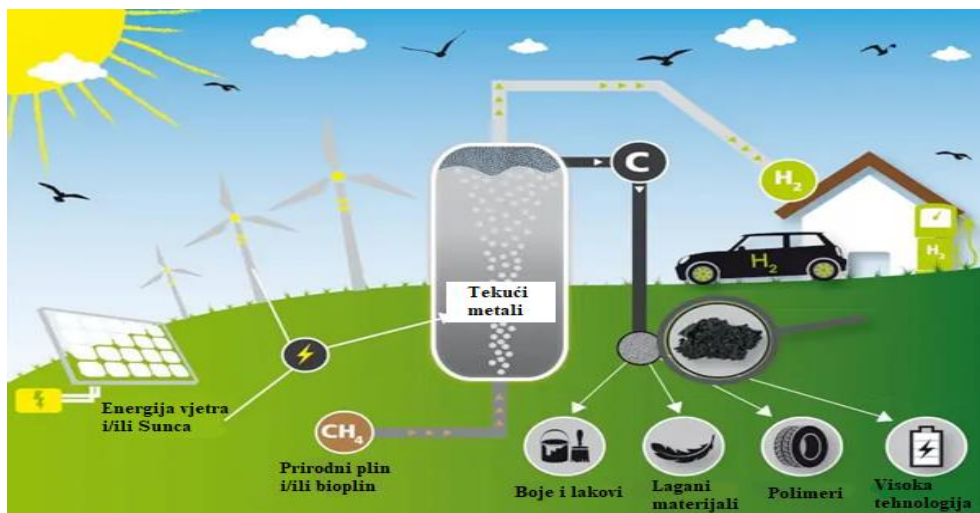
Sivi vodik nastaje iz prirodnog plina, ili metana, ali bez hvatanja stakleničkih plinova koji nastaju u procesu (Slika 2-5). Proces koji se koristi za stvaranje vodika iz prirodnog plina naziva se parno reformiranje metana (engl. *steam methane reforming*, SMR), gdje se para visoke temperature (700°C–1000°C) koristi za proizvodnju vodika iz izvora metana, kao što je prirodni plin. U parnom reformiranju metana, metan reagira s parom pod tlakom od 3-25 bara u prisutnosti katalizatora za proizvodnju vodika, ugljičnog monoksida i relativno male količine ugljičnog dioksida. Reformiranje parom je endotermno, što znači da toplina mora biti dovedena u proces da bi se reakcija nastavila. Trenutno je vodik gotovo sav siv, čak 98 % se proizvodi iz parnog reformiranja i rasplinjavanja, a samo 2 % se proizvodi elektrolizom, što dugoročno gledano, nije rješenje (Brunel, 2021).



Slika 2-5. Prikaz proizvodnje sivog i plavog vodika (Energy education, 2021)

2.2.4 Tirkizni vodik

Tirkizni vodik dobiva se postupkom koji se zove piroliza metana (Slika 2-6). Piroliza metana koristi se za proizvodnju vodika i krutog ugljika. U budućnosti bi se tirkizni vodik mogao cijeliti kao vodik s niskom emisijom (Nationalgrid, 2022). Proces proizvodnje vodika ne emitira nikakve stakleničke plinove, ali mogu postojati emisije povezane s eksploatacijom i transportom prirodnog plina koji se koristi kao početni proizvod (CSIROscope, 2021).



Slika 2-6. Piroliza metana (H2 international, 2020)

2.2.5 Crni i smeđi vodik

Crni i smeđi vodik nastali korištenjem ugljena u procesu proizvodnje vodika, (Slika 2-7) su apsolutna suprotnost zelenom vodik u vodikovom spektru i najštetniji su za okoliš. Crna i smeđa boja odnose se na tip ugljena, antracitni (crni) ili lignit (smeđi). Smeđi i crni vodik nastaju rasplinjavanjem. To je ustaljeni proces koji se koristi u mnogim industrijama i pretvara materijale bogate ugljikom u vodik i ugljični dioksid. S obzirom da je rasplinjavanje oblik nepotpunog sagorijevanja, nusproizvodi se ispuštaju u atmosferu (CSIROscope, 2021).



Slika 2-7. Prikaz proizvodnje smeđeg vodika (S&P Global, 2021)

2.2.6 Ružičasti vodik

Slično zelenom vodik, ružičasti vodik nastaje elektrolizom, ali koristeći nuklearnu energiju kao izvor energije (Petrofac, 2022). Nuklearno proizvedeni vodik također se može nazvati ljubičastim vodikom ili crvenim vodikom (Nationalgrid, 2022).

2.2.7 Bijeli vodik

Bijeli vodik je prirodni geološki vodik koji se nalazi u podzemnim naslagama. Trenutačno ne postoje strategije za iskorištavanje ovog vodika (Nationalgrid, 2022).

3 EUROPSKI ZELENI PLAN

3.1 Strategije i sporazumi za klimatski neutralnu Europu

Zbog zabrinjavajućih klimatskih promjena događa se sve veći pritisk na energetske tranziciju. Kao odgovor na potrebe hitne promjene količine emisija CO₂ i ostalih stakleničkih plinova, sklapaju se novi ugovori i sporazumi od kojih su neki usko vezani za razvoj tehnologija primjene vodika. Tako je stvoren i Europski zeleni plan (engl. *European Green Deal*) koji predstavlja inicijativu Europske unije koja ima za cilj postići klimatsku neutralnost do 2050. godine. Fokusira se na smanjenje emisija stakleničkih plinova, promicanje obnovljivih izvora energije, održivo gospodarstvo i zaštitu okoliša.

U srpnju, 2020. godine, predstavljena je EU strategija za vodik s ciljem postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine. Ona predstavlja globalne mjere za provedbu Pariškog sporazuma i ostvarenje nulte stope onečišćenja. Vodik postaje presudan za provedbu tog plana zato što očekivana električna energija iz obnovljivih izvora će dekarbonizirati velik dio potrošnje energije no neće moći pokriti cjelokupnu potrošnju, a vodik ima dovoljno velik potencijal za razvoj kako bi uspio pokriti tu razliku pomoću njegove mogućnosti za skladištenje i prijenos obnovljive energije te mogućnosti da čisti vodik zamjeni fosilna goriva u nekim industrijskim procesima. Brzo uvođenje čistog vodika ključno je za uspješnost povećanih klimatskih ambicija EU-a, tj. da se do 2030. troškovno učinkovito smanje emisije stakleničkih plinova za najmanje 50 %, po mogućnosti 55 % (European Commission, 2020). Iako je Europa vrlo konkurentna u području tehnologija za proizvodnju čistog vodika i u dobrom položaju da ostvari korist od globalnog razvoja čistog vodika kao nositelja energije današnji niskougljični vodik i vodik iz obnovljivih izvora još ne mogu cijenom konkurirati vodik proizvedenom iz fosilnih goriva no to bi se trebalo promijeniti u bliskoj budućnosti. Gotovo sve države članice uključile su planove za čisti vodik u svoje nacionalne energetske i klimatske planove, njih 26 uključilo se u „Inicijativu za vodik”, a 14 ih je uvrstilo vodik u planove nacionalne politike za infrastrukturu za alternativna goriva. Neke od njih već su donijele nacionalne strategije ili rade na tome. Unatoč svemu, da bi došlo do prekretnice razvoja vodika treba mnogo ulaganja i infrastrukturna mreža za čije ostvarenje EU i partneri iz trećih zemalja trebaju aktivno surađivati. Očekuje se kako bi Europski savez za čisti vodik, na temelju iskustava uspješnog Europskog saveza za baterije, kao

suradnja javnih tijela, industrije i civilnog društva, trebao razviti efikasan plan ulaganja i niza konkretnih projekata.

Stvaranje ekosustava u Europi ima zamišljene tri faze.

U prvoj fazi, od 2020. do 2024., strateški je cilj u EU-u imati elektrolizatore snage najmanje 6 GW za vodik iz obnovljivih izvora i proizvesti do milijun tona vodika iz obnovljivih izvora kako bi se dekarbonizirala postojeća proizvodnja vodika, npr. u kemijskom sektoru, i olakšalo prihvaćanje potrošnje vodika za nove krajnje namjene, kao što su drugi industrijski procesi ili možda prijevoz teškim vozilima (European Commission, 2020).

U drugoj fazi, od 2025. do 2030., vodik treba postati element integriranog energetskeg sustava, pri čemu je strateški cilj u EU-u najkasnije 2030. imati elektrolizatore snage najmanje 40 GW za proizvodnju vodika iz obnovljivih izvora i proizvesti do 10 milijuna tona vodika iz obnovljivih izvora (European Commission, 2020).

U trećoj fazi, koja će trajati od 2030. do 2050., tehnologije proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora trebale bi se usavršiti i široko primjenjivati u svim sektorima u kojima su moguće (European Commission, 2020).

3.2 Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine

Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine oslanja se na europski zeleni plan i nacionalne strateške ciljeve za smanjenje emisija stakleničkih plinova te prelazak na održive izvore energije. Vodik je identificiran kao ključni energent koji će igrati vitalnu ulogu u dekarbonizaciji različitih sektora, uključujući promet, industriju i energetiku.

Primjena vodika u prometu ima poseban značaj jer je promet jedan od najvećih izvora emisija CO₂. U strategiji se predviđa uvođenje vodika kao goriva u sve segmente prometa, od cestovnog do zračnog. Tehnologije koje koriste vodik su već dovoljno napredne, što omogućava njihovu implementaciju u zrakoplovima, dronovima, autobusima i kamionima. Posebna pažnja posvećuje se razvoju infrastrukture za punjenje vodika, što uključuje izgradnju punionica u ključnim prometnim čvorištima .

Zračni promet je jedan od sektora koji najviše doprinosi emisijama, i stoga je identificiran kao ključan za primjenu novih tehnologija koje koriste vodik. Tehnologija vodika već omogućava primjenu u zrakoplovima s ultralaganom opremom, a predviđa se daljnji razvoj koji bi omogućio širu primjenu ove tehnologije u komercijalnom zračnom prometu (Hrvatski sabor, 2022). Planira se razvoj infrastrukture u zračnim lukama, što bi uključivalo punionice za vodik i potrebnu logistiku.

Industrijski sektor također ima veliki potencijal za primjenu vodika, posebno u kontekstu dekarbonizacije. Postrojenja koja već koriste vodik proizveden iz fosilnih izvora mogu biti prva koja će preći na korištenje vodika iz obnovljivih izvora. Takva transformacija omogućila bi smanjenje emisija u industrijskim procesima, čime bi se značajno doprinijelo ostvarivanju nacionalnih ciljeva za smanjenje emisija.

Proizvodnja vodika temeljit će se na korištenju obnovljivih izvora energije (OIE), s posebnim naglaskom na elektrolizu vode (Hrvatski sabor, 2022). Strategija predviđa izgradnju kapaciteta za proizvodnju zelenog vodika, a ključno je da ta proizvodnja bude smještena u blizini potrošača kako bi se smanjili troškovi transporta. U početnim fazama, postojeće industrijske lokacije koje su pred gašenjem mogu se prenamijeniti za proizvodnju vodika.

Transport i pohrana vodika predstavljaju izazov koji će zahtijevati značajna ulaganja u infrastrukturu. U prvoj fazi, očekuje se da će vodik biti transportiran u plinovitom stanju, dok će u kasnijim fazama, s povećanjem potražnje, biti potrebno razviti tehnologije za pohranu u tekućem stanju. Strategija također predviđa mogućnost prenamjene postojećih plinskih cjevovoda za transport vodika, čime bi se omogućila integracija vodika u postojeću energetska infrastrukturu.

Faza 1: 2021. – 2024. – Pokretanje razvoja vodikovih tehnologija

Glavni ciljevi:

- Osnivanje infrastrukturnih temelja: U prvoj fazi strategije fokus je na izgradnji osnovne infrastrukture za proizvodnju i distribuciju vodika (Hrvatski sabor, 2022). To uključuje početnu izgradnju punionica za vodik, posebno u većim gradovima i ključnim prometnim čvorištima.

- Pilot projekti: Početna implementacija vodikovih tehnologija u transportu i industriji. Poseban naglasak stavlja se na cestovni promet, gdje se uvode vozila na vodik u javni gradski prijevoz.
- Razvoj tehnologije: U ovoj fazi predviđa se primjena postojećih tehnologija za proizvodnju vodika iz obnovljivih izvora energije, uz naglasak na elektrolizu vode.

Primjena u prometu:

- Cestovni promet: Početni projekti uključuju uvođenje autobusa i kamiona na vodik u velikim urbanim sredinama.
- Industrija: Primjena vodika u industrijskim procesima, posebno u postrojenjima koja već koriste vodik iz fosilnih izvora.

Faza 2: 2025. – 2030. – Širenje primjene i infrastrukture

Glavni ciljevi:

- Proširenje infrastrukture: U ovoj fazi dolazi do značajnog povećanja broja punionica za vodik diljem zemlje, s posebnim fokusom na transportne koridore i zračne luke (Hrvatski sabor, 2022).
- Skaliranje proizvodnje: Proizvodnja obnovljivog vodika se povećava kroz uspostavu novih kapaciteta elektrolizatora i daljnji razvoj tehnologija za proizvodnju vodika iz različitih obnovljivih izvora.
- Integracija u energetska mrežu: Počinje integracija vodika u postojeće energetske mreže, uz mogućnost miješanja vodika s prirodnim plinom u plinskim sustavima.

Primjena u prometu:

- Željeznički promet: U ovoj fazi se razmatra uvođenje vlakova na vodik, posebno na neelektrificiranim linijama. Vodik postaje ozbiljna opcija za dekarbonizaciju željezničkog prometa.
- Zračni promet: Počinje planiranje i implementacija korištenja vodika u zračnim lukama, što uključuje infrastrukturne prilagodbe za punjenje zrakoplova na vodik.

Faza 3: 2031. – 2050. – Potpuna integracija i ekspanzija

Glavni ciljevi:

- Cjelovita primjena u svim sektorima: Vodik postaje ključni energent u industriji, prometu, energetici, pa čak i u kućanstvima. U ovoj fazi, vodik je široko integriran u nacionalnu energetska i transportnu infrastrukturu.
- Razvoj novih tehnologija: U ovoj fazi dolazi do potpune komercijalizacije naprednih tehnologija za proizvodnju, pohranu i transport vodika, uključujući primjenu tekućeg vodika.
- Regionalna i međunarodna suradnja: Hrvatska postaje važna točka u regionalnom i europskom transportu vodika, uz korištenje postojećih plinskih mreža i novih plinovoda za transport vodika.

Primjena u prometu:

- Pomorski promet: Vodik postaje ključan energent za pomorski promet, posebno za trajekte i brodove koji povezuju otoke s kopnom.
- Zračni promet: Vodik se u potpunosti koristi kao pogonsko gorivo za zrakoplove, uz izgrađenu infrastrukturu u glavnim zračnim lukama u Hrvatskoj (Hrvatski sabor, 2022).

3.3 Potencijal domaće proizvodnje vodika

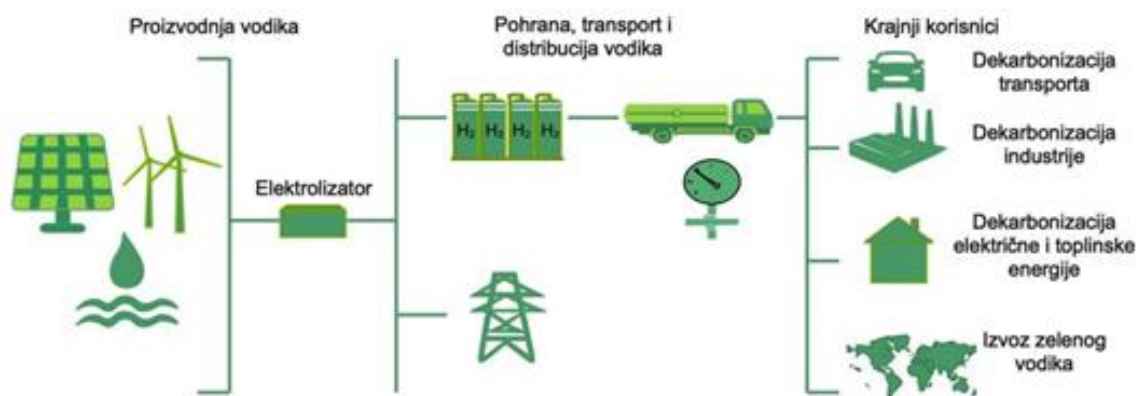
Trenutni troškovi proizvodnje zelenog vodika su visoki zbog cijene obnovljive energije i tehnologije elektrolize. Međutim, očekuje se da će troškovi opadati kako se tehnologija razvija i postaje šire primjenjiva. Razvijanje infrastrukture za skladištenje, transport i distribuciju vodika generalno je još uvijek izazov, budući da vodik zahtijeva specijalizirane spremnike zbog svoje niske gustoće u plinovitom stanju.

Očekuje se da će proizvodnja vodika u RH biti bazirana na istraživanju, razvoju i primjeni svih mogućnosti proizvodnje niskougljičnog vodika u postojećim industrijskim središtima koji

predstavljaju buduće centre potražnje za istim (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2022).

Potencijal vodika u RH prvenstveno proizlazi iz potencijala proizvodnje električne energije iz OIE koja može osigurati odgovarajuću i dugoročnu proizvodnju obnovljivog vodika (Slika 3-1).

Prvi projekti vezani za proizvodnju vodika većinski će se vezati uz elektrolizatore i električnu energiju iz OIE, ali je ključno razvijati i projekte vezane za nove tehnologije proizvodnje obnovljivog vodika (uz male ili nikakve emisije CO₂). To se odnosi na dobivanje vodika pirolizom ili uplinjavanjem otpada, proizvodnje električne energije iz snaga valova, odobalne vjetroelektrane i sl.



Slika 3-1. Opća shema vodikovog lanca vrijednosti, od proizvodnje do krajnjeg korištenja (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2022)

Ovisno o potencijalnom prestanku rada plinskih platformi na sjevernom Jadranu, postoji mogućnost izrade projekta odobalnih vjetroelektrana od kojih bi se putem postojećeg plinovoda mogao transportirati vodik za potrebe RH i Italije (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2022). Također RH ima i generalno veliki potencijal za proizvodnju vodika pomoću vjetroenergije zbog bogatstva obnovljivih izvora energije. Uz vjetroenergiju tu je i hidroenergija te solarna energija. Jadranska obala i otoci pogodni su za razvoj solarnih elektrana, dok su priobalna i planinska područja idealna za vjetroelektrane. U kontinentalnom dijelu zemlje ima geotermalne resurse također vrlo pogodne za proizvodnju vodika.

Uz taj potencijal za proizvodnju vodika zbog svojih prirodnih resursa, RH ima značajan geostrateški položaj što bi u jednom trenutku moglo imati ključnu ulogu u uspješnom izvozu proizvedenog vodika.

Također se može iskoristiti i postojeća industrijska infrastruktura, poput rafinerija i kemijskih postrojenja, može se modernizirati za proizvodnju vodika. Luka Rijeka i druge jadranske luke imaju potencijal da postanu centri za uvoz i izvoz vodika, kao i njegovo skladištenje i distribuciju.

Planovi za proizvodnju vodika su podijeljeni u više faza:

1. U razdoblju do 2026. godine, fokus je na prometu i industrijskom sektoru. Oba sektora su već gotovo spremna za početak primjene obnovljivog vodika.
2. U razdoblju do 2030. godine najvažniji cilj je osigurati proizvodnju dovoljne količine obnovljivog vodika koji bi služio kao sirovina u industrijskim procesima. Za uspostavu značajnije proizvodnje obnovljivog vodika, u početnom razdoblju, mogu služiti već postojeća industrijska postrojenja (tzv. „brownfield“ investicije) koja su pred gašenjem ili koja imaju potencijal prenamjene i uspostave novih, dekarboniziranih tehnologija u svojim proizvodnim procesima.
3. Nakon 2030. / 2040. godine, pretpostavlja se da će potražnja znatno narasti te je plan osigurati proizvodnju obnovljivog vodika dovoljnog za sve potrebe RH. Planira se potencijalno i izvoz obnovljivog vodika.

4 MOGUĆNOST PRIMJENE VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA U ZRAČNOM PROMETU

Zračni promet je jedan od najvažnijih čimbenika globaliziranog svjetskog gospodarstva koji pridonosi raznim granama gospodarstava država širom svijeta, pridonosi rastu trgovine, turizma, međunarodnih ulaganja i mnogih drugim. Zračni promet kontinuirano raste. U posljednjih 20 godina, zračni prijevoz povećavao je svoj kapacitet za 4,8 % svake godine, što je utjecalo na broj mlaznih zrakoplova. Osim toga, Boeingova procjena trenutnog tržišta navodi da će se broj mlaznih zrakoplova, koji je iznosio 19 000 u 2008. godini, povećati na 35 800 do 2027. godine (Boeing, 2022). Zbog tako velikog konstantnog povećanja broja letova i aviona, zrakoplovstvo je jedan od najbrže rastućih izvora emisija stakleničkih plinova. Direktno zrakoplovne emisije trenutno iznose 3,6 % ukupnih emisija stakleničkih plinova u Europi i više od 2 % emisija na globalnoj razini. Nakon cestovnog prometa, zračni promet je drugi najvažniji izvor stakleničkih plinova u prometnom sektoru. Razlog tomu je što se većina emisija, u zračnom prometu emitira na velikim visinama, a uvriježeno mišljenje je da emisije emitirane na tim visinama imaju dvostruko jači utjecaj od onih koje se emitiraju na tlu.

Početak regulacije i kontrole nad emisijama zrakoplovnih motora zabilježen je 1970. godine u SAD-u kad je Američki kongres donio Zakon o čistom zraku (engl. *Clean Air Act*). Nakon tog zakona povećavanjem opsega zračnog prometa kroz vrijeme propisi su se kontinuirano nadopunjavali i postajali su sve restriktivniji. Tako je zrakoplovstvo vremenom postalo uključeno i u EU ETS jer je značajan porast broja letova povećao je njegov udio u onečišćenju okoliša te potaknuo potrebu za dodatnim ograničenjem zrakoplovnih emisija.

EU ETS (engl. *European Union Emissions Trading System*), program za trgovanje emisijama stakleničkih plinova koji je Europska unija odlučila razviti kao tržišno utemeljenu mjeru s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova na ekonomski učinkovit način.

Danas se pokušava trajno riješiti svih emisija i potići klimatsku neutralnost što prije je moguće. U avioindustriji jedno od rješenja je uvođenje vodika kao pogonskog goriva.

Vodik se sve više uvodi kao gorivo u avioindustriju zbog niza važnih razloga koji uključuju ekološke prednosti, tehnološke inovacije i ekonomsku održivost u usporedbi s tradicionalnim gorivima. Prvi i najvažniji razlog je smanjenje emisija stakleničkih plinova. Naime, vodik kao

gorivo ne proizvodi štetne emisije poput ugljičnog dioksida, već jedini nusproizvodi su voda i toplina. To ga čini čistim izvorom energije koji je iznimno važan za avioindustriju koja pokušava smanjiti svoj negativan utjecaj na okoliš.

Ciljevi klimatske neutralnosti izrazito potiču primjenu vodika u avioindustriji. Zrakoplovni sektor suočava se s pritiscima da smanji svoj ugljični otisak kako bi ispunio globalne klimatske ciljeve, kao što su oni definirani Pariškim sporazumom i europskim zelenim planom. Budući da je dekarbonizacija zračnog prometa posebno izazovna zbog visokih energetske potreba, vodik pruža jedno od rijetkih održivih rješenja koja mogu značajno smanjiti emisije.

Osim ekoloških aspekata, vodik se može proizvoditi iz obnovljivih izvora, poput solarne i vjetroenergije, ako što je već spomenuto, koristeći proces elektrolize vode. To stvara održivi krug proizvodnje goriva koji ne ovisi o fosilnim izvorima, čije su rezerve ograničene, a cijene podložne velikim oscilacijama. Takva proizvodnja doprinosi stabilnijoj i ekološki prihvatljivijoj opskrbi energijom.

Tehnološki napredak u posljednjim godinama doveo je do značajnog poboljšanja u tehnologiji gorivnih članaka i skladištenja vodika. Ove inovacije omogućile su sigurniju i učinkovitiju primjenu vodika kao goriva za avione, čime je otvoren put za širu upotrebu u komercijalnom zračnom prometu. Visok energetske sadržaj vodika također igra ključnu ulogu, jer osigurava učinkovito i snažno gorivo koje je neophodno za zrakoplove.

Uz ove tehničke prednosti, avioindustrija također reagira na regulatorne pritiske i subvencije. Sve veći broj vlada i međunarodnih organizacija postavlja ambiciozne ciljeve za smanjenje emisija, što dodatno motivira avioindustriju da traži održiva rješenja kao što je vodik. Financijske potpore za istraživanje i razvoj vodikovih tehnologija dodatno ubrzavaju njihovu implementaciju.

U konačnici, vodik kao gorivo predstavlja priliku za transformaciju avioindustrije prema čistijoj i održivijoj budućnosti. Ovaj prijelaz pomaže u smanjenju negativnog utjecaja na okoliš, odgovara na klimatske izazove i priprema zrakoplovstvo za nova tehnološka i regulatorna okruženja koja se brzo mijenjaju.

Tablica 4-1. Usporedba vodika i standardnog goriva korištenog u avioindustriji (Dincer, 2016)

STVOJSTVA	PREDNOSTI	NEDOSTATCI
Izgaranje	Visoka gustoća energije po masi Visoka učinkovitost goriva Velika brzina plamena Širok raspon zapaljivosti	Niska gustoća energije po volumenu
	Visoka temperatura izgaranja Niža emisija plamena Veća brzina difuzije Poboljšana raspodjela temperature	Krtost materijala
Emisije	Bez CO, CO ₂ , čestica, neizgorjelih ugljikovodika, sumpora, mirisa itd. Smanjen NO _x	Velike količine vodenih para
Zrakoplovi	Smanjena buka motora Mali motori	Dulji trup
	Smanjena bruto težina Smanjena površina krila	Povećana količina spremnika
Skladištenje	Veća toplinska stabilnost Visoki kapacitet hladnjaka	Nisko vrelište
	Bez korozivnih i erozivnih kontaminanata	Niska gustoća
Sigurnost	Nema kisika u sustavu goriva Plamen koji ne zrači	Vrlo niska minimalna energija paljenja
	Uzgonska para	Širok raspon zapaljivosti
Troškovi	Niži troškovi zrakoplova Dulji vijek trajanja motora i niži troškovi održavanja	Visoki kapitalni troškovi proizvodnje goriva

Vodik u zračnom prometu uzet je kao element energetskog sustava koji je relativno jednostavno pratiti.

Općenito se smatra da je skladištenje komprimiranog vodika, zbog niske gustoće najosnovnija i standardna metoda. Tlakovi skladištenja u spremnicima stlačenog vodika kreću se od 35 MPa do 70 MPa (Gong & Verstraete, 2017). Ovaj pristup nudi prednosti kao što su brzo punjenje i jednostavnost korištenja. U NRL-ovom programu (Naval Research Laboratory, 2013) Ion Tiger, predloženi su parametri UAV (bespilotna letjelica, engl. *unmanned air vehicle*) s pogonom na gorive ćelije na tekući vodik. Letjelica bi imala raspon krila 5,18 m, snagu motora 0,55 kW, težinu 16,78 kg, te bi mogla prenositi 2,25 kg kroz 48 sati. UAV Ion Tiger koristi tehnologiju gorivih ćelija s tekućim vodikom i predstavljao bi alternativu bespilotnim letjelicama s konvencionalnim pogonom koje stvaraju veću buku, toplinu i zagađenje. Najinteresantniji element Ion Tigera je ugljikom obložen aluminijski spremnik zapremnine dovoljne za 500 g H₂ pri tlaku od 34 MPa pri čemu je sami spremnik na kraju lakši od 4 kg.

Ekstremno niske temperature potrebne su za skladištenje vodika u kapljevitom stanju (kriogeni vodik). Tekući vodik (LH₂) održava se na temperaturi od približno -260 °C i ima gustoću od oko 71 kg/m³. Značajke tekućeg vodika omogućuju znatno povećanje gustoće u usporedbi s visokotlačnim spremnikom plina, kao i smanjenje mase spremnika zbog rada pri nižem tlaku, što znači kako se (maseno i energetski gledajući) više vodika može pohraniti u tekućem obliku u usporedbi sa spremnicima za komprimirani plin. LH₂ se preferira se za zračni prijevoz zbog njegove dokazane uspješne primjene vezane uz svemirske letove, ali njegova je cijena ključni čimbenik u ukupnoj ekonomičnosti zrakoplova s pogonom na vodik (Hoelzen et al., 2022).

Rondinelli et al. (2017) istaknuli su prilike i izazove povezane s usvajanjem vodikovih goriva u zrakoplovstvu. Prikazan je pregled ekoloških i gospodarskih prednosti te tehnoloških izazova. Prednosti tekućih vodikovih goriva u zrakoplovima su pokazane na temelju pojednostavljenog modela za procjenu konvencionalnih konfiguracija, uključujući promjene u volumenu, masi i utjecaju na okoliš. Zaključuju kako vodik u kriogenom tekućem obliku pokazuje veliki potencijal da postane visoko održivo komercijalno zrakoplovno gorivo s nižim emisijama i manjom masom goriva za određeni raspon, što rezultira ekonomski isplativijom tehnologijom. Unatoč tome što su ustanovili pogoršane aerodinamičke i strukturne

karakteristike, zbog uštede težine pri polijetanju od više od 11 % (mali regionalni mlažnjak) i do 25 % (veliki širokotrupni zrakoplov), zrakoplovi pogonjeni vodikom mogu imati jednake letačke performanse. Iz tog razloga, volumen koji zahtijevaju spremnici vodika sprječava prevođenje ove uštede težine u dodatni korisni teret.

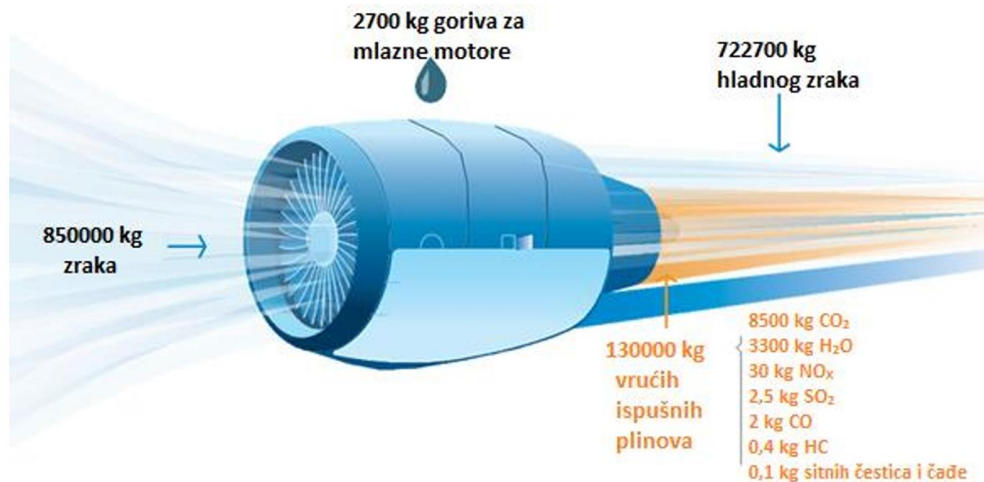
Za potrebe analize dalje istraživanje literature je bilo usmjereno prema:

1. Procjeni jedinične emisije ugljikovog dioksida u zrakoplovnom prometu (tona CO₂ po putniku, po kilometru leta)
2. Procjeni jedinične potrošnje goriva (može biti izvedeno iz emisija), tj. energije.
3. Jediničnoj procjeni za potreban vodik u slučaju prijelaza na vodikovu tehnologiju (kg H₂ po putniku, po kilometru leta).
4. Potencijal domaće proizvodnje vodika
5. Potrebe i mogućnosti za podzemnim skladišnim prostorom za sigurnu opskrbu vodika

4.1 Emisije ugljikovog dioksida u zrakoplovnom putničkom prometu

Zrakoplovstvo predstavlja značajan doprinos unutar transportnog sektora, gdje zauzima drugo mjesto po emisijama odmah nakon cestovnog prometa, kao što je već spomenuto. U 2023. godini, emisije iz zrakoplovstva u Europi činile su približno 4 % ukupnih emisija stakleničkih plinova. Ovaj udio uključuje emisije iz domaćih i međunarodnih letova unutar Europske unije. Na globalnoj razini, zrakoplovstvo je u 2023. godini činilo oko 2-3 % ukupnih emisija stakleničkih plinova povezanih s energijom. Zbog očekivanja daljnjeg rasta emisija s obzirom na povećanje potražnje za međunarodnim letovima, emisije u 2025. godini bi mogle premašiti razine iz 2019. godine, prema procjenama Međunarodne agencije za energetiku (IEA) (Špoljar, 2019).

Glavni ispušni plinovi mlaznih motora zrakoplova sastoje se približno od 7 do 8 % ugljičnog dioksida (CO₂) i vodene pare (H₂O) te 0,5 % dušikovih oksida (NO_x), neizgorenih ugljikovodika (HC), ugljičnog monoksida (CO), sumporovih oksida (SO_x) te od drugih sitnih čestica i čađe (Slika 4-1). Preostali dio, 91,5 % do 92,5 % sastoji se od kisika (O₂) i dušika (N₂) (Bazijanac i Domitrović, 2017).



Slika 4-1. Emisije iz tipičnog dvomotornog mlaznog zrakoplova tijekom 1-satnog leta sa 150 putnika (Eurocontrol, 2019)

Utjecaj zračenja (engl. *radiative forcing*) označava promjenu u energetskej ravnoteži Zemljine atmosfere zbog promjena u razini zračenja koje dolazi u atmosferu ili izlazi iz nje odnosno zbog emisija stakleničkih plinova.

Pozitivan utjecaj zračenja odnosi se na situaciju kada dolazi do zagrijavanja atmosferskog sustava. Ovaj efekt nastaje kada su zračenja koja ulaze u atmosferu veća od onih koja izlaze, uzrokujući porast temperature. Glavni uzroci pozitivnog utjecaja zračenja su staklenički plinovi poput ugljičnog dioksida (CO₂), metana (CH₄) i dušikovog oksida (N₂O), koji zadržavaju toplinu u atmosferi. Primjer pozitivnog utjecaja je povećanje CO₂, što dovodi do veće zadržane topline i tako pridonosi globalnom zagrijavanju.

Negativan utjecaj zračenja predstavlja suprotan učinak, gdje dolazi do hlađenja atmosferskog sustava. Ovaj efekt nastaje kada zračenja koja izlaze iz atmosfere prema van nadmašuju zračenja koja ulaze. Negativan utjecaj zračenja može biti uzrokovan, primjerice, prisutnošću aerosola (sitnih čestica u zraku) koji reflektiraju sunčevu svjetlost natrag u svemir, smanjujući količinu energije koja dopire do površine Zemlje.

Mjerna jedinica utjecaja zračenja je vati po kvadratnom metru (W/m^2). Ta jedinica izražava snagu promjene energije po jedinici površine.

Najznačajniji staklenički plinovi čije emisije proizvodi zrakoplovna industrija su: ugljični dioksid (CO_2), vodena para (H_2O), emisije dušikovih oksida (NO_x) i sumporovih oksidi (sumporni dioksid (SO_2)).

Od navedenih stakleničkih plinova najštetnije, za atmosferu, su emisije ugljičnog dioksida (CO_2) jer CO_2 ima dugotrajan utjecaj na globalno zagrijavanje. Jednom kad se emitira, CO_2 ostaje u atmosferi stotinama godina, pridonoseći efektu staklenika i povećanju globalnih temperatura.

Dušikovi oksidi (NO_x) doprinose stvaranju ozona u atmosferi, što dodatno pojačava efekt staklenika. Također utječu na smanjenje koncentracije metana, što ima složen i dugoročan učinak na klimu. Vodena para na velikim visinama stvara kondenzacijske tragove i oblake cirusa, koji privremeno zadržavaju toplinu. Čađa i sulfatne čestice mijenjaju reflektivnost Zemlje i utječu na formiranje oblaka, što može privremeno zagrijavati ili hladiti atmosferu. Utjecaj vodene pare i čestica čađe je više kratkotrajan ili lokaliziran, dok CO_2 ostaje glavni dugoročni problem.

Međuvladino tijelo za klimatske promjene (engl. *The Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) napravio je procjene prosječnog globalnog utjecaja zračenja od emisija za 1992. godinu koje pokazuju da je cjelokupna flota zrakoplova sudjelovala s 3,5 % u promjenama utjecaja zračenja od svih ljudskih aktivnosti te pretpostavku za 2025. godinu u kojoj su predviđeni utjecaji zračenja za otprilike četiri puta veći. Što bi značilo da bi cjelokupna flota zrakoplova sudjelovala s 5 % u promjenama utjecaja zračenja od svih ljudskih aktivnosti do 2025. godine (IPCC, 2019).

1990. godine globalni zrakoplovni promet emitirao je oko 0,5 milijardi tona CO_2 , a u 2019. godini to je bilo oko 1 milijarde (Our World in Data, 2024). Ovi podatci pokazuju da iako je optimizirana potrošnja (tj. smanjene su emisije po putniku i po kilometru leta), da je povećanje broja letova toliko da su emisije kroz pet godina porasle za duplo.

U 1990. godini, emisije CO₂ iznosile su 357g (0,000357t) CO₂ po putniku po kilometru leta, do 2019. godine se broj smanjio na 157g CO₂ po putniku po kilometru leta (Our World in Data, 2024). Ovaj broj može varirati ovisno o vrsti zrakoplova, popunjenosti, duljini leta i učinkovitosti goriva. Za kratke letove emisije su često veće po kilometru zbog dodatne potrošnje goriva pri polijetanju i slijetanju, dok su za duže letove emisije po kilometru nešto manje zbog učinkovitije upotrebe goriva tijekom krstarenja.

Avioni koji koriste vodik kao gorivo mogu imati emisije, ali te emisije su značajno različite i manje štetne u usporedbi s tradicionalnim mlaznim gorivima. Postoje dva glavna načina kako se vodik može koristiti u zrakoplovima: kroz gorivne članke ili izravnim sagorijevanjem u motorima.

Kada avion koristi vodik kroz gorive članke, proizvodi samo vodu kao nusproizvod, što znači da nema emisija CO₂ ili drugih stakleničkih plinova. Ovakva tehnologija omogućava čistu energiju, bez doprinosa klimatskim promjenama.

Ako se vodik koristi izravno u motorima, može doći do stvaranja dušikovih oksida (NO_x) zbog visokih temperatura izgaranja. Iako nema emisija ugljičnog dioksida, NO_x može utjecati na kvalitetu zraka i pridonijeti stvaranju smoga.

Dakle, iako vodik kao gorivo ima daleko manji negativan utjecaj na okoliš u usporedbi s fosilnim gorivima, još uvijek postoje izazovi, posebno ako se sagorijeva izravno.

4.2 Potrošnja goriva u zrakoplovnom putničkom prometu

Potrošnja goriva u zrakoplovnoj industriji, uz ekološke izazove koje stvara, predstavlja i jedan od najvećih troškova ovog sektora. Zrakoplovi koriste kerozin, specifično gorivo poznato kao Jet A ili Jet A-1, koje je visokoenergetsko i omogućava dugotrajne letove s minimalnim rizikom od smrzavanja na velikim visinama.

Nekoliko tipova goriva kao što je mlazno gorivo A (engl. *jet fuel A*), tekući prirodni plin i vodik iz raznih izvora usporedili su Dincer i Acar (2016). Uspoređena su neka opća svojstva (Tablica 4-2).

Tablica 4-2. Usporedba svojstava mlaznog goriva i vodika (Dincer i Acar, 2016)

Svojstvo	Sintetičko mlazno gorivo (Sjf44)	Metan	Vodik
Prosječna formula	C12.5H24.4	CH ₄	H ₂
Točka vrelišta (°C)	167-266	-161,3	-252,7
Točka tališta (°C)	-50	-182	-259,2
Gustoća pri temperaturi vrenja (kg/m ³)	800	423	71
Temperatura plamena (°C)	2 022	1973	2158
Donja ogtjevnost (kJ/kg)	42 906	48 139	119 970
Temperatura plamena (°C)	2 022	1973	2158

Gorivo čini između 20 % i 40 % ukupnih operativnih troškova zrakoplovnih kompanija, što ga čini jednim od najvećih pojedinačnih troškova u ovoj industriji. Potrošnja goriva može značajno varirati ovisno o vrsti zrakoplova, dužini leta, i drugim faktorima. Prosječno, moderni komercijalni zrakoplovi troše između 3 i 4 litre goriva po putniku na 100 kilometara (OpenAirlines, 2018). Neki noviji modeli zrakoplova, poput Boeinga 787-9, poznatog kao "Dreamliner," troše prosječno oko 2,5 litre goriva po putniku na 100 kilometara. Ova potrošnja je otprilike 30 % manja u usporedbi sa starijim modelima (The Lufthansa Group, 2023).

Usporedba emisija i masene energetske gustoće pokazuje kako vodik daje oko 2,5 puta više energije po kilogramu od danas primjenjivog goriva (Sjf44,), međutim, volumno, energetska gustoća je oko 3 puta manja.

Tablica 4-3. Usporedba mase i energije te emisija za različita goriva (Dincer i Acar, 2016)

Svojstvo	Sintetičko mlazno gorivo (Sjf44)	Metan	Vodik
Omjer mase zrak/gorivo pri	14,7	17,2	34,2
kg goriva/GJ	233	208	83,3
m³ goriva/GJ	0,032	0,048	0,12
kg CO₂/GJ	720	550	0
kg H₂O/GJ	290	450	750
kg NO_x/GJ	0,4	0,5	0,6

U publikaciji istih autora mogu se pronaći rezultati analize za više goriva (Tablica 4-3), što je poslužilo kao temelj za analize i u ovom radu.

Tablica 4-3. Kratice analiziranih tipova goriva

Gorivo	Opis
JFA	Mlazno gorivo A
NG	Prirodni plin
HSMR	H ₂ iz reformiranja metana parom
HPV	H ₂ iz PV elektrolize
HHE	H ₂ iz hidroelektrolize

Na temelju prethodnih analiza (Pereira et al., 2014) procijenjene su potrošnje goriva za zrakoplov koji se smatra prikladnim za kratke putne udaljenosti (A320) i za zrakoplov koji služi za putovanja na dužim relacijama (A340). Stoga su sumirani i podatci o dotična dva zrakoplova (Webfilte, 2024, Tablica 4-4), što je dopunjeno i za druge zrakoplove koje koristi tvrtka Croatia Airlines u domaćem prometu (Airbus A319-100 i Dash 8-Q400).

Tablica 4-4. Opće karakteristike zrakoplova s najvećim brojem domaćih letova

Parametar	A320-200	A340-200	A319-100	Dash 8-Q400
Duljina, m	37	59	33,84	32,84
Raspon krila, m	35	60	34,09	28,42
Visina, m	11	16	11,76	8,38
Doseg, km	6200	12 400	6900	2400
Kapacitet putnika	170, maks. 180	250, maks.420	124-156	70-90
Maks. uzletna masa, kg	78 000	27 5000	75 500	28 390
Broj motora	2 (CFMI CFM56 ili IAE V2500)	4 (CFMI CFM56)	2 (CFMI CFM56 ili IAE V2500)	2 (Pratt & Whitney PW150A)
Maks. potisak po motoru	120 kN	150 kN	108,9 kN	5071 SHP

Croatia Airlines za domaće letove koristi zrakoplove kao što su Dash 8-Q400 i Airbus A319, a trenutno uvodi novi model Airbus A220-300. Ovi noviji zrakoplovi, poput A220-300, poznati su po svojoj visokoj učinkovitosti i nižoj potrošnji goriva, trošeći oko 25 % manje goriva po sjedalu u usporedbi s prethodnom generacijom zrakoplova.

Airbus A220-300 ima prosječnu potrošnju goriva od oko 2,5 do 3 litre po putniku na 100 kilometara, što predstavlja značajno poboljšanje u odnosu na starije modele koje zamjenjuje (Croatia Airlines, 2024).

Dash 8-Q400 troši oko 2,5 do 3 litre goriva po putniku na 100 kilometara. Budući da je turboprop tehnologija učinkovitija na kraćim domaćim rutama, potrošnja je manja u usporedbi s mlaznim zrakoplovima, što ga čini ekološki prihvatljivijim izborom za kraće letove.

Airbus A319 je stariji model zrakoplova u floti Croatia Airlines troši više goriva, u prosjeku između 3,5 i 4 litre po putniku na 100 kilometara, ovisno o konfiguraciji leta i uvjetima. Ovaj zrakoplov je namijenjen srednje dugim rutama i koristi mlazne motore koji troše više goriva u usporedbi s modernijim i lakšim modelima poput A220-300.

Za potrebe ovog rada proučavani su samo domaći letove Croatia Airlines-a i podatke o njima će se koristiti za sve daljnja procjene (proračune).

Navedene su relacije koje su prisutne u njihovim rasporedima kroz cijelu godinu (Tablica 4-5), godišnji broj letova na tim relacijama, udaljenost koju zrakoplov prijeđe u jednom letu te je na temelju tih podataka izračunata ukupna godišnja udaljenost u kilometrima koju avioni prijeđu za određenu rutu.

Tablica 4-5. Standardne linije Croatia Airlines-a tijekom cijele godine

	Godišnji broj letova	Udaljenost (km)	Ukupna godišnja udaljenost (km)
Zagreb - Split	700	250	175 000
Zagreb - Dubrovnik	700	390	273 000
Zagreb - Zadar	700	200	140 000
Zagreb - Pula	392	210	82 320
Zagreb - Rijeka	392	130	50 960
Split - Zagreb	700	250	175 000
Dubrovnik - Zagreb	700	390	273 000
Zadar - Zagreb	700	200	140 000
Pula - Zagreb	392	210	82 320
Rijeka - Zagreb	392	130	50 960

Nabrojani su sezonski letovi, datumi broja letova, te je, uzimajući u obzir te podatke, izračunat ukupni godišnji broj letova za svaku od sezonskih linija (Tablica 4-6).

Tablica 4-6. Sezonski letovi Croatia Airlines-a

	Tjedni broj letova	Datumi kada su dostupni	Ukupni broj letova
Zagreb - Brač	2	6.4.-26.10.	60
Osijek - Split	1	26.4.-25.10.	26
Osijek - Dubrovnik	1	31.3.-26.10.	28
Zagreb - Pula	7	12.5.-26.10.	210
Rijeka - Split	2	12.5.-26.10.	48
Split - Brač	3	1.5.-30.9.	66

Uzimajući u obzir podatke o godišnjem broju letova (Tablica 4-6), i udaljenosti u kilometrima koje zrakoplov prijeđe na svakom pojedinačnom letu izračunat je ukupni broj kilometara koje prijeđe svaka sezonska linija godišnje (Tablica 4-7).

Tablica 4-7. Udaljenost koju prijeđu sezonski letovi Croatia Airlines-a

	Udaljenost (km)	Godišnji broj letova	Ukupna godišnja udaljenost (km)
Zagreb - Brač	290	60	17 400
Osijek - Split	450	26	11 700
Osijek - Dubrovnik	570	28	15 960
Zagreb - Pula	210	210	44 100
Rijeka - Split	320	48	15 360
Split - Brač	50	66	3300

Iz ovih tablica može se dobiti ukupan broj letova od 6 900 te ukupan broj prijeđenih kilometara domaćih letova unutar Hrvatske u jednoj godini koji iznosi $L_{total} = 1\,691\,280$ km/god.

Domaće letove za Croatia Airlines voze većinom Airbus A 319 – 100 ili Dash 8-Q400, Airbus A 320 – 200 vozi domaće letove u iznimnim situacijama kada je potreban veći kapacitet.

Za medijan prosječne potrošnje uzeto je 40 l/km (Tablica 4-8) što bi značilo da se potroši približno 67 651 200 litara goriva godišnje samo na domaće letove.

Tablica 4-8. Potrošnja zrakoplova koje koristi Croatia Airlines-a

	Prosječna potrošnja (L/h)	Prosječna potrošnja (L/km)
Airbus A 320 - 200	2500-3000	60-70
Airbus A 319 - 100	2400-2600	50-60
Dash 8-Q400	850-1050	15-20

U Hrvatskoj, prosječna cijena litre zrakoplovnog goriva Jet A1 iznosi oko 0,54 USD po litri (približno 0,50 EUR). Cijena može varirati ovisno o tržišnim uvjetima i lokacijama, ali se trenutno kreće u ovom rasponu (Jet A-1 Price on Fuel, 2024).

Uzevši sve navedene podatke u obzir, Croatia Airlines otprilike godišnje troši 33 825 600 EUR na gorivo za domaće letove.

4.3 Zrakoplovi na vodik

Količina vodika potrebna zrakoplovu koji leti isključivo na vodik ovisi o nekoliko faktora, uključujući:

- Tip zrakoplova: Veći zrakoplovi trebaju više goriva zbog većeg težinskog opterećenja i duljine leta.
- Duljina leta: Dulji letovi zahtijevaju više goriva za postizanje potrebnog dometa.
- Energetska gustoća vodika: Vodik ima visoku energetska gustoću po kilogramu, ali nisku po volumenu. To znači da se za istu količinu energije treba pohraniti veći volumen vodika u usporedbi s tekućim gorivima.

Zrakoplovi na vodik imaju dvije vrste pogona: izgaranje vodika i vodikove gorivne stanice.

Zrakoplovi s pogonom na izgaranje vodika koriste vodik izravno kao gorivo u modificiranim mlaznim motorima ili turboprop motorima. Vodik se sagorijeva u motoru kako bi se stvorila potiska. Vodik se kombinira s kisikom u motoru kako bi se stvorila energija. Proces sagorijevanja može proizvesti male količine dušikovih oksida (NO_x) zbog visokih temperatura. Vodik ima visoku energetska gustoću po kilogramu, što omogućuje veliki domet za zrakoplov s manjim volumenom goriva. Potrebni su specijalizirani spremnici za pohranu vodika pri vrlo niskim temperaturama i visokim tlakovima. Što se tiče emisija, CO_2 nije prisutan, ali su moguće emisije NO_x koje treba kontrolirati. Ova vrsta pogona može se koristiti za zrakoplove koji lete na srednjim udaljenostima.

Zrakoplovi s vodikovim gorivnim stanicama koriste vodik u gorivnim člancima za proizvodnju električne energije koja pogoni električne motore. Vodik se kombinira s kisikom u gorivnim člancima da bi se stvorila električna energija. Oni konvertiraju kemijsku energiju vodika i kisika u električnu energiju s visokom učinkovitošću. Gorivni članci proizvode samo vodenu paru kao nusproizvod, čime se eliminira emisija CO_2 i smanjuje utjecaj na okoliš. Električni motori su vrlo učinkoviti u konverziji električne energije. Kao i kod izravnog sagorijevanja, vodik se pohranjuje u specijaliziranim spremnicima pri niskim temperaturama i tlakovima. Ova tehnologija je pogodna za manji kapacitet zrakoplova i kratke do srednje rute, kao i za komercijalne i regionalne letove. Zrakoplovi s vodikovim gorivnim člancima imaju prednost

niskih emisija (samo vodena para), dok izravno sagorijevanje vodika može proizvoditi NO_x. Također zrakoplovi s gorivnim člancima koriste električne motore, što može omogućiti tiši rad i bolju učinkovitost, dok zrakoplovi s izravnim sagorijevanjem vodika koriste konvencionalnije motore.

Obje vrste pogona zahtijevaju specijalizirane spremnike za vodik, ali zahtjevi za održavanje i infrastrukturu mogu se razlikovati ovisno o vrsti pogona.

Za potrebe ovog rada pobliže su proučeni “koncepti” zrakoplova s pogonom na vodik kompanije Airbus. Airbus ZEROe predstavlja projekt kompanije Airbus koji istražuje mogućnost korištenja vodika kao goriva.

Četiri Airbusova "koncepta" zrakoplova s nula emisija - poznati kao ZEROe – predstavljani su 2020. Godine. Tri su koristila izgaranje vodika i hibridne motore za pogon, dok je četvrti bio potpuno električan, koristeći vodikove gorivne članke i sustav pogona s propelerom.

Tri koja koriste izgaranje vodika i hibridne motore za pogon pokreću modificirani plinskoturbinski motori koji sagorijevaju tekući vodik kao gorivo. Istodobno, oni također koriste vodikove gorivne stanice za stvaranje električne energije koja nadopunjuje plinsku turbinu, što rezultira visoko učinkovitim hibridno-električnim pogonskim sustavom (Energetika-net.com, 2020.). Većinom koriste vodik u gorivnim člancima za proizvodnju električne energije s minimalnim emisijama, poput vodene pare.

Zajedničko svim konceptima je da imaju različit dizajn koji uključuje napredne aerodinamičke oblike i tehnologije za poboljšanje učinkovitosti i smanjenje potrošnje goriva.

1. "Turbofan" koncept

- Ovaj koncept koristi turbofan motore s vodikom kao gorivom. Zrakoplov je dizajniran da pruži performanse slične današnjim komercijalnim zrakoplovima, ali s nultim emisijama.
- Kapacitet mu je otprilike za 100 putnika.
- Predviđa se da će imati domet sličan današnjim regionalnim zrakoplovima, omogućujući letove na srednjim udaljenostima.
- Vodik se pohranjuje u tekućem stanju u spremnicima smještenim ispod trupa.

2. "Blended Wing Body (BWB)" koncept

- Ovaj zrakoplov koristi inovativni dizajn "pomiješanog krila i trupa" koji poboljšava aerodinamiku i učinkovitost. Vodik se koristi u gorivnim člancima.
- Kapacitet mu je otprilike za 200 putnika.
- Namijenjen je za duže letove u odnosu na turbofan model.
- Dizajn omogućuje bolju integraciju vodikovih spremnika i optimizaciju aerodinamike za poboljšanje učinkovitosti.

3. "Turboprop" koncept

- Ovaj zrakoplov koristi turboprop motore i vodik kao gorivo, namijenjen za kraće i regionalne letove.
- Kapacitet mu je otprilike za 50-70 putnika.
- Pruža opciju za kratke do srednje udaljenosti.
- Turboprop motori omogućuju učinkovitije korištenje vodika na kraćim udaljenostima, idealno za regionalni zračni promet.

4. "Fully electrical" koncept

- Koncept upotpunosti električne verzije zrakoplova je najavljen u prosincu 2020. godine.
- Temelji se na potpuno električnom pogonskom sustavu koji se napaja gorivnim člancima.

Airbus postiže niz tehnoloških i testnih prekretnica dok se kreće prema svojoj ambiciji da do 2035. godine na tržište donese komercijalni zrakoplov na vodik.

Prvi ZEROe motor na gorivne članke uspješno se pokrenuo.

Ovi gorivni članci rade tako da pretvaraju vodik u električnu energiju kroz kemijsku reakciju. Nusproizvod reakcije je voda (H_2O), što rezultira gotovo nultim emisijama.

Uz ogroman potencijal vodikovih gorivnih članaka za dekarbonizaciju zrakoplovstva oduvijek je postojala prepreka. Iako su vodikovi gorivni članci već postojali na tržištu kada je projekt započeo, nijedan od njih nije pružao dovoljnu energiju za napajanje zrakoplova dok je

ostajao unutar prihvatljive razine težine. Stoga je u listopadu 2020. godine Airbus osnovao Aerostack, zajedničko ulaganje s ElringKlungerom, kako bi razvili vodikove gorivne članke koji bi činili srce električnog pogonskog sustava na zrakoplovu ZEROe. (Airbus, 2024)

U lipnju 2023. godine, Airbus je objavio uspješno provedenu testnu kampanju sustava vodikovih gorivnih članaka, koji je dostigao svoju punu snagu od 1,2 megavata. Bio je to najmoćniji test gorivnog članka ikad izveden u zrakoplovstvu za velike zrakoplove, i postavio je temelje za sljedeći veliki korak u projektu: integraciju cijelog pogonskog sustava s električnim motorom (Airbus, 2024).

Krajem 2023. godine nakon uspješno provedenih testiranja sustava gorivnih članaka s snagom od 1,2 megavata u lipnju i pogonskog sklopa s 1 megavatom u listopadu, električni motori 'iron pod' prvi su put pokrenuti s vodikovim gorivnim člancima. Ta arhitektura i principi dizajna sustava isti kao oni koje ćemo vidjeti u konačnom dizajnu te je to bio ključan je korak prema cilju da do 2035. godine zrakoplov na vodik bude u zraku. (Airbus, 2024)

Nakon što se testiranje završi, sljedeći korak za ZEROe tim bit će optimizacija veličine, mase i specifikacija pogonskog sustava kako bi se zadovoljile letne specifikacije. Specifikacije uključuju reakcije sustava na vibracije, vlagu, nadmorsku visinu i druge faktore. (Airbus, 2024)

Nakon što se ove optimizacije i testiranja završe, sustav pogona na gorivne članke bit će instaliran na ZEROe multimodalnu platformu za testiranje leta – prvi A380 koji je Airbus ikada proizveo, MSN001. Nakon toga slijedit će ispitivanje sustava na tlu prije ključne faze testiranja u letu na A380, trenutno planirane za 2026. godinu. (Airbus, 2024)

5 PROCJENA POTREBNOG VODIKA U SLUČAJU PRIJELAZA NA VODIKOVU TEHNOLOGIJU

Za procjenu potrebnog vodika (kg H₂ po putniku, po kilometru leta), naravno, nije moguće krenuti od tehničkih proračuna potrošnje, te se na temelju svega opisanog ranije koristi pristup odozgo prema dolje (engl. *top-down approach*):

- Za zrakoplov koji koristi vodik u gorivnim člancima, energetske potrebe iznose otprilike 0,1 kg vodika za 1 MJ energije.
- Prosječna potrošnja energije za komercijalne zrakoplove oko 1-2 MJ / 100 km po putniku (ovisno o vrsti zrakoplova i letnim uvjetima).
- Ako zrakoplov zahtijeva 1,5 MJ po putniku za 100 km, onda bi za tu energiju bilo potrebno približno 0,15 kg vodika po putniku na 100 km, tj. 1,5 g / km / putniku
- Raspon vrijednosti od procijenjene iznad može se kretati od 1 do 3 g / km /putniku

Prema već reportiranom broju kilometara domaćih letova (Croatia Airlines) od 1 691 280 km / god. i raspon broja putnika 70 do 156, i uz pretpostavku da se broj tih letova neće bitno mijenjati, postavili smo granice analize (Tablica 5-1).

Tablica 5-1. Raspon vrijednosti o putovanjima u domaćim letovima

	min	med	max
broj putnika	70	113	155
prijeđeno km/god	1 300 000	1 691 280	2 000 000
potrošnja vodika, g/km/putnik	1	1,5	3

Kao što je, također, već napisano u zrakoplovima namijenjenim za domaće letove mogući broj putnika varira od 70 do 156. Uzet ćemo prosjek od 113 mogućih putnika po letu.

Primjer procjene s medijan vrijednostima ($m_{H_2} = 1,5 \text{ g/km} \cdot 1\,691\,280 \text{ km} \cdot 113 \text{ putnika}$) rezultira s potrebnom masom vodika za domaće letove Croatia Airlines-a $m_{H_2} = 286\,671\,960 \text{ g} = 286.7 \text{ t}$.

Sukladno EU strategiji za vodik, cijena vodika koji je proizveden iz fosilnih goriva je trenutno oko 1,5 EUR po kilogramu ne uzimajući u obzir cijenu otpuštenog CO₂ u atmosferu (ova cijena ovisi o cijeni prirodnog plina te je podložna promjenama). Ako uz proizvodnju vodika omogućimo i hvatanje otpuštenog CO₂, onda je ta cijena oko 2 EUR po kilogramu. Cijena proizvodnje obnovljivog vodika, odnosno proizvodnje vodika elektrolizom vode korištenjem električne energije iz OIE trenutno je oko 2,5 – 5,5 EUR po kilogramu. Ako se ostvare predviđanja na tržištu i cijene električne energije proizvedene iz OIE padnu u idućem periodu zajedno s cijenama elektrolizatora, omogućavajući profitabilnost proizvodnje obnovljivog vodika, procjenjuje se da će do 2030. godine obnovljivi vodik cjenovno biti konkurentan vodik proizvedenome iz fosilnih goriva (iako se na razini EU-a najavljuje konsenzus postizanja cijene obnovljivog vodika od 1,5 do 3 EUR po kilogramu). (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2022)

Ako uzmemo trenutnu prosječnu cijenu zelenog vodika od 4 EUR po kg, potrebnih 286 671,96 kg, dobijemo da Croatia Airlines u ovom trenutku, za domaće letove s pogonom na vodik, trebala izdvojiti 1 146 687,84 EUR samo na vodik.

Sada je moguće to usporediti s 33 825 600 EUR kojih Croatia Airlines trenutno otprilike troši za gorivo za domaće letove.

Trenutno je vodik skuplji od mlaznog goriva kada se uzmu u obzir svi troškovi prenamijene infrastrukture koji je također znatan. No, smanjenje troškova obnovljive električne energije i povećanje svjetske proizvodnje vodika povećat će konkurentnost vodika u odnosu na mlazno gorivo pa čak i održiva zrakoplovna goriva. (Ivoš, 2022)

Da bi se uspostavila zrakoplovna industrija u RH zasnovana na vodik, a i cjelokupno gospodarstvo, uz proizvodnju potrebnih količina vodika potrebno je osigurati i elemente distribucije i potrošnje te skladištenja vodika, sa svrhom omogućavanja sustavnog i stabilnog korištenja vodika.

5.1 Potrebe i mogućnosti za podzemnim skladišnim prostorom za sigurnu opskrbu vodika

Proizvedeni vodik potrebno je i skladištiti kako bi se mogao koristiti kada je to potrebno. Skladištenje vodika može biti u plinovitom obliku no dugoročno je predviđeno skladištenje u tekućem obliku. Uz izgradnju novih spremnika mogu se prenamijeniti i postojeća podzemna skladišta za plin. Spremnike je moguće povezati mrežom cjevovoda te je moguće uspostaviti i mrežu punionica vodika kako bi isti mogao biti dostupan korisnicima u svakom trenutku (Hrvatski sabor, 2022).

Najveći izazov s kojim se susreće zrakoplovna industrija su infrastrukturna rješenja koja su potrebna da bi zračne luke bile u mogućnosti prihvatiti zrakoplov na vodik. Odnosno gdje će se vodik proizvoditi, kako ga transportirati i koje je rješenje za skladištenje velikih količina vodika na aerodromima. Postoji više različitih rješenja od transporta vodika postojećim cjevovodima, prijevoza kamionima do proizvodnje vodika na licu mjesta odnosno u zračnim lukama.

Ovisno o veličini zračne luke, njezinoj lokaciji i geografskom položaju te količini vodika koji joj je potreban, postoje tri moguća načina proizvodnje i dopreme vodika do zračne luke:

- Opcija 1: vodik koji se proizvodi i ukapljuje izvan mjesta i dostavlja cestovnim putem, odnosno u cisternama
- Opcija 2: vodik koji se proizvodi izvan mjesta, isporučuje se zračnoj luci plinovodom i ukapljuje se na zračnoj luci
- Opcija 3: vodik koji se proizvodi i ukapljuje na zračnoj luci. (Postma-Kurlanc et al., 2022)

U svakoj od ovih opcija zračne luke moraju imati spremnike velike zapremne moći gdje bi se skladištio dopremljeni/proizvedeni vodik.

Skladištenje vodika nailazi na nekoliko izazova koje je potrebno svladati. Vodik je izuzetno zapaljiv plin, a mješavina vodika i zraka može biti eksplozivna u širokom rasponu koncentracija (od 4 % do 75 % vodika u zraku). Njegov plamen je gotovo nevidljiv, što ga čini dodatno opasnim jer se teško primijeti u slučaju curenja. Zbog toga je potrebno osigurati stroge sigurnosne mjere kako bi se spriječilo curenje i eksplozije (specijalizirani materijali, senzori za detekciju curenja, ventilacijski sustavi, protupožarne mjere). Vodik ima i jako malu gustoću, što

znači da zauzima puno prostora čak i kada je komprimiran na visokim tlakovima ili se ohladi do tekućeg stanja.

Dakle vodik se može skladištiti na više načina. Nama su posebno zanimljivi:

1. Skladištenje u tekućem stanju (kriogeno skladištenje)

- Vodik se hladi na vrlo niske temperature (-253°C) kako bi prešao u tekuće stanje. Tako se postiže veća gustoća energije po volumenu.
- Omogućuje skladištenje većih količina vodika u manjem prostoru.
- u kapljevitom stanju, problemi tlačne čvrstoće su minimalni, tako da je trenutno najveći kriogeni spremnik promjera 25 m (Cryogenic Society of America, 2022), što, s obzirom da je sferičnog oblika daje obujam od 8180 m^3 .

2. Skladištenje pod visokim tlakom

- Vodik se komprimira i skladišti u posebnim visokotlačnim spremnicima. Najčešće se koristi tlak od 350 do 700 bara.
- Da bi se spriječilo isparavanje potrebno je koristiti izolaciju visokih performansi

3. Skladištenje u podzemnim spremnicima

- Vodik se skladišti u prirodnim geološkim formacijama, poput solnih doma, slanih akvifera ili iscrpljenih plinskih i naftnih polja.

Za spomenutu analizu, potrebno je odrediti gustoće vodika pri uvjetima od interesa (Tablica 5-2), kako bi se odredili potrebni obujmi spremnika za skladištenje 286,7 t vodika.

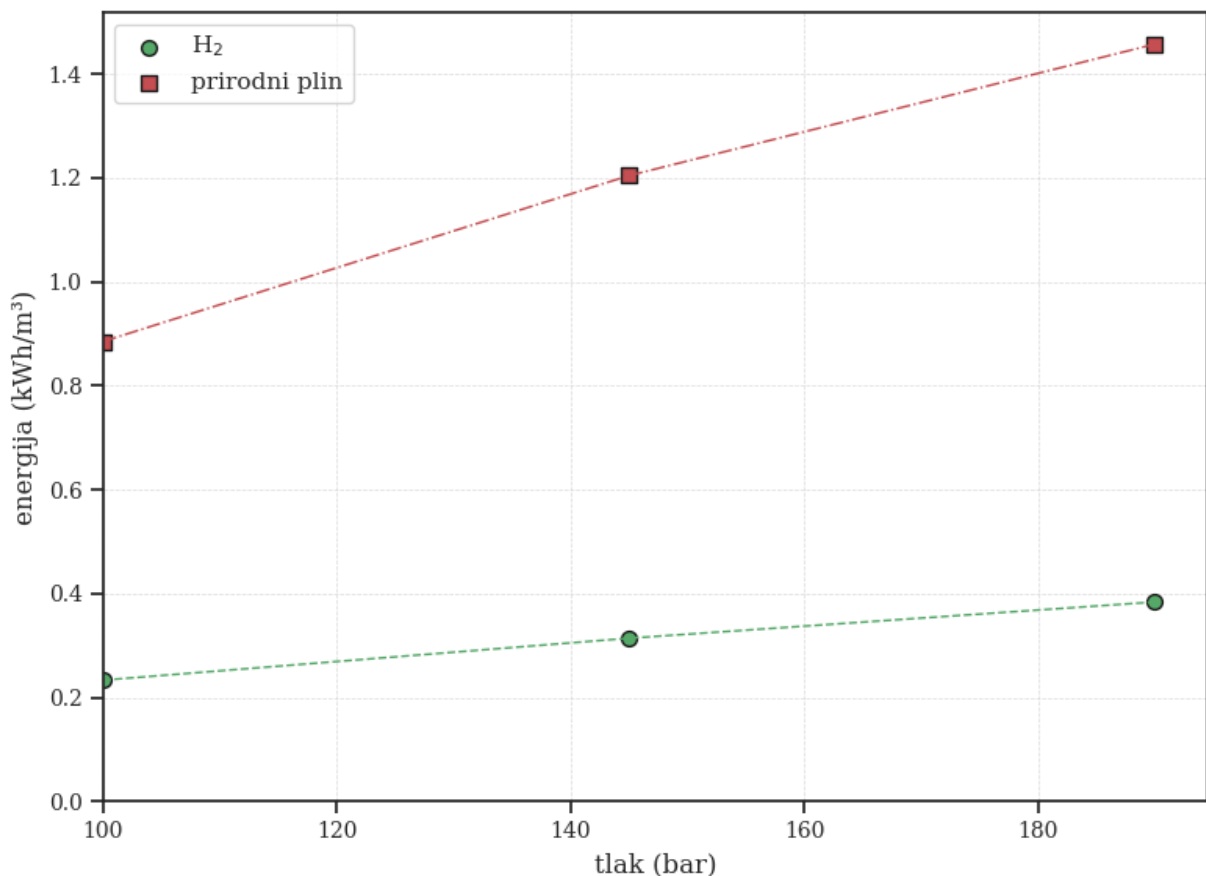
Tablica 5-2. Potrebni obujam spremnika za cjelogodišnju potrošnju vodika u zračnoj luci.

	t, °C	p, bar	ρ_{H_2}, kg/m³	potreban obujam, m³	d_{max}, m
Spremnik stlačenog plina	20	350	23,65	12 122,6	8,5
Spremnik stlačenog plina	20	700	39,69	7223,5	2,4
Ukapljeni vodik	-253	1	70,85	4046,58	25

Uz pretpostavljene maksimalne promjere spremnika stlačenog plina, koji su valjkastog oblika, jednostavno je izračunati da jedan spremnik duljine 30 m, pri 350 bar zauzima 1700 m^3 odnosno njegov $V_{\text{max}} = 1700 \text{ m}^3$. Pri 700 bar, obujam najvećeg spremnika je $V_{\text{max}} = 135,7 \text{ m}^3$. U slučaju ukapljenog vodika spremnik je sferičan iz čega dobivamo $V_{\text{max}} = 8180 \text{ m}^3$.

Prema svemu navedenom, što je u skladu s literaturom, najizgledniji scenarij skladištenja vodika u zračnim lukama jest u ukapljenom obliku, uzevši u obzir i potencijalni broj potrebnih spremnika za svaki od ova tri slučaja (ukapljeni vodik-potrebno 0.5 spremnika za skladištenje 286,7 t vodika).

Kako bi se zorno usporedilo mogućnost skladištenja u iscrpljeno plinsko polje, uzet je kapacitet skladištenja poput onog na skladištu Okoli, uz pretpostavljeni radni volumen $Wv = 438 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ i maksimalni tlak oko 190 bar (Slika 5-1). Ove vrijednosti su uzete okvirno, da budu povezive s realnim, mogućim slučajem. Pri 190 bar (i očekivanoj slojnoj temperaturi), u sloju je gustoća vodika $\rho_{H_2} = 11,24 \text{ kg/m}^3$. Sadržaj pohranjive energije je 3,8 puta manji nego u slučaju prirodnog plina (metana).



Slika 5-1. Sadržaj energije vodika

Jedinični omjer gustoće energije pri različitim tlakovima ne pokazuje izravno u kojem je odnosu ovaj skladišni kapacitet i kapacitet potrošnje vodika u domaćim letovima. Stoga je izračunat skladišni kapacitet vodika za zadani radni volumen postojećeg plinskog skladišta:

$$V_p = W_v \cdot B_g \quad (1)$$

Gdje su:

- V_p – potreban radni volumen za plin, m^3
- B_g – volumni faktor prirodnog plina (tj. metana), rm^3/sm^3
- W_v – radni volumen skladišta prirodnog plina (sm^3)

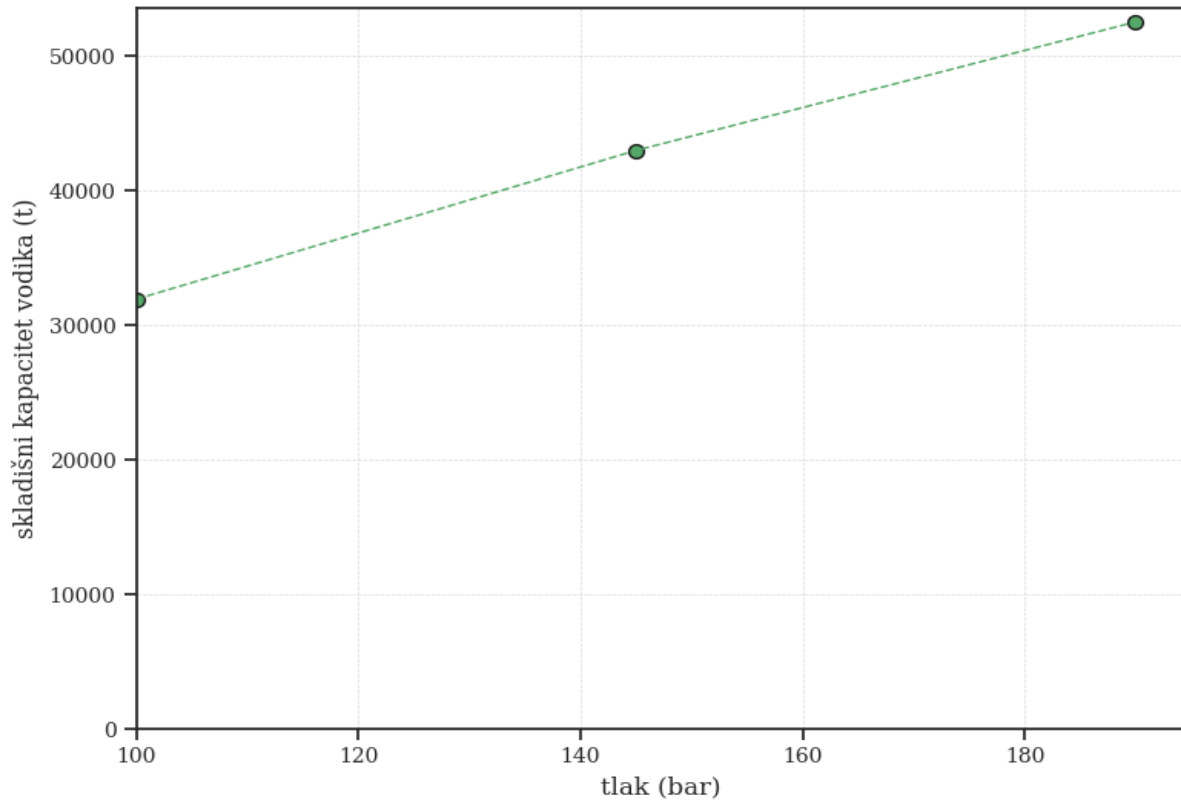
Tada je skladišni kapacitet vodika

$$m_{H_2} = V_p \cdot \rho_{H_2} \quad (2)$$

Pri čemu je:

m_{H_2} - maseni skladišni kapacitet vodika i ρ_{H_2} gustoća vodika pri svakom promatranom tlaku skladištenja.

Maseni kapacitet skladištenja vodika (52 565 t, Slika 2-1, Tablica 5-3) je daleko veći od onog potrebnog za avio-promet (domaći letovi, 286,7 t).



Slika 5-2. Skladišni kapacitet vodika, prema masenom balansu iz radnog volumena PSP Okoli

Tablica 5-3. Skladišni kapacitet vodika, prema masenom balansu iz radnog volumena PSP Okoli

p, bar	T, °C	ρ_{H_2}, kg/m³	E, GJ/m³	skladišteno, t
100	55,0	6,996163	0,000839	31 954,2
145	73,0	9,416605	0,001130	43 009,3
190	91,0	11,508726	0,001381	52 564,8

6 ZAKLJUČAK

Analiza provedena u radu pokazuje da bi potpuni prijelaz na vodik za domaće letove u Hrvatskoj zahtijevao proizvodnju i skladištenje značajnih količina vodika, točnije 286 672 kg godišnje. Potrebno je istražiti ekonomičnost izrade velikih nadzemnih rezervoara za vodik, te usporediti s ekonomikom skladištenja u podzemlju.

Podzemno skladištenje vodika ističe se kao ključna strategija za stabilizaciju opskrbe, omogućavajući bolje upravljanje fluktuacijama u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora. S obzirom na trenutne kapacitete i infrastrukturu, postoji potencijal za korištenje postojećih podzemnih skladišta plina koje se mogu prenamijeniti za potrebe skladištenja vodika. Također, s obzirom na predviđeni pad cijena vodika uslijed napretka u tehnologijama elektrolize i obnovljive energije, očekuje se da će cijena vodika postati konkurentnija do 2030. godine, što bi moglo poboljšati ekonomsku sliku upotrebe vodika.

Uzimajući u obzir sve izloženo, Hrvatska ima priliku iskoristiti svoje bogatstvo obnovljivih izvora energije te geostrateški položaj za razvoj domaće proizvodnje vodika. Kroz strateško investiranje i razvoj tehnologija, Hrvatska bi mogla ne samo zadovoljiti domaće potrebe za zelenim vodikom, već i pozicionirati se kao izvoznik u regiji. Međutim, ključno je nastaviti s istraživanjima i razvojem kako bi se optimizirali procesi proizvodnje i smanjili troškovi, čime bi se postigla veća isplativost vodika kao alternativnog goriva za zračni promet.

7 POPIS LITERATURE

1. BAZIJANAC, E., & DOMITROVIĆ, A. (2017). *Emisije zrakoplovnih motora*. Autorizirana predavanja i dodaci, Fakultet prometnih znanosti
2. DINCER, I., & ACAR, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications. *International Journal of Sustainable Aviation*, 2(1), 74-100.
3. European Commission. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions
4. GONG, A., & VERSTRAETE, D. (2017). Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. *International journal of hydrogen energy*, 42(33), 21311-21333. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.148.
5. HOELZEN, J., SILBERHORN, D., ZILL, T., BENSMANN, B., & HANKE-RAUSCHENBACH, R. (2022). Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure—Review and research gaps. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(5), 3108-3130.
6. PEREIRA, S. R., FONTES, T., & COELHO, M. C. (2014). Can hydrogen or natural gas be alternatives for aviation?—A life cycle assessment. *international journal of hydrogen energy*, 39(25), 13266-13275.
7. RONDINELLI, S., GARDI, A., KAPOOR, R., & SABATINI, R. (2017). Benefits and challenges of liquid hydrogen fuels in commercial aviation. *International Journal of Sustainable Aviation*, 3(3), 200-216.

Web izvori

8. Australia's Chief Scientist (2020). 145 years after Jules Verne dreamed of a hydrogen future, it has arrived. URL: <https://www.chiefscientist.gov.au/news-and-media/145-years-after-jules-verne-dreamed-hydrogen-future-it-has-arrived> [Pristupljeno: 16. rujna 2024.]
9. Airbus. (2024). First ZeroE engine fuel cell successfully powers on. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-01-first-zeroe-engine-fuel-cell-successfully-powers-on> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
10. Airbus A320-200 vs Airbus A340-200 Comparison. (2024). URL: <https://www.webflite.com/compare/airliners/a320-200/a340-200> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
11. Boeing (2022). Commercial Market Outlook 2022 Report. URL: https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/market/assets/downloads/CMO_2022_Report_FINAL_v02.pdf [Pristupljeno: 16. rujna 2024.]
12. BRUNEL (2021) What are the 3 Main Types of Hydrogen? URL: <https://www.brunel.net/en/blog/renewable-energy/3-main-types-of-hydrogen?msclkid=f96cd90ccf9211ec88262eaf20454d3d>, <https://doi.org/10.2118/0521-0032-JPT> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
13. BERMUDEZ, M., et al. (2021). Hydrogen. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
14. Cryogenic Society of America. (2022). World's largest liquid hydrogen tank nears completion. URL: https://www.cryogenicsociety.org/index.php?option=com_dailyplanetblog&view=entry&year=2022&month=05&day=05&id=48:world-s-largest-liquid-hydrogen-tank-nears-completion [Pristupljeno: 16. rujna 2024.]
15. CSIROscope (2021) Green, blue, brown: the colours of hydrogen explained URL: <https://blog.csiro.au/green-blue-brown-hydrogen-explained/> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]

16. Cryogenic Society of America, Inc. World's Largest Liquid Hydrogen Tank Nears Completion.
URL:https://www.cryogenicsociety.org/index.php?option=com_dailyplanetblog&view=entry&year=2022&month=05&day=05&id=48:world-s-largest-liquid-hydrogen-tank-nears-completion [Pristupljeno: 3. rujna 2024.]
17. Clean Hydrogen Joint Undertaking. (2021).
URL: <https://op.europa.eu/publication-detail/-/publication/2a3cec96-f68d-11ec-b976-01aa75ed71a1> [Pristupljeno: 2. rujna 2024.]
18. Croatia Airlines. (2024.). Fleet A220.
URL:<https://www.croatiaairlines.com/fleet/a220> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
19. European Commission. (2022). Vodik kao pokretač zelenog oporavka EU-a.
URL:https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe/recovery-coronavirus-success-stories/environment-and-climate/hydrogen-drive-eus-green-recovery_hr
[Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
20. Economides, C. E., & Hatzignatiou, D. G. (2021). Blue hydrogen economy - A new look at an old idea. Society of Petroleum Engineers.
URL: <https://doi.org/10.2118/206282-MS> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
21. Energetika-net (2021) Vodik je danas 'in'
URL:<http://www.energetika-net.com/specijali/projekt-prica/vodik-je-danas-in-32133>
[Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
22. Earth justice (2021) Reclaiming Hydrogen for a Renewable Future: Distinguishing Fossil Fuel Industry Spin from Zero Emission Solutions
URL:<https://earthjustice.org/features/green-hydrogen-renewable-zero-emission>
[Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
23. European Commission. (2024.). Reducing emissions from aviation.
URL:https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-aviation_en
[Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
24. Eurocontrol. (2019). European Aviation Environmental Report 2019.
URL:<https://www.eurocontrol.int/publication/european-aviation-environmental-report-2019> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]

25. Energetika-net.com. (2020). Airbus razvija tri koncepta zrakoplova s pogonom na vodik.
URL:<https://www.energetika-net.com/odrzivi-promet/airbus-razvija-tri-koncepta-zrakoplova-s-pogonom-na-vodik-31407> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
26. Energy education (2021) Types of hydrogen fuel
URL:https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_hydrogen_fuel [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
27. European Commission. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions.
URL:<https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
28. H2 international (2020) Turquoise hydrogen: A game changer?
URL:<https://www.h2-international.com/2020/05/15/turquoise-hydrogen-a-game-changer/> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
29. Hrvatski sabor. (2022). Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine. Narodne Novine.
URL: https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_03_40_492.html [Pristupljeno: 2. rujna 2024.]
30. Hrvatski sabor. (2022). Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine.
URL:<https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/Strategije,%20planovi%20i%20programi/Novi%20direktorij/ZA%20WEB%20Hrvatska%20strategija%20za%20vodik%20do%202050.%20godine.pdf> [Pristupljeno: 15. rujna 2024.]
31. IPCC. (2019). Aviation and the global atmosphere; What are the current and future impacts of subsonic aviation on radiative forcing and UV radiation?
URL: <http://www.grida.no/climate/ipcc/aviation/006.htm#spmfig2a> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
32. IVOŠ, P. (2022). Infrastrukturni zahtjevi za implementaciju vodika kao alternativnog goriva na zračnim lukama.
URL:<https://repositorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz:2735> [Pristupljeno: 4. rujna 2024.]
33. Jet-A1 Fuel. (2024). Jet A-1 Price on Fuel, Croatia.
URL: <https://jet-a1-fuel.com/price/croatia-hrvatska> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]

34. Lufthansa Group. (2023). Boeing 787-9.
URL: <https://www.lufthansagroup.com/en/themes/boeing-787-9.html> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
35. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. (2022). Usvojen nacrt prijedloga Hrvatske strategije za vodik do 2050.
URL: <https://mingo.gov.hr/vijesti/usvojen-nacrt-prijedloga-hrvatske-strategije-za-vodik-do-2050/8668> [Pristupljeno: 16. rujna 2024.]
36. Medium (2021) Should Blue Hydrogen Be Part of Our Green plans?
URL: <https://medium.com/climate-conscious/blue-hydrogen-and-ccus-828fa20feae8>
[Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
37. Naval Research Laboratory. (2013). NRL Review 2013.
URL: https://www.nrl.navy.mil/Portals/38/PDF%20Files/2013_NRL_Review.pdf?ver=6XlcPTLWyD3ejXpyyjsDJA%3d%3d×tamp=1633469071878 [Pristupljeno: 16. rujna 2024.]
38. Nationalgrid (2022) The hydrogen colour spectrum
URL: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>
[Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
39. Our World in Data. (2024). What share of global CO₂ emissions come from aviation?
URL: <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
40. OpenAirlines. (2018). How much fuel per passenger an aircraft is consuming?
URL: <https://blog.openairlines.com/how-much-fuel-per-passenger-an-aircraft-is-consuming> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
41. Petrofac (2022) The difference between green hydrogen and blue hydrogen
URL: <https://www.petrofac.com/media/stories-and-opinion/the-difference-between-green-hydrogen-and-blue-hydrogen/> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
42. POSTMA-KURLANC, A., LEADBETTER, H., & PICKARD, C. (2022). FlyZero - Hydrogen Infrastructure and Operations. Aerospace Technology Institute.
URL: <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-CST-POS-0035-Airports-Airlines-Airspace-Operations-and-Hydrogen-Infrastructure.pdf> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]

43. S&P Global (2021) Bill Gates-backed startup to build 'turquoise hydrogen' pilot by end of 2022
URL:<https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/bill-gates-backed-startup-to-build-turquoise-hydrogen-pilot-by-end-of-2022-65354106> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
44. ŠPOLJAR, R. (2019.). Sustav praćenja emisija stakleničkih plinova kod zračnog prijevoznika. URL: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:205918> [Pristupljeno: 17. rujna 2024.]
45. Zeleni obnovljivi izvori (2022) Zeleni vodik: što je to, karakteristike, upotreba i važnost, URL:<https://www.renovablesverdes.com/hr/hidrogeno-verde/> [Pristupljeno: 1. rujna 2024.]
46. Webflite. 2024. Airbus A320 URL: <https://www.webflite.com/>
URL: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:795410> [Pristupljeno: 2. rujna 2024.]

IZJAVA

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

A handwritten signature in black ink, reading "L. Ćurković", written over a horizontal line.

Laura Ćurković



KLASA: 602-01/24-01/163
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 11. 9. 2024.

Laura Ćurković, studentica

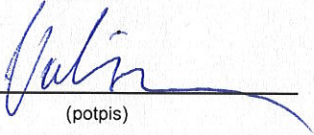
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/163, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 18.09.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

UBRZANJE PRIMJENE TEHNOLOGIJA VODIKA

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof. dr. sc. Domagoj Vulin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

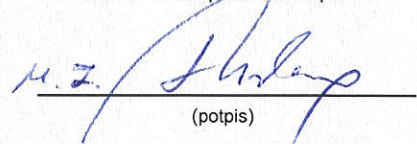


(potpis)

Prof. dr. sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

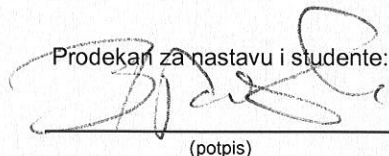


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)