

Primjena vodika kao goriva

Bjelajac, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:096897>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-01**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

MARKO BJELAJAC

**PRIMJENA VODIKA KAO GORIVA
DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**PRIMJENA VODIKA KAO GORIVA
APPLICATION OF HYDROGEN AS A FUEL
DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Urbani promet i okoliš

Mentor: izv. prof. dr. sc. Siniša Vilke

Student: Marko Bjelajac

Studijski program: Tehnologija i organizacija prometa

JMBAG: 0112070140

Rijeka, srpanj 2023.

Student: Marko Bjelajac

Studijski program: Tehnologija i organizacija prometa

JMBAG: 0112070140

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom Primjena vodika kao goriva izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Siniša Vilke.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezo s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Ime i prezime studenta

Marko Bjelajac

Student: Marko Bjelajac

Studijski program: Tehnologija i organizacija prometa

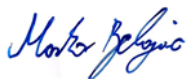
JMBAG: 0112070140

IZJAVA STUDENTA-AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student-autor



SAŽETAK

U ovom diplomskom radu objašnjeni su elementi koji se odnose na analizu i primjenu vodika kao goriva, obuhvaćajući metode proizvodnje, skladištenja, transporta, primjene, ekonomske održivosti i okvira politike. Udubljuje se u metode proizvodnje vodika, od parne reforme metana do biološke proizvodnje vodika, razjašnjavajući njihove prednosti i izazove. Metode skladištenja vodika, uključujući skladištenje stlačenog plina i kemijsko skladištenje vodika, analizirane su zbog njihove učinkovitosti i potencijala. Primjena vodika kao goriva secira se u kontekstima kao što su vozila s gorivim ćelijama, prijevoz teških tereta i ekonomska održivost. Naglašene su ekološke i ekonomske prednosti vodika, zajedno s njegovom globalnom konkurentnošću. Istražuje se međunarodna suradnja, harmonizacija standarda i okviri politike, ističući njihovu vitalnu ulogu u održivom gospodarenju vodikom kao gorivom.

Ključne riječi: ekološke i ekonomske prednosti vodika, metode proizvodnje, skladištenje vodika, transport vodika, vodik kao gorivo.

SUMMARY

In this thesis, elements related to the analysis and application of hydrogen as a fuel are explained, including methods of production, storage, transportation, application, economic viability and policy framework. It delves into hydrogen production methods, from methane steam reforming to biological hydrogen production, elucidating their advantages and challenges. Hydrogen storage methods, including compressed gas storage and chemical hydrogen storage, are analyzed for their effectiveness and potential. Applications of hydrogen as a fuel are dissected in contexts such as fuel cell vehicles, heavy-duty transportation, and economic sustainability. The environmental and economic advantages of hydrogen are emphasized, along with its global competitiveness. International cooperation, harmonization of policy framework standards are being explored, highlighting their vital role in shaping a sustainable hydrogen economy.

Keywords: environmental and economic advantages of hydrogen, production methods, hydrogen storage, hydrogen transport, hydrogen as fuel.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA	1
1.2. RADNA HIPOTEZA	2
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	2
1.4. ZNANSTVENE METODE	3
1.5. STRUKTURA RADA	3
2. METODE PROIZVODNJE VODIKA	4
2.1. REFORMIRANJE METANA	4
2.2. ELEKTROLIZA	5
2.3. PRETVORBA BIOMASE	7
2.4. TERMO-KEMIJSKI PROCESI	9
2.5. FOTO-ELEKTROKEMIJSKA PROIZVODNJA VODIKA	10
2.6. BIOLOŠKA PROIZVODNJA VODIKA	12
2.7. HIBRIDNE I NOVE METODE	15
3. SKLADIŠTENJE I TRANSPORT VODIKA	16
3.1. METODE SKLADIŠTENJA VODIKA	16
3.1.1. Skladištenje stlačenog vodika	16
3.1.2. Skladištenje tekućeg vodika	18
3.2. TRANSPORT VODIKA	19
3.2.1. Transport vodika brodom	20
3.2.1.1. Transport plinovitog vodika	21
3.2.1.2. Transport ukapljenog vodika	21
3.2.2. Transport vodika cjevovodom	22
3.2.3. Transport vodika prikolicama	23
4. PRAVNA REGULATIVA I MEĐUNARODNI SAVEZI	25
4.1. REGULATORNI OKVIRI	26
4.2. RAZVOJ POLITIKE I REGULATIVE ZELENOG VODIKA	28
4.3. POLITIČKE MJERE ZA POTPORU ZELENOJ INDUSTRIJI VODIKA	29
4.4. MEĐUNARODNI SAVEZI I SURADNJA	31
4.5. USKLAĐIVANJE STANDARDA I PROPISA	35
5. EKOLOŠKA I EKONOMSKA RAZMATRANJA PRIMJENE VODIKA	37
5.1. PREDNOSTI VODIKA ZA OKOLIŠ	37

5.2. EKONOMSKA ISPLATIVOST VODIKA	40
6. PRIMJENA VODIKA KAO GORIVA.....	43
6.1. TEHNOLOGIJA VOZILA S GORIVIM ĆELIJAMA.....	43
6.2. KAMIONI S VODIKOVIM GORIVIM ĆELIJAMA.....	46
6.3. AUTOBUSI NA VODIKOV POGON.....	48
6.4. VLAKOVI S VODIKOVIM GORIVIM ĆELIJAMA	51
6.5. POMORSKI PROMET	53
7. RAZVOJ I TENDENCIJE KORIŠTENJA VODIKA KAO GORIVA	55
8. ZAKLJUČAK.....	60
LITERATURA.....	61
KAZALO KRATICA	63
POPIS TABLICA	64
POPIS SHEMA	64

1. UVOD

U vremenu koje je definirano hitnošću rješavanja ekoloških izazova i preoblikovanja globalnih energetske izvora, vodik kao gorivo ima velik potencijal za poboljšanje i rješavanje trenutnih izazova. Dok zemlje traže čišće i održivije energetske alternative, svestranost vodika kao nositelja energije i rješenja dekarbonizaciji potiče pomnije ispitivanje njegove analize, primjene i implikacija.

Kroz detaljan pregled metoda proizvodnje vodika, u rasponu od parne reforme metana do novih puteva biovodika, postavljaju se temelji za razumijevanje različitih načina na koje se vodik može iskoristiti. Istraživanje skladištenja i transport vodika naglašava zamršen međuodnos između tehnologije i infrastrukture. Od skladišta komprimiranog plina do kemijskog skladištenja vodika, mehanizmi koji omogućuju učinkovito korištenje i distribuciju vodika dolaze u fokus. Ključna je uloga vodika u transportu, posebno u vozilima s gorivim ćelijama i teškim transportima. Objasnjavajući metode proizvodnje, skladištenja i korištenja vodika prikazuje se u kojoj mjeri vodik može preoblikovati budućnost mobilnosti. Isto tako značajan je utjecaj vodika na razvoj tehnologije primjene i njeno daljnje istraživanje. Važno je pojasniti povezanost ekoloških i ekonomskih razmatranja, predstavljajući holističku sliku prednosti i izazova svojstvenih prijelazu na gospodarstvo temeljeno na vodik. Kroz strateške politike, harmonizaciju standarda i vizionarske okvire, vodikov uspon dobiva zamah.

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Sve veća globalna potražnja za čistim i održivim energetske rješenjima za rješavanje ekoloških izazova i smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima dovela je do rastućeg interesa za vodik kao gorivo. Međutim, učinkovita integracija vodika u postojeće energetske sustave predstavlja višestruke izazove koji obuhvaćaju tehnološke, ekonomske, regulatorne i političke domene. Savladavanje ovih izazova zahtijeva sveobuhvatnu analizu proizvodnje vodika, skladištenja, transporta, primjene, ekonomske održivosti i okvira politike.

Predmet ovog istraživanja je analiziranje primjene vodika kao goriva, obuhvaćajući njegove različite aspekte i implikacije. Rad ima za cilj istražiti različite dimenzije, uključujući

različite metode proizvodnje vodika, tehnologije skladištenja i transporta, primjene u različitim sektorima, ekonomsku održivost i političke okvire potrebne za njegovu uspješnu primjenu.

Primarni cilj ovog istraživanja je sveobuhvatna analiza potencijala vodika kao goriva u doprinosu budućnosti održive energije. To uključuje istraživanje prednosti, izazova i izvedivosti različitih metoda proizvodnje vodika, procjenu učinkovitosti i prikladnosti tehnika skladištenja i transporta, istraživanje primjene vodika u različitim sektorima, procjenu njegove ekonomske održivosti u usporedbi s konvencionalnim gorivima i razjašnjenje regulatornih i političkih okvira potrebnih za podupiranje njegovog širokog usvajanja. Istraživanje ima za cilj pružiti cjelovito razumijevanje mogućnosti i prepreka povezanih s vodikom kao gorivom, što u konačnici pridonosi informiranom donošenju odluka i strateškom planiranju u inicijativama energetske tranzicije.

1.2. RADNA HIPOTEZA

Radna hipoteza ovog rada glasi da će holistička analiza vodika kao goriva, koja obuhvaća njegove proizvodne metode, rješenja za skladištenje i transport, primjene, ekonomsku održivost i okvire politike, otkriti će njegov potencijal kao prijenosnika energije sposobnog odgovoriti na izazove zaštite okoliša i poticanje održivih energetske sustava. Kroz temeljito istraživanje, očekuje se da će se svestranost vodika, povećanje učinkovitosti, prednosti za okoliš i usklađenost s međunarodnom suradnjom postaviti kao ključni pokretač u globalnoj tranziciji prema čistijem i otpornijem energetskom krajoliku. Ova hipoteza služi kao temelj za otkrivanje uvida koji mogu usmjeravati političke odluke, tehnološke inovacije i investicijske strategije prema ostvarenju punog potencijala vodika kao goriva u 21. stoljeću.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha i cilj ovog istraživanja je provesti sveobuhvatno istraživanje vodika kao goriva, ispitujući njegove različite dimenzije i implikacije. Istraživanje ima za cilj pružiti razumijevanje potencijala vodika kao nositelja čiste energije, baveći se izazovima i prilikama povezanim s njegovom proizvodnjom, skladištenjem, transportom, primjenom, ekonomskom održivošću i političkim okvirima. Analizirajući ove aspekte, istraživanje nastoji pridonijeti vrijednim uvidima koji informiraju donošenje strateških odluka, usmjeravaju tehnološki napredak i oblikuju okvire politike za uspješnu integraciju vodika u globalne energetske sustave.

1.4. ZNANSTVENE METODE

Prilikom istraživanja, korištene su u odgovarajućim kombinacijama sljedeće znanstvene metode: komparativna metoda, metoda analize i sinteze, metoda apstrakcije i konkretizacije, metoda specijalizacije i generalizacije, metoda kompilacije.

1.5. STRUKTURA RADA

Rezultati istraživanja predloženi su u nekoliko međusobno povezanih dijelova. U prvom dijelu, Uvodu, navedeni su problemi, predmet i objekt istraživanja, radna hipoteza i pomoćne hipoteze, svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metode i obrazložena je struktura rada. Drugi dio rada odnosi se na metode proizvodnje vodika. Ovo poglavlje pruža opsežan pregled različitih metoda proizvodnje vodika. Skladištenje i transport vodika naslov je trećeg dijela rada. Fokus ovog poglavlja je na rješenjima za skladištenje i transport vodika. Četvrti dio rada s naslovom pravna regulativna i međunarodni savezi, usredotočuje se na politiku i regulatorni okvir, ovo poglavlje predstavlja važnost okvira politike u oblikovanju usvajanja vodikovih tehnologija. Isto tako omogućava uvid u napredak međunarodne suradnje i savladavanje prostornih i drugih razlika vezanih za proizvodnju i korištenje vodika. Peti dio rada odnosi se na ekološka i ekonomska razmatranja, ovo poglavlje govori o ekološkim aspektima vodika kao goriva te ispituje njegovu ekonomsku održivost. U šestom poglavlju ispituje se praktična primjena vodika kao goriva. Predstavlja se koncept primjene vodika, a zatim posebno istražuju vozila s gorivim ćelijama na vodik i njihova tehnologija. Sedmi dio rada odnosi se na tendencije u budućem razvoju ugljika kao goriva, osvrćući se na prednosti, nedostatke, prilike i prijetnje korištenja vodika. U posljednjem dijelu, Zaključku, dana je sinteza rezultata istraživanja kojima je dokazivana postavljena radna hipoteza.

2. METODE PROIZVODNJE VODIKA

Prelazak na niskougljičnu i održivu energetska budućnost ima potencijal značajno potpomognut vodikom, fleksibilnim i čistim prijenosnikom energije. Stvorene su i istražene različite proizvodne tehnike za proizvodnju vodika iz različitih sirovina, svaka sa svojim prednostima i nedostacima.

2.1. REFORMIRANJE METANA

Reformiranje metana (eng. Metahne steam reforming- SMR) najčešća je metoda za proizvodnju vodika. Ova metoda uključuje reakciju metana (CH_4) i vodene pare (H_2O) za proizvodnju plinovitog vodika (H_2) i ugljičnog dioksida (CO_2). Reakcija se odvija povišenim temperaturama, obično u rasponu od 700°C do 1000°C , i endotermna je što znači da zahtijeva značajan unos topline.

Koraci procesa:

1. Reformiranje metana. U početnom koraku, metan (obično dobiven iz prirodnog plina) i para se miješaju i izlažu katalizatoru visoke temperature. Katalizator ubrzava reakciju između metana i pare, što rezultira stvaranjem vodika i ugljičnog dioksida.
2. Reakcija pomaka. U nekim slučajevima proizvedena plinska smjesa još uvijek sadrži tragove CO i neiskorištenog metana. Plin se tada podvrgava reakciji pomaka, pri čemu ugljični monoksid reagira s parom i proizvodi dodatni vodik i ugljični dioksid. Ovaj korak se naziva reakcija pomaka vodenog plina i povećava prinos vodika.
3. Hvatanje ugljika. U kontekstu zabrinutosti za okoliš i nastojanja da se smanje emisije stakleničkih plinova, hvatanje ugljičnog dioksida proizvedenog tijekom procesa reformiranja značajno je razmatranje. Istražuju se tehnologije za skupljanje i skladištenja ugljika (eng. Carbon capture and storage CCS).¹

Prednosti:

- Visoka stopa proizvodnje: SMR je sposoban proizvoditi vodik velikom brzinom što ga čini prikladnim za industrijske primjene koje zahtijevaju velike količine vodika, kao što je proizvodnja amonijaka i rafiniranje nafte.

¹ Alvera, M.: *The Hydrogen Revolution: A Blueprint for the Future of Clean Energy*, Hachette Book Group, New York, 2021, p. 18.

- Postojeća infrastruktura: SMR ima dobro uspostavljenu infrastrukturu zbog svoje povijesne upotrebe u petrokemijskoj industriji. Ova se infrastruktura može prenamijeniti za proizvodnju vodika.
- Isplativ: SMR se općenito smatra isplativim u usporedbi s nekim drugim metodama proizvodnje vodika, posebno kada su cijene prirodnog plina relativno niske.

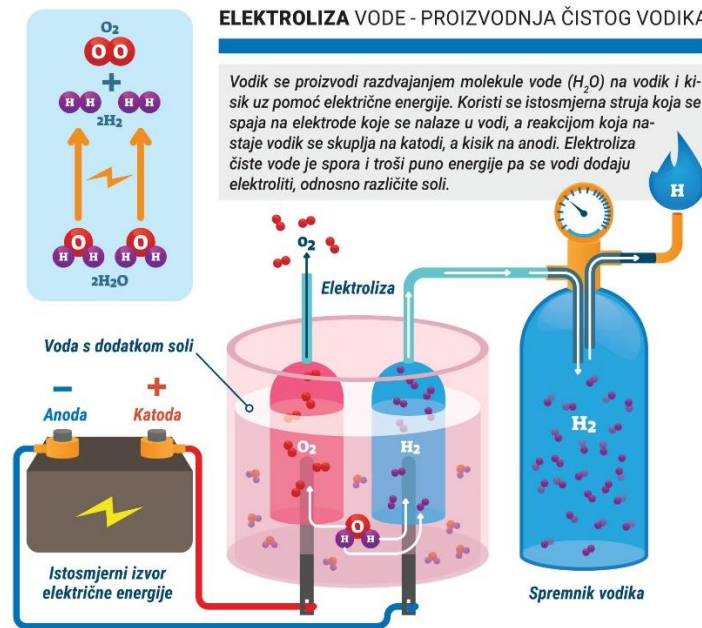
Izazovi koji se javljaju prilikom korištenja ove metode očituju se u povećanju emisije ugljika. Jedan od glavnih izazova povezanih sa SMR je proizvodnja ugljičnog dioksida kao nusprodukta. Kako se svijet kreće prema ugljičnoj neutralnosti, emisije iz SMR-a predstavljaju značajan problem. Prilikom upotrebe ove metode javlja se ovisnost o fosilnim gorivima, SMR se oslanja na fosilna goriva, uglavnom prirodni plin, kao sirovinu. Ova ovisnost postavlja izazove u pogledu održivosti i prelaska na obnovljive izvore energije. Isto tako implementacija učinkovitih tehnologija za hvatanje i iskorištavanje ugljika za ublažavanje emisija CO₂ iz SMR zahtijeva dodatna ulaganja i istraživanja.

Utjecaj SMR-a na okoliš glavna je tema rasprava, posebice u kontekstu klimatskih promjena. Kako bi ublažili emisije ugljika povezane sa SMR-om istraživači i industrija istražuju koncept „plavog vodika“, koji uključuje hvatanje i skladištenje ugljičnog dioksida koji se emitira tijekom procesa reformiranja. Ova tehnologija, u kombinaciji s elektrolizom na obnovljivi izvor energije, ima za cilj proizvodnju vodika s minimalnom ili čak nultom neto emisijom ugljika. Kako se svijet pomiče prema održivijim energetske rješenjima, budućnost SMR-a ovisi o njegovoj sposobnosti prilagodbe ekološkim propisima i tehnološkom napretku. Integracija tehnologija za skupljanje i iskorištavanje ugljika, kao i korištenje obnovljive energije u procesu reforme, oblikovati će budući smjer proizvodnje vodika temeljene na metodi SMR-a

2.2. ELEKTROLIZA

Elektroliza je kemijski proces koji koristi električnu struju za pokretanje nespontane reakcije. U kontekstu proizvodnje vodika, elektroliza vode uključuje razgradnju vode (H₂O) na njene sastavne elemente- vodik (H₂) i kisik (O₂)- pomoću električne energije kako je prikazano na slici 1. Elektroliza je svestrana metoda koja se može prilagoditi različitim razmjerima i izvorima energije.

Slika 1. Elektroliza vode-proizvodnja čistog vodika



Izvor: <https://www.zemobility.hr/4755/Vodik-je-nova-nafta> (20.08.2023.)

Koraci procesa:

1. Elektrolitski medij: Voda je primarni elektrolitski medij u ovom procesu. Čelije za elektrolizu sadrže dvije elektrode (anodu i katodu) uronjene u otopinu elektrolita.
2. Reakcija elektrolize: Kada istosmjerna električna struja prolazi kroz otopinu elektrolita, molekule vode se disociraju na ione vodika (H^+) na katodi i ione kisika (O_2^-) na anodi.
3. Odvajanje plina: Vodikovi ioni migriraju na katodu, gdje dobivaju elektrone i tvore plinoviti vodik, dok ioni kisika migriraju na anodu, gdje gube elektrone i tvore plinoviti kisik.
4. Skupljanje: Proizvedeni plinovi vodik i kisik skupljaju se, obično odvojeni membranom kako bi se spriječilo miješanje.

Za proizvodnju vodika koriste se različite tehnologije elektrolize; svaka sa svojim karakteristikama i primjenama:

- Alkalna elektroliza (AE): U AE se koristi otopina alkalnog elektrolita na bazi vode (često kalijev hidroksid). Koristi se desetljećima i poznat je po svojoj učinkovitosti pri većim gustoćama struje.
- Elektroliza s membranom za izmjenu protona (eng. Proton exchange membrane): PEM elektroliza koristi membranu koja vodi proton kao elektrolit. Radi na nižim

temperaturama i pritiscima od AE, što ga čini prikladnim za manje primjene i integraciju s obnovljivim izvorima energije.

- Elektroliza krutog oksida (eng. Solid oxide electrolysis): SOE radi na visokim temperaturama pomoću keramičkog elektrolita krutog oksida. Osobito je korisno kada su dostupni izgubljena energija ili obnovljivi izvori energije s fluktuirajućim učinkom.

Nekoliko je prednosti elektrolize kao metode proizvodnje vodika. Jedna od je integracija obnovljive energije, elektroliza se može pokretati izvorima energije poput sunca, vjetra i hidroenergije, omogućujući proizvodnju „zelenog vodika“ uz minimalne emisije ugljika. Druga prednost je decentralizirana proizvodnja. Elektroliza se može primijeniti u različitim razmjerima, od malih instalacija na licu mjesta do većih industrijskih sustava, što omogućuje decentraliziranu proizvodnju vodika.

Izazovi koje ova metoda donosi očituju se kroz energetska učinkovitost i trošak. Elektroliza zahtijeva značajan unos električne energije, a ukupna energetska učinkovitost procesa ovisi o čimbenicima kao što su gustoća struje, materijali elektrode i dizajn ćelije. Trošak sustava elektrolize, posebno PEM elektrolize, može biti relativno visok, što utječe na ekonomsku održivost velike proizvodnje vodika. Isto tako utjecaj elektrolize na okoliš uvelike ovisi o izvoru električne energije koji se koristi. Kada se napaja obnovljivom energijom, elektroliza može doprinijeti ugljično neutralnom energetskom krajoliku proizvodnjom vodika bez emisije ugljika.

Elektroliza je ključna tehnologija za proizvodnju zelenog vodika, usklađujući se s globalnim nastojanjem za čistim i održivim izvorima energije. Kako obnovljivi izvori energije postaju dostupniji i isplativiji, očekuje se da će elektroliza igrati ključnu ulogu u omogućavanju širokog usvajanja vodika kao nositelja energije.

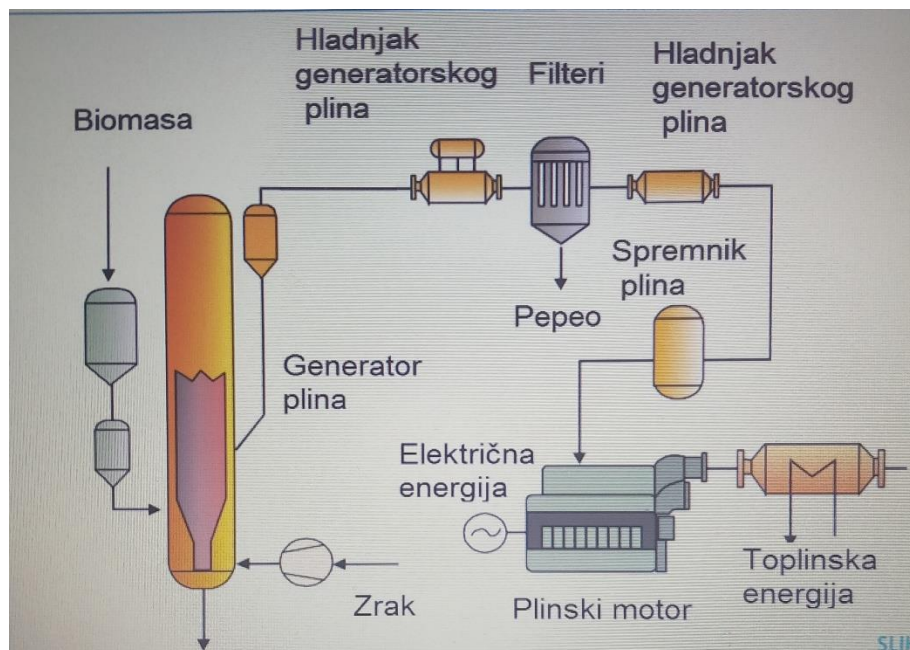
2.3. PRETVORBA BIOMASE

Pretvorba biomase obećavajući je put za proizvodnju vodika koji kapitalizira energetska sadržaj organskih materijala dobivenih iz živih ili nedavno živućih organizama. Ti se materijali mogu transformirati u plinove bogate vodikom kroz različite termo-kemijske procese, čineći

pretvorbu biomase obnovljivim i održivim izvorom vodika. Cijeli proces naziva se plinifikacija biomase.

Rasplinjavanje biomase je termokemijski proces koji uključuje zagrijavanje organskih materijala u okruženju s ograničenim kisikom kako bi se proizvela mješavina vodika, ugljičnog monoksida (CO), ugljičnog dioksida (CO₂) i drugih plinova u tragovima poznatim kao sintezni plin. Sirovine biomase uključuju poljoprivredne ostatke (kao što su ljuške kukuruza i rižine ljuške), šumske ostatke, namjenske energetske usjeve i organski otpad. Sastav sintetičkog plina ovisi o čimbenicima kao što su vrsta sirovine, temperatura i uvjeti rasplinjavanja. Vodik se može odvojiti od sintetičkog plina različitim metodama odvajanja, a proizvedeni vodik može se koristiti kao čisto gorivo.²

Slika 2. Shema sustava za rasplinjavanje s plinskim motorom



Izvor: Micro and small-scale CHP from biomass (<300 kWe) for distributed energy, OPET RES-e NNE5/37/2002 (20.08.2023.)

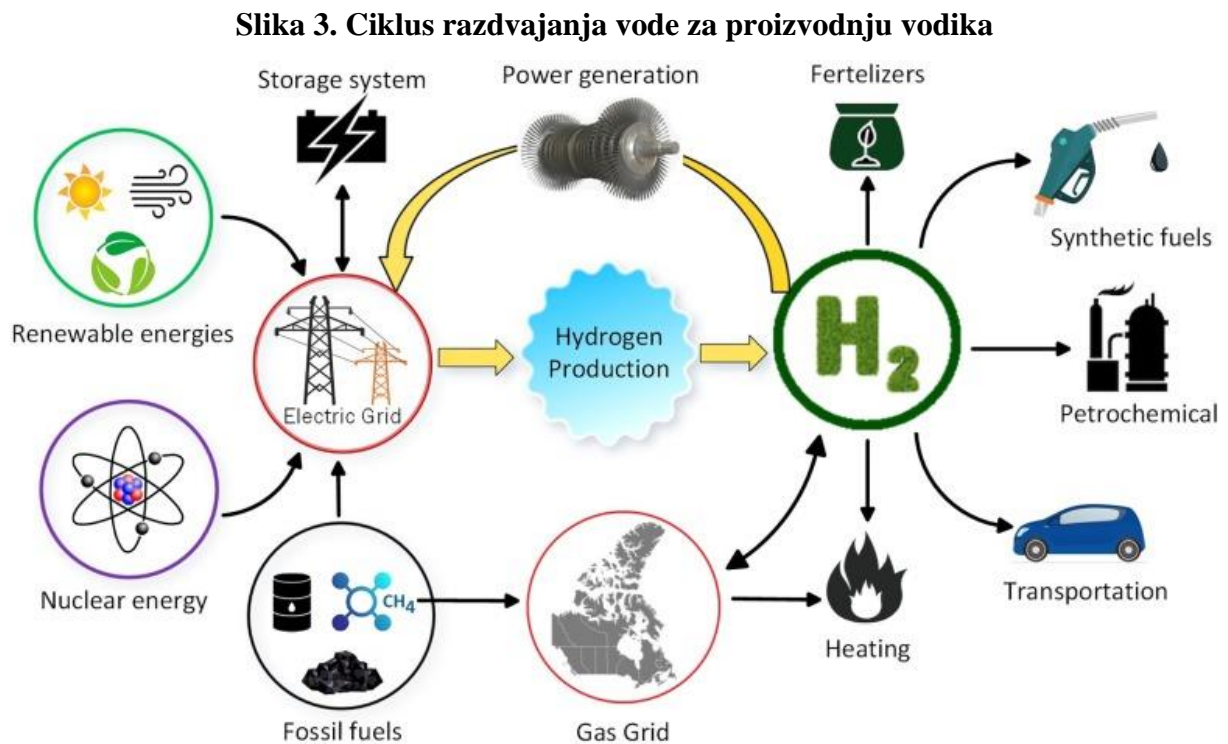
Piroliza biomase je proces koji uključuje zagrijavanje organskih materijala u odsutnosti kisika za proizvodnju bio-ulja, biougljena i plinova, uključujući vodik. Tijekom pirolize mogu se proizvesti plinovi bogati vodikom kao nusproizvod. Sadržaj vodika u tim plinovima ovisi o čimbenicima poput temperature i vremena zadržavanja. Proizvedeni plinovi bogati vodikom mogu se koristiti za proizvodnju energije ili dalje prerađivati kako bi se povećao prinos vodika.

² Lovrak, A.: *Tehnologija rasplinjavanja biomase*, 2020, p.74.

2.4. TERMO-KEMIJSKI PROCESI

Termo-kemijski procesi uključuju korištenje topline za induciranje kemijskih reakcija koje oslobađaju vodikov plin iz vode ili drugih sirovina. Ovi procesi obično zahtijevaju visoke temperature i mogu se prilagoditi za optimiziranje prinosa i učinkovitosti vodika.

Ciklusi razdvajanja vode su termo-kemijski procesi koji koriste niz kemijskih reakcija za razgradnju vode na plinove vodik i kisik. Jedan dobro poznati ciklus je ciklus sumpor-jod, koji uključuje reakciju sumporne kiseline sa jodnim spojevima za oslobađanje plinova vodika i kisika. Ciklusi razdvajanja vode obično rade na visokim temperaturama kako bi se olakšale reakcije razgradnje.



Izvor: A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production, Farid Safari, Ibrahim Dincer (21.08.2023.)

Ciklus na bazi metalnih oksida koristi materijale metalnog oksida koji prolaze kroz reakcije redukcije i oksidacije na visokim temperaturama. Ovi ciklusi uključuju proces u dva koraka, oksidaciju metalnog oksida parom za oslobađanje plinovitog kisika i redukciju metalnog oksida vodikom za regeneraciju izvornog oksida i proizvodnju plinovitog vodika.

Prednosti termokemijskih procesa:

- Visoka učinkovitost: Termokemijski procesi mogu postići visoke prinose vodika i učinkovitosti kada rade na optimalnim temperaturama i uvjetima.
- Odvojeno od električne energije: Termokemijski procesi često su odvojeni od izravnog unosa električne energije, što omogućuje fleksibilnost izvora topline, uključujući solarnu toplinsku energiju i izgublenu toplinu.³

Termokemijski procesi imaju potencijal za proizvodnju vodika sa smanjenom emisijom ugljika, posebno u kombinaciji s izvorima topline s niskim udjelom ugljika poput sunčeve energije. Međutim utjecaj ovih procesa na okoliš ovisi o čimbenicima kao što su izvor energije i korišteni materijali.

2.5. FOTO-ELEKTROKEMIJSKA PROIZVODNJA VODIKA

Foto-elektrokemijska proizvodnja vodika je proces koji koristi poluvodiče kao materijale za hvatanje sunčeve svjetlosti i poticanje cijepanja molekula vode u plinove vodika i kisika. Ova metoda nudi izravan i održiv put za pretvaranje sunčeve energije u kemijsku energiju pohranjenu u obliku vodika.

Proces stvaranja vodika:

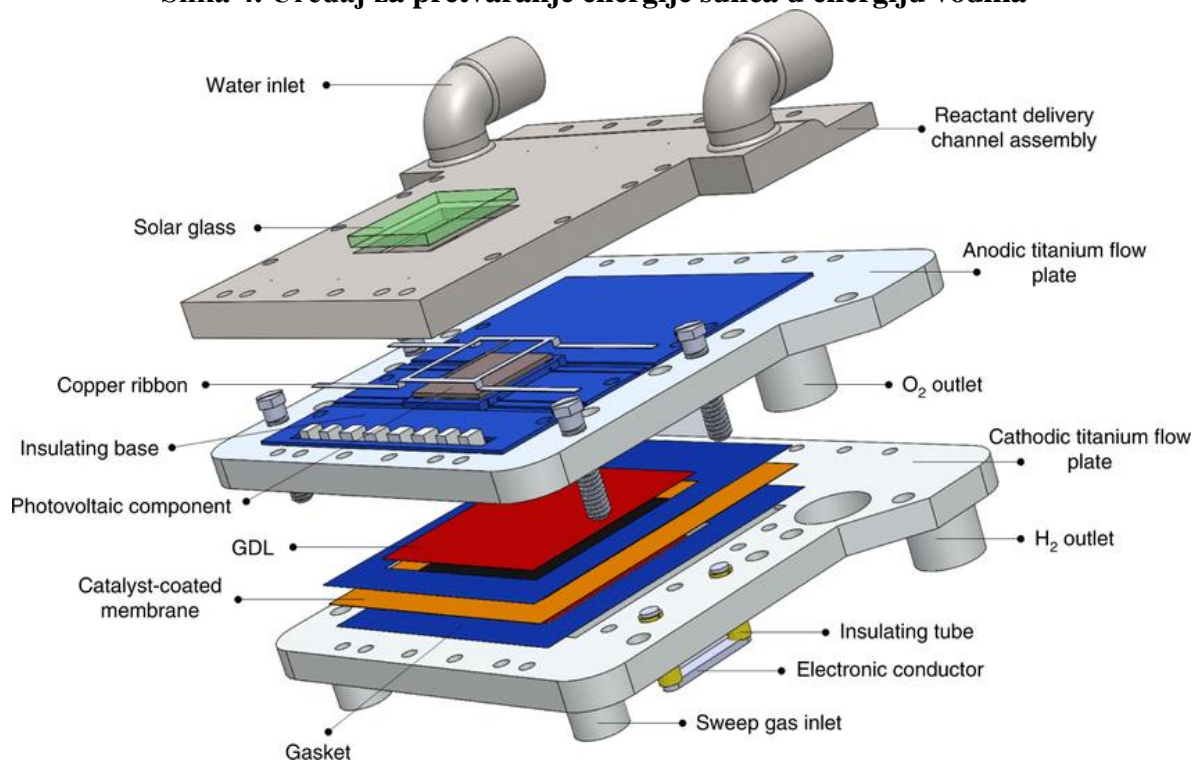
1. Apsorpcija poluvodiča: poluvodički materijali koriste se kao elektrode u PEC (eng. Photoelectrochemical) ćeliji. Kada su ovi materijali izloženi sunčevoj svjetlosti, apsorbiraju fotone (svjetlosne čestice), stvarajući parove elektron-rupa.
2. Reakcije djeljenja vode: apsorbirani fotoni stvaraju dovoljno energije za pokretanje reakcije dijeljenja vode. Elektroni se pobuđuju u valentnom pojasu poluvodiča u njegov vidljiv pojas, stvarajući negativno nabijene elektrone i pozitivno nabijene rupe.
3. Razdvajanje naboja: generirani elektroni koriste se za redukciju protona (H^+) iz molekula vode, stvarajući vodikov plin na površini poluvodiča. Pozitivno nabijene rupe sudjeluju u reakciji oslobađanja kisika, oslobađajući plin kisik.
4. Skupljanje plina: proizvedeni plinovi vodik i kisik odvajaju se i skupljaju za upotrebu kao čista goriva.⁴

³ Safari, f., Dincer, I.: *A review and comparative of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production*, 2020. p. 44

⁴ Dincer, I., Ishaq, H.: *Solar Energy-Based Hydrogen Production*, 2022. p. 78.

Švicarski znanstvenici iz Politehničke škole u Luusanneu razvili su sustav CIPEC (eng. Concentrated integrated photo-electrochemical system) uređaj za pretvaranje energije sunca u kemijsku energiju, energiju vodika. Uređaj je prikazan na slici 4.

Slika 4. Uređaj za pretvaranje energije sunca u energiju vodika

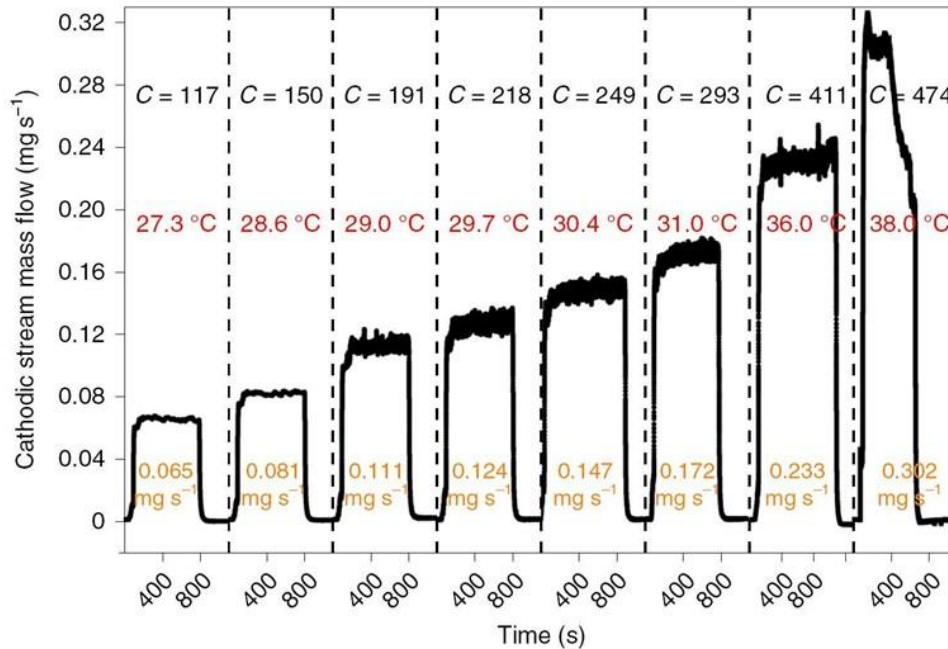


Izvor: <https://www.bug.hr/znanost/iz-sunceve-svjetlosti--vodik-9612> (21.08.2023.)

Švicarski znanstvenici usmjerili su električnu energiju 400 puta jaču od sunčevog zračenja (1 kW/m²) kako bi riješili problem malih ćelija s visokom gustoćom struje (višom od 0,88 A/cm²) na elektrodama. Omogućili su strujanje elektrolita kroz ćeliju (brzinom od 4 L/min) čime je osigurano hlađenje ćelije na temperaturu nižu od 30°C, kako bi se spriječilo izgaranje foto-naponske ploče zbog tolike gustoće zračenja, koje se pretvara u toplinu, a elektrolit u paru. Metoda hlađenja im je omogućila da zatvore razmak između elektroda, što je smanjilo električni otpor. Iako je vodljivost vode bila samo 0,1 S/cm, ipak su je mogli koristiti kao elektrolit zbog blizine elektroda. Za razliku od koncentrirane kalijeve ili natrijeve lužine koja se obično nalazi u ćelijama za elektrolizu, čini se da ovaj elektrolit nije štetan za okoliš. Uz sve gore navedene prednosti, nova ćelija za elektrolizu uspjela je pretvoriti 17% sunčeve energije u energiju goriva (vodik) pri gustoći zračenja od 474 kW/m². Kao rezultat, postignute su gustoće struje od 0,88 A/cm² na elektrodama i 6,04 A/cm² na foto-naponskom panelu. Kao rezultat koncentracije zračenja, sunčeva energija se učinkovitije koristi. S druge strane, koristi se manje materijala jer

fotonaponski panel proizvodi 400 puta više energije po jedinici površine nego kada je postavljen na krov.

Slika 5. Protok elektrolita kroz ćeliju



Izvor: <https://www.bug.hr/znanost/iz-sunceve-svjetlosti--vodik-9612> (21.08.2023.)

Prednosti fotoelektrokemijske proizvodnje očituju se kroz:

- Izravna pretvorba solarne energije u vodik: PEC omogućuje izravnu pretvorbu sunčeve energije u vodik bez potrebe za vanjskom električnom energijom, što je čini potencijalno učinkovitom i održivom metodom.
- Prednost za okoliš: PEC proizvodnja vodika je ekološki prihvatljiva, jer stvara vodik bez izravnih emisija ugljika.

Integrirani pristup: PEC tehnologija može se integrirati sa solarnim fotonaponskim ćelijama, stvarajući hibridni sustav koji proizvodi i električnu energiju i vodik.

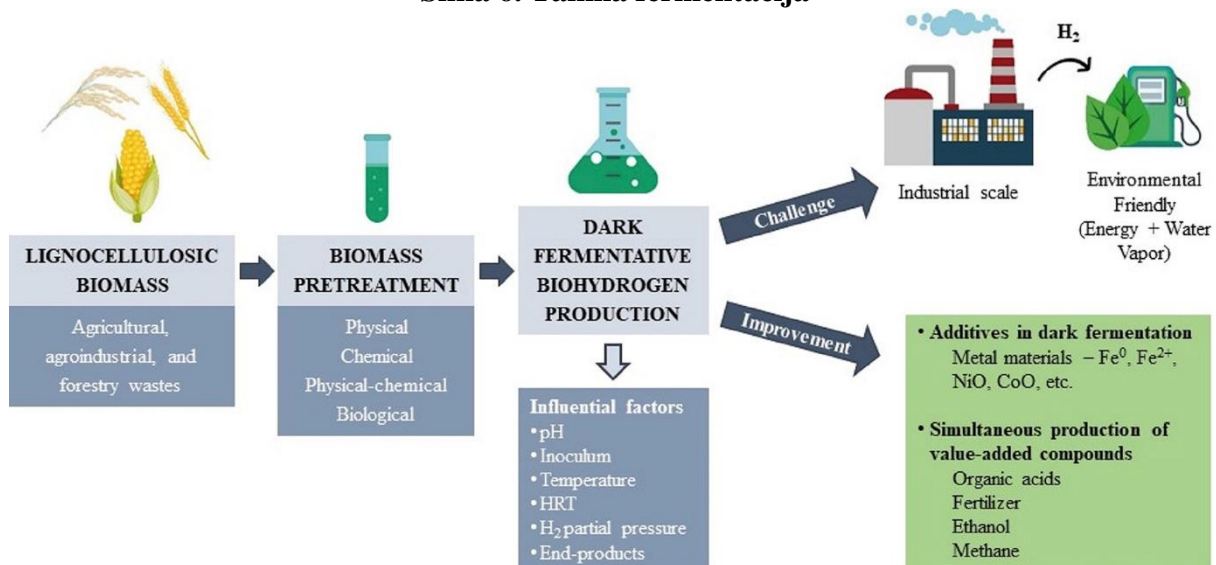
2.6. BIOLOŠKA PROIZVODNJA VODIKA

Biološka proizvodnja vodika iskorištava metaboličke aktivnosti mikroorganizama za stvaranje plinovitog vodika kao nusprodukta. Ovaj pristup koristi prirodne sposobnosti

određenih bakterija i algi da razrade organsku tvar ili uhvate sunčevu svjetlost kako bi potaknuli pretvorbu vode u vodikov plin.

Tamna fermentacija (prikazana na slici 6.) je anaerobni proces u kojem određene vrste bakterija razgrađuju organske materijale u nedostatku svjetla. Ova razgradnja proizvodi vodikov plin, ugljični dioksid i hlapljive masne kiseline. Mogu se koristiti različite organske sirovine, uključujući organski otpad, ostatke iz poljoprivrede i otpadne vode. Tamnom fermentacijom mogu se postići relativno visoki prinosi vodika u usporedbi s drugim biološkim metodama.⁵

Slika 6. Tamna fermentacija

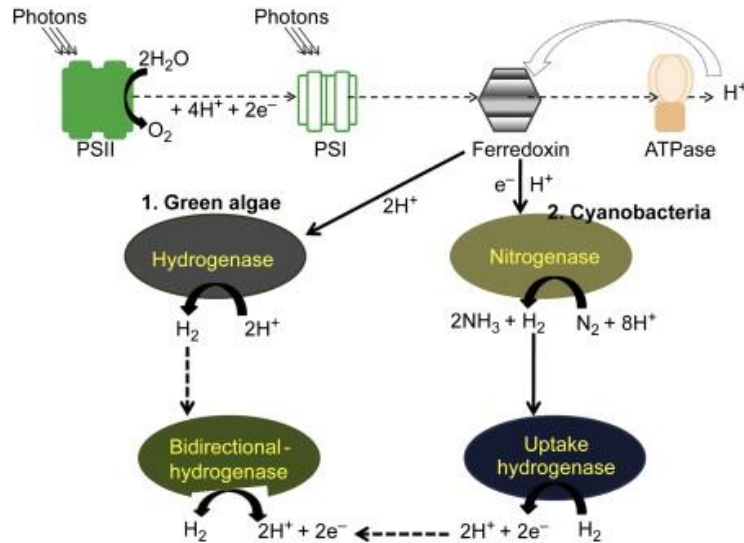


Izvor: Dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technological challenges and future prospects, J. Ferreira Soares, T. C. Confortin, I. Todero (21.08.2023.)

Foto-biološka proizvodnja vodika uključuje korištenje fotosintetskih mikroorganizama, kao što su zelene alge i cijanobakterije, za stvaranje vodikovog plina iz vode i sunčeve svjetlosti. Tijekom fotosinteze ovi mikroorganizmi hvataju energiju sunčeve svjetlosti, cijepajući molekule vode na kisik i protone, koji se koriste za proizvodnju plinovitog vodika. Učinkovitu proizvodnju vodika kroz fotobiološke procese ometaju čimbenici poput osjetljivosti na kisik i natjecanja za resurse.

⁵ Soares, J.F., Confortin, C.T., Todero, I.: *Dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technological challenges and future prospects*, 2020. p. 145.

Slika 7. Foto-biološka metoda



Izvor: Hydrogen production using photobiological methods, R.S.Poudyal, I.Tiwari, A.R.Koirala (21.08.2023.)

Prednosti biološke proizvodnje očituju se kroz:

- Obnovljiv put: biološka proizvodnja vodika koristi obnovljive sirovine i obnovljive izvore energije (sunčevu svjetlost) za proizvodnju vodika
- Ugljična neutralnost: ovisno o korištenoj sirovini i ukupnoj učinkovitosti procesa, biološka proizvodnja vodika može biti gotovo ugljično neutralna
- Upravljanje otpadom: tamna fermentacija može se koristiti za pretvaranje organskih otpadnih materijala u vrijedan vodikov plin, a pritom se rješavaju problemi gospodarenja otpadom

Nedostatci biološke proizvodnje očituju se kroz:

- Niska učinkovitost: metode biološke proizvodnje vodika često pokazuju manju učinkovitost i sporije reakcije u usporedbi s drugim metodama
- Kontrola procesa: upravljanje mikrobnim kulturama i održavanje optimalnih uvjeta za proizvodnju vodika može biti izazovno i zahtijeva pažljivu kontrolu procesa.
- Natjecanje za resurse: u foto-biološkim procesima, isti mikroorganizmi odgovorni za proizvodnju vodika mogu također konzumirati proizvedeni vodik, smanjujući ukupni prinos.⁶

Očekuje se da će napredak u mikrobnjoj genetici, metaboličkom inženjerstvu i tehnikama uzgoja poboljšati učinkovitost i prinos metoda biološke proizvodnje vodika.

⁶ Veziroglu, T.N.: *Hydrogen production using photobiological methods*, 2015. p. 289-317

Istraživački naponi i dalje su usmjereni na optimizaciju uvjeta, poboljšanje stope proizvodnje vodika i razvoj sojeva mikroba koji su prilagođeni za poboljšano stvaranje vodika

2.7. HIBRIDNE I NOVE METODE

Hibridne metode uključuju kombiniranje dviju ili više tehnologija proizvodnje vodika kako bi se postigli sinergijski učinci i prevladala pojedinačna ograničenja. Nove metode su novi pristupi koji imaju potencijal revolucionirati proizvodnju vodika kroz jedinstvene procese tehnologije.

Hibridni pristup odnosi se na nekoliko pristupa i procesa. Jedan od njih je elektroliza s obnovljivom energijom. Jedan uobičajeni hibridni pristup uključuje spajanje elektrolize s obnovljivim izvorima energije poput sunca ili vjetra. Višak energije proizveden tijekom razdoblja najveće proizvodnje može se pohraniti kao vodik za kasniju upotrebu. Drugi pristup odnosi se na rasplinjavanje i elektrolizu. Integriranje rasplinjavanja biomase s elektrolizom omogućuje korištenje sirovina biomase i obnovljive energije za istovremenu proizvodnju vodika i sintetičkog plina. Sljedeći proces je kroz pretvaranje obnovljive energije u plin. Ovaj pristup uključuje korištenje viška obnovljive električne energije za proizvodnju vodika putem elektrolize. Vodik se zatim može ubrizgati u mrežu prirodnog plina ili koristiti za industrijske primjene.

Nove metode odnose se na nekoliko procesa:

- Umjetna fotosinteza: nadahnuta prirodnom fotosintezom, umjetna fotosinteza nastoji replicirati proces pretvaranja sunčeve svjetlosti i vode u vodik i kisik pomoću konstruiranih materijala i katalizatora.
- Visokotemperaturna koelektroliza: visokotemperaturna koelektroliza uključuje istovremenu elektrolizu vode i ugljičnog dioksida za proizvodnju vodika i sintetskog plina. Ova metoda koristi visoke temperature za poboljšanje učinkovitosti i prinosa.
- Bioelektrokemijski sustavi: koriste elektroaktivne mikroorganizme za povećanje učinkovitosti mikrobne proizvodnje vodika, nudeći potencijalni poticaj biološkoj proizvodnji vodika

Hibridne i nove metode imaju potencijal pridonijeti održivijoj i ekološki prihvatljivijoj proizvodnji vodika. Na primjer, spajanje elektrolize s obnovljivim izvorima energije može rezultirati proizvodnjom „zelenog vodika“.

3. SKLADIŠTENJE I TRANSPORT VODIKA

Vodik je došao u fokus kao mogući kandidat za značajnu ulogu u svjetskom prelasku na ekološki prihvatljivije i održivije izvore energije. Vodik ima sposobnost funkcioniranja kao fleksibilan prijenosnik energije u raznim sektorima, uključujući transport, proizvodnju i proizvodnju električne energije, zahvaljujući svom kapacitetu energije i karakteristikama čistog izgaranja. Kako bi se potpuno ostvario potencijal vodika kao izvedive i sveprisutne energetske alternative, moraju se riješiti značajni problemi s njegovim skladištenjem i učinkovitim transportom.

Ovo poglavlje prikazuje i objašnjava različite aspekte skladištenja i transporta vodika koji su temeljne komponente šireg gospodarstva vodika. Učinkovito skladištenje i pouzdani transportni mehanizmi ključni su za osiguravanje raspoloživosti i dostupnosti vodika na mjestu uporabe, bilo da se radi o vozilima s gorivim ćelijama, industrijskim procesima ili proizvodnji električne energije. Izazovi koje nosi niska gustoća energije i jedinstvena fizikalna svojstva vodika zahtijevaju inovativna rješenja koja obuhvaćaju niz metoda skladištenja i transporta.

3.1. METODE SKLADIŠTENJA VODIKA

Skladištenje vodika igra ključnu ulogu u omogućavanju široke upotrebe vodika kao nositelja energije. Zbog niske gustoće energije i sklonosti curenju kroz mnoge materijale, učinkovite metode skladištenja su ključne. Razvijeno je nekoliko metoda za rješavanje ovih izazova, od kojih svaka ima svoje prednosti i ograničenja.

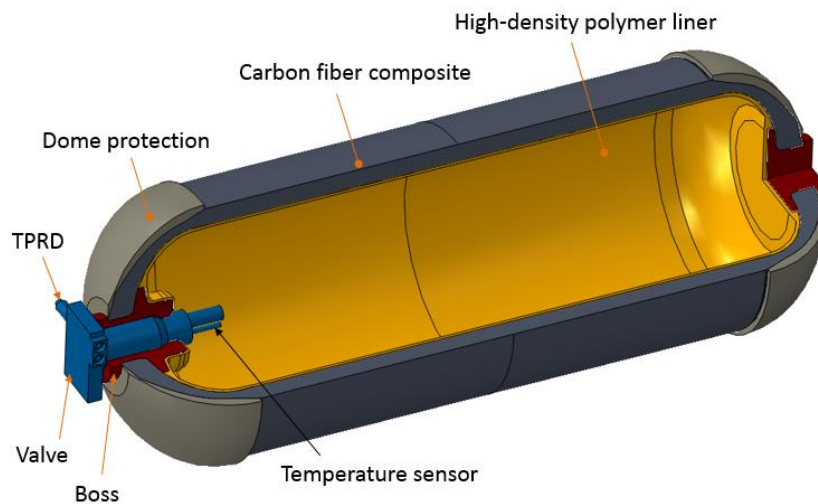
3.1.1. Skladištenje stlačenog vodika

Skladištenje stlačenog plinovitog vodika široko je korištena metoda koja uključuje tlačenje plinovitog vodika na visoke tlakove, smanjujući njegov volumen i povećavajući njegovu gustoću energije za učinkovito skladištenje i transport. Ova metoda rješava izazove koje donosi niska gustoća energije vodika u njegovom prirodnom stanju.

Skladištenje stlačenog vodikovog plina uključuje sljedeće ključne korake:

1. Kompresija: Plin vodik podvrgava se visokim tlakovima pomoću kompresora, obično u rasponu od 350 do 700 bara. Plin se komprimira u posebno dizajnirane spremnike, često izrađene od materijala visoke čvrstoće.
2. Posuda za pohranjivanje: Komprimirani vodikov plin pohranjuje se u cilindre ili spremnike dizajnirane da izdrže visoke tlakove. Ove posude uključuju sigurnosne značajke, kao što su ventili za smanjenje tlaka, kako bi se spriječio prekomjerni tlak.
3. Punjenje goriva i uporaba: Komprimirani vodik može se transportirati i točiti na stanicama za punjenje goriva za različite primjene, uključujući gorivo za vozila s gorivim ćelijama na vodik i industrijske procese⁷

Slika 8. Komponente spremnika vodika pod tlakom



TPRD = Thermally Activated Pressure Relief Device

Credit: Process Modeling Group, Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory (ANL)

Izvor: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage> (21.08.2023.)

Komponente spremnika vodika pod tlakom su sljedeće:

- *Valve*- ventil
- *TPRD*- termički aktivirani uređaj za rasterećenje tlaka
- *Temperature sensor*- senzor temperature
- *Dome protection*- zaštita kupole
- *Carbon fiber composite*- kompozit od karbonskih vlakana
- *High-density polymer liner*- podstava od polimera visoke gustoće

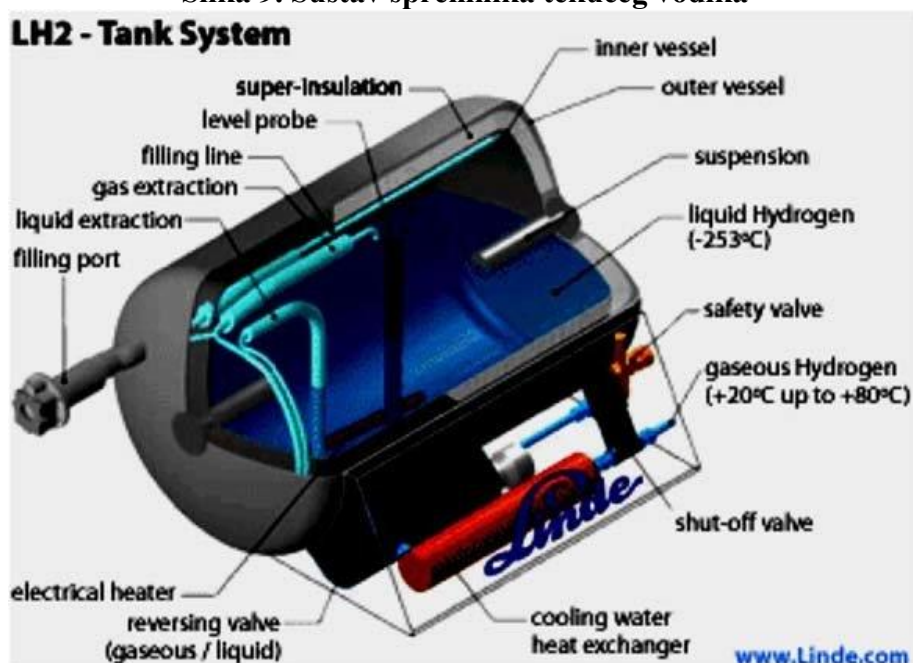
⁷ Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.: *Physical Hydrogen Storage*, 2023.

3.1.2. Skladištenje tekućeg vodika

Kako bi se vodik skladištio u tekućem obliku, plinoviti vodik mora se ohladiti na izrazito nisku temperaturu (-253°C). Ova metoda drastično povećava gustoću energije vodika i nudi djelotvornu metodu za dugoročno skladištenje i isporuku.

Skladištenje tekućeg vodika obuhvaća nekoliko ključnih stavki. Prva stavka odnosi se na ukapljivanje. Plinoviti vodik podvrgava se niskim temperaturama pomoću specijaliziranih rashladnih sustava. Kako se vodik hladi, on prolazi kroz fazni prijelaz i postaje gusta tekućina. Takva tekućina pohranjuje se u dobro izolirane kriogene spremnike (prikazan na slici 9.) dizajnirane za održavanje ekstremno niskih temperatura i sprječavanje prodora topline. Ovi spremnici često sadrže vakuumske slojeve i reflektirajuće premaze kako bi se smanjio prijenos topline. Dok se skladišti, nešto tekućeg vodika će ispariti zbog prodora topline iz okoline. Plinovi koji su isparili mogu se uhvatiti i ponovno ukapiti ili koristiti kao procesna toplina.

Slika 9. Sustav spremnika tekućeg vodika



Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Liquid-hydrogen-storage-tank-system13_fig1_348306621
(22.08.2023.)

Komponente spremnika tekućeg vodika su sljedeće:

- *Filling port*- otvor za punjenje
- *Liquid extraction*- tekuća ekstrakcija
- *Gas extraction*- ekstrakcija plina
- *Filling line*- linija za punjenje

- *Level probe*- sonda razine
- *Super-insulation*- super-izolacija
- *Inner vessel*- unutarnja posuda
- *Outer vessel*- vanjska posuda
- *Suspension*- sespenzija
- *Liquid Hydrogen* (-253°C)- tekući vodik
- *Safety valve*- sigurnosni ventil
- *Gaseous Hydrogen* (+20°C up to +80°C)- plinoviti vodik
- *Shut-off valve*- ventil za zatvaranje
- *Cooling water heat exchanger*- izmjenjivač topline rashladne vode
- *Reversing valve (gaseous/liquid)*- povratni ventil (plinoviti/tekući)
- *Electrical heater*- električni grijač

Sigurnosne mjere bitne su pri rukovanju tekućim vodikom zbog njegove kriogene prirode. Pravilan dizajn spremnika za skladištenje, sigurnosni ventil i odgovarajuća ventilacija u zatvorenim prostorima ključni su za sprječavanje nezgoda.

Tekući vodik koristi se kao raketno gorivo za istraživanje svemira zbog svoje visoke gustoće energije u učinkovitosti. U znanstvenim istraživanjima, tekući vodik se koristi u akceleratorima čestica i fuzijskim eksperimentima. U određenim udaljenim područjima, tekući vodik se može koristiti za proizvodnju električne energije pomoću gorivih ćelija i izgaranja.

3.2. TRANSPORT VODIKA

Uspješna integracija vodika u globalni energetske krajolik zahtijeva ne samo učinkovite metode za njegovu proizvodnju i skladištenje, već i robusne sustave za njegov pouzdan transport. Vodik kao čist prijenosnik energije, ima potencijal odigrati ključnu ulogu u zadovoljavanju naših energetske potreba u sektorima kao što su transport, industrija i proizvodnja električne energije. Međutim, ostvarenje ovog potencijala ovisi o razvoju sigurnih, učinkovitih i praktičnih metoda za transport vodika od njegovih proizvodnih izvora do mjesta korištenja.

3.2.1. Transport vodika brodom

Transport vodika brodom može se ostvariti u:

- Plinovitoj fazi
- Ukapljenom stanju i
- Obliku kemijskog spoja dobivenog hidrogenizacijom (metilcikloheksan).

Niska gustoća vodika čini ga „nepogodnim“ za transport brodom. Ekstremno niska temperatura ukapljivanja vodika te značajna cijena proizvodnje i ukapljivanja čine problem transporta i izolacije vrlo značajnim. Za pripremu vodika, kao tereta, za transport brodom mogu se poduzeti sljedeće aktivnosti:

- Stlačiti vodik u tlačne spremnike
- Ukapljiti vodik hlađenjem na temperaturu ispod -253°C
- Hidrirati toluen vodikom pri čemu se dobiva metilcikloheksan⁸

Sa stajališta potrebne energije za pripremu transporta 1kg vodika potrebno je uložiti:

Pri transportu u plinovitom stanju priprema tereta se sastoji u tlačenju plina na odabrani tlak u čelične tlačene spremnike. Kao karakteristične veličine za transport brodom izdvojene su dvije mogućnosti:

- Transport u tlačenim posudama volumena 2m^3 pri tlaku od 200 bara. Pri tom stanju u spremnik je moguće spremati 18kg vodika ili energiju od 600.5 kWh. Za pripremu vodika potrebno je utrošiti 78.7 kWh ili 4.38 kWh/kg vodika.
- Transport u tlačnim posudama volumena 500m^3 pri tlaku od 60 bara. Spremnik tada sadrži 2700 kg vodika odnosno energiju od 90072 kWh uz utrošak energije za tlačenje vodika od 4630 kWh ili 1.51 kWh/kg vodika⁹

Za transport vodika u ukapljenom stanju potrebno je izvršiti ukapljavanje plinovitog vodika pri čemu je potrebit utrošak od 11.51 kWh/kg vodika.

Za transport vodika u obliku metilcikloheksana zahtjeva hidrogenizaciju toluena katalitičkim postupkom uz utrošak 0.94 kWh/kg vodika. Osim ovog utroška u procesu dehidrogenizacije potrebno je utrošiti dodatnih 10.2 kWh/kg vodika. Nadalje, osim navedenog utroška energije potrebno je računati i sa transportom od oko 15kg metilcikloheksana/toluena po 1kg plinovitog vodika.

⁸ Alvera, M.: *The Hydrogen Revolution: A Blueprint for the Future of Clean Energy*, New York, 2021. p. 101-113

3.2.1.1. Transport plinovitog vodika

U slučaju transporta vodika u plinovitom stanju, spremnici su tlačne posude različitih kapaciteta i tlakova. Za potrebe ovog rada izvršene su analize čvrstoće dva tipa tlačnih spremnika.

- Spremnik volumena 2m^3 projektnog tlaka 200 bara, najvećeg sadržaja vodika 18kg, odnosno sadržaja energije u vodiku od približno 600 kWh. Osnovni nedostatak je visoka težina spremnika po 1kg vodika koja za ovaj tip spremnika iznosi više od 472 kg/kg vodika.
- Spremnik volumena 500 m^3 , projektnog tlaka 60 bara, sadržaja 2700 kg vodika. Sadržaj energije je približno 90 MWh uz relativno prihvatljive težine od 210 kg težine spremnika po 1kg vodika.

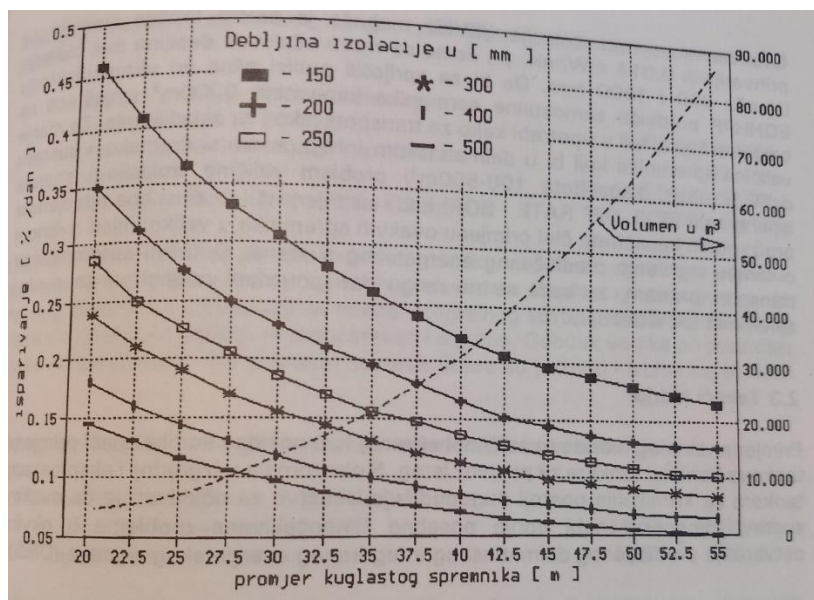
Tlačni spremnici, tehnički i tehnološki, dobro su poznati i istraženi, kao i tlačni, vodovi i kompresori te kod primjene ovog sustava transporta nije za očekivati posebne probleme niti u projektiranju niti u eksploataciji.

3.2.1.2. Transport ukapljenog vodika

Projekt *Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project* pokušava riješiti problem analogijom sa LNG brodovima. Pri tome je potrebno istaći bitno nižu temperaturu ukapljivanja vodika $< 20\text{K}$ u usporedbi sa temperaturom ukapljivanja LNG-a od približno 105K . Uz zadržavanje istog postotka isparavanja kao kod LNG-a, (slika 10.) Potrebno je osigurati više od 10 puta efikasniju izolaciju spremnika. Budući da je vodik neusporedivo skuplje gorivo potrebno je izvesti takvu izolaciju koja bi bila u mogućnosti smanjiti isparavanje vodika na polovičnu vrijednost od koeficijenta isparavanja LNG-a. Navedeni projekt kao referentnu uzima konstrukciju spremnika *MOSS-ROSENBERG* iako ova konstrukcija ima veliki nedostatak pojave toplinskog mosta kroz „suknjicu“ ekvatorijalnog prstena. Kod izvedbe firme *Hitachi-Zosen* ovaj toplinski most je skoro potpuno prekinut. Kao mogućnost ostaje i izvedba kod koje izolacioni materijal nosi unutarnji-hlađeni spremnik.¹⁰

¹⁰ Belak, S., Vujčić, R.: *Analiza transporta vodika brodom*, Hrvatska, 1996., p.299-306

Slika 10. Promjena isparavanja LNG-a u funkciji veličine spremnika i izolacije



Izvor: Prospektni materijali: "Moss Rosenberg Storage tank" (22.08.2023.)

3.2.2. Transport vodika cjevovodom

Cjevovodi su dugo služili kao kritična komponenta energetske infrastrukture za transport prirodnog plina i tekućina. Posljednjih godina raste interes za korištenje cjevovoda za transport vodika. Cjevovodi za vodik nude potencijal za učinkovito premještanje velikih količina vodika na velike udaljenosti, podržavajući različite primjene u različitim industrijama.

Plinoviti vodik može se transportirati cjevovodima na sličan način kao i prirodni plin danas. Otprilike 1600 milja cjevovoda za vodik trenutno radi u Sjedinjenim Državama. U vlasništvu trgovačkih proizvođača vodika, ovi se cjevovodi nalaze tamo gdje su koncentrirani veliki korisnici vodika, poput rafinerija nafte i kemijskih tvornica.

Prijevoz plinovitog vodika preko postojećih cjevovoda je jeftinija opcija za isporuku velikih količina vodika. Visoki početni kapitalni troškovi izgradnje novog cjevovoda predstavljaju veliku prepreku širenju infrastrukture za isporuku cjevovoda vodika. Istraživanja se stoga danas usredotočuju na prevladavanje tehničkih problema povezanih s prijenosom cjevovodom, uključujući:

- Potencijal da vodik ukruti čelik i zavarene spojeve koji se koriste za izradu cjevovoda

- Potreba za kontrolom propuštanja i curenja vodika
- Potreba za nižom cijenom, pouzdanijom i dugotrajnijom tehnologijom kompresije vodika.¹¹

Potencijalna rješenja uključuju korištenje cjevovoda od polimera ojačanog vlaknima (FRP) za distribuciju vodika. Troškovi ugradnje FRP cjevovoda su oko 20% manji od troškova čeličnih cjevovoda jer se FRP može dobiti u dijelovima koji su puno duži od čelika¹², minimizirajući zahtjeve za zavarivanjem.

Jedna od mogućnosti za brzo širenje infrastrukture za isporuku vodika je prilagodba dijela infrastrukture za isporuku prirodnog plina za prijenos mješavine prirodnog plina i vodika (do oko 15% vodika) može zahtijevati samo skromne modifikacije cjevovoda¹³. Konverzija postojećih cjevovoda prirodnog plina za isporuku čistog vodika može zahtijevati značajnije modifikacije. Trenutna istraživanja i analize ispituju oba pristupa.

Cjevovodi za vodik rade kroz jednostavan proces:

1. Kompresija i ubrizgavanje: plinoviti vodik obično se komprimira na izvoru do potrebnog tlaka za transport cjevovodom. Kompresori ubrizgavaju komprimirani vodik u cjevovod.
2. Prijenos cjevovodom: vodikov plin teče kroz cjevovod, pokretan razlikom tlaka između točke ubrizgavanja i odredišta
3. Distribucija i odredište: na odredištu se vodik može izdvojiti iz cjevovoda i distribuirati za različite primjene, kao što su industrijski procesi ili postaje za gorivo za vozila na vodik.¹⁴

3.2.3. Transport vodika prikolicama

Prikolice za cijevi za stlačeni plin specijalizirana su transportna vozila dizajnirana za prijevoz stlačenog vodika od proizvodnih mjesta do krajnjih korisnika, kao što su crpke za

¹¹ Melaina, M.W., Antonia, O., Penev, M.: *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues*, 2013. 13

¹² Natural Gas Pipeline Technology Overview, Folga, S M, Argonne National Lab, United States, 2007-11-01

¹³ Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues, Melaina, MW; Antonia, O; Penev, M, United States, 2013-03-01

¹⁴ Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.: *Hydrogen Pipelines*, 2023.

gorivo ili industrijska postrojenja. Ove prikolice pružaju fleksibilno i mobilno rješenje za transport vodika na srednje do velike udaljenosti, prevladavajući neke od izazove povezanih s fiksnom cjevovodnom infrastrukturom.

Proces korištenja prikolica s cijevima za komprimirani plin za transport vodika uključuje sljedeće korake:

1. Kompresija i punjenje: plin vodik komprimira se na mjestu proizvodnje pomoću kompresora, a komprimirani plin se puni u visokotlačne cijevi unutar prikolice.
2. Prijevoz: natovarena prikolica s cijevima vozi do odredišta. Plin ostaje pod visokim tlakom tijekom transporta.
3. Istovar i distribucija: na odredištu se vodikov plin istovaruje iz cijevi prikolice i može se distribuirati za različite primjene, kao što je punjenje vozila s vodikovim gorivnim ćelijama.¹⁵

Neke od prednosti koje nude ove prikolice očituju se kroz mobilnost, brzu implementaciju i različite primjene. Prikolice za cijevi za stlačeni plin nude mobilnost i fleksibilnost, što ih čini prikladnima za lokacije gdje fiksni cjevovodi možda nisu izvedivi ili isplativi. Ove prikolice mogu brzo transportirati vodik na udaljene lokacije, podržavajući hitne intervencije i privremene primjene. Prikolice za cijevi mogu opskrbljivati vodikom različite krajnje korisnike, uključujući industrijske procese i udaljenje postaje za punjenje goriva.

Uz sve navedene prednosti korištenja ove metode transporta, valja napomenuti i nedostatke, koji se očituju kroz ograničeni kapacitet, infrastrukturu i utovar/istovar te sigurnost u prijevozu. Dok prikolice s cijevima mogu nositi značajne količine vodika, imaju ograničenja u usporedbi s cjevovodima. Potrebna je odgovarajuća infrastruktura i oprema za siguran utovar i istovar vodika iz prikolica. Osiguravanje sigurnosti prijevoza vodika na cestama je ključno, zahtijeva poštivanje propisa i sigurnosti protokola.

¹⁵ Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.: *Hydrogen Tube Trailers*, 2023. p.1

Slika 11. Prikolica za prijevoz vodika



Izvor: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-tube-trailers> (22.08.2023.)

4. PRAVNA REGULATIVA I MEĐUNARODNI SAVEZI

Dok se zemlje bore s obvezama dekarbonizacije, više od 25 vlada je objavilo strategije za ubrzanje razvoja tržišta vodika do 2050. Ove strategije uključuju niz prioriteta, kao što su standardi intenziteta ugljika za proizvodnju vodika (slika 17.), trajni opskrbeni lanci, investicijski portfelji, politički poticaji, prijelaz radne snage, međunarodna suradnja, plinski standardi, infrastruktura, prenamjena i proizvodni ciljevi. Ključna nit u većini strategija je potreba za dosljednošću u regulatorni i drugim politikama za podršku i razvoj globalnog tržišta vodika. Još jedna važna komponenta ovih strategija je priznavanje potrebe za usklađivanjem oko toga što je „čista“ proizvodnja vodika, koncept se različito tumači ovisno o zemlji ili regiji.

Slika 12. Zemlje s vlastitim strategijama za vodik



Izvor: „Global Hydrogen Policy and Regulatory Review“ October 2022

U više od 25 zemalja koje su najavile ciljeve vezane uz vodik, postoji još najmanje 20 dodatnih vlada koje planiraju objaviti službene strategije u sljedeće dvije godine. Kako sve više zemalja postaje zainteresirano za vodik kao energetska robu, uspostavljanje tržišnog sustava temeljenog na pravilima koji koristi jedinstvene političke poluge različitih zemalja bit će najvažnije za smanjenje troškova i poticanje međunarodne trgovine.

Regija Bliskog istoka i sjeverne Afrike (MENA) ima nekoliko tekućih projekata vodika, ali, kao i mnoge druge zemlje, nema vodeći regulatorni okvir. Globalna potreba za dubokom dekarbonizacijom, obilje kapaciteta obnovljive energije i strateška geografska pozicija nude važnu priliku za diverzifikaciju od izvoza nafte i plina. Postoji još jedna prilika za izgradnju regionalnog gospodarstva čistog vodika i stvaranje novog izvoznog tržišta kako regionalna i globalna potražnja za vodikom raste.

Regija MENA može postati vrijedan izvoznik čistog vodika do 2030., pomažući zemljama uvoznicama da ostvare svoje ambiciozne ciljeve. Na primjer, Saudijska Arabija i Njemačka već su potpisale sporazum o zelenom vodikom kako bi Njemačkoj pomogle u opskrbi 90 do 110 TWh energije do 2030. Ostale zemlje, poput Japana, Francuske, Južne Koreje i Njemačke koje su ograničene resursima, mogu gledati na MENA kao pouzdanog izvoznika vodika kako bi ispunili svoje ambiciozne energetske ciljeve.

4.1. REGULATORNI OKVIRI

Trenutno ne postoji globalno tržište vodika; ponuda, potražnja i cijene vodika uglavnom se temelje na bilateralnim ugovorima za njegovu upotrebu kao posebne kemikalije. Dok neke zemlje imaju postojeće propise povezane s trenutnim oblicima proizvodnje vodika, potrebno je daljnje proširenje kako bi se uključile nove upotrebe i tehnologije. Kao takva, ne postoji regionalna ili globalna regulatorna struktura ili struktura cijena za upravljanje vodikom kao energetska robom. Stalna potreba za gorivom za industriju i proizvodnju električne energije bez otkrića u dugotrajnom skladištenju nudi poticaj za vlade, industriju, i druge interesne skupine za formiranje dosljednih regulatornih okvira i jasnih definicija za sigurno rukovanje (uključujući otpremu), čisti vodik, kvalitetu proizvoda, zahtjeve skladištenja, propise o cjevovodima i odgovarajuće razine miješanja s prirodnim plinom.

Sigurno rukovanje. Kako bi se ograničili zdravstveni i sigurnosni rizici od vodika ili nosača vodika, oprema za vodik mora se pregledavati i redovito održavati. Posebno za otrovne tvari, poput amonijaka ili metanola, treba odrediti dopuštene granice izloženosti i priopćiti

onima koji rukuju tvarima. Neke zemlje, uključujući Sjedinjene Države, već su uspostavile takve zahtjeve; to bi moglo informirati globalnu praksu.

Materijali u kojima je vodik također trebaju biti standardizirani kako bi se izbjegla preuranjena krtost ili gubici zatezne čvrstoće, duktilnosti i žilavosti loma, što bi u konačnici moglo rezultirati neuspjehom zadržavanja tlaka. Stoga se globalno moraju primjenjivati sveprisutne smjernice za korištenje specifičnih vrsta materijala, poput aluminijskih legura, bakrenih legura ili niskolegiranih feritnih čelika. U slučaju nesreće, incidente treba istražiti radi utvrđivanja uzročnosti i odgovarajuće međunarodne ili nacionalne agencije trebaju ih ispraviti.

Zemlje koje planiraju izvoziti vodik trebale bi razviti referentne vrijednosti intenziteta ugljika za domaću proizvodnju kako bi se uskladile s međunarodnim kupcima. Neke zemlje kao Sjedinjene Države, odlučuju se za tehnološki neutralne pristupe za razvoj vodika i usredotočuju se na referentne vrijednosti intenziteta ugljika kako bi razvili standarde čistog vodika. Više od 20 zemalja koordinira od 2019. kako bi se uskladile metodologije analize emisija i granične uvjete za puteve vodika kroz Međunarodno partnerstvo za vodik u gospodarstvu (eng. *International Partnership for Hydrogen in the Economy's IPHE's*) i radnu skupinu za analizu proizvodnje vodika (eng. *Hydrogen Production Analysis Task Force H2PA TF*). Saudijska Arabija ima tehnološki neutralan pristup koji odražava okvir kružnog ugljičnog gospodarstva koji je usvojila 2020. godine. Druge su zemlje navele da bi vodik smatrale čistim samo ako se proizvodi obnovljivom električnom energijom, npr. solarnom energijom i vjetrom.

Važne su definicije koje zemlje i politike koriste posebice kako se tržište razvija. Nekoliko vodećih nacija u razvoju vodika ima vlastite definicije vodika s niskim udjelom ugljika. Primjeri ove varijacije mogu se vidjeti u Sjedinjenim Državama (eng. *Infrastructure and Jobs Act, EPA*), Ujedinjenom Kraljevstvu, Europskoj uniji, Australiji, Kini, i Japana.

Osiguravanje da zemlje proizvođači proizvode vodik koji je usklađen s dopuštenjem za stakleničke plinove drugih zemalja zahtijevat će jasnu artikulaciju u komercijalnim sporazumima kao što su: ugovori, pisma namjere i memorandumima o razumijevanju.

Kvaliteta goriva. Zemlje koje planiraju proizvoditi vodik moraju razviti standarde kvalitete goriva kako bi osigurale kompatibilnost s međunarodnim standardima i sustavima za krajnju upotrebu. Kako se nova krajnja upotreba vodika komercijalizira, tipična kvaliteta vodika od 95-99 posto možda više neće biti dovoljna. Na primjer, vozila s gorivim ćelijama zahtijevaju visoko kvalitetan vodik, sa čistoćom od 99.97%. Prekomjerne nečistoće kao što su sulfidi pogoršavaju performanse gorivih ćelija ili nepovratno oštećuju njihove komponente.

Zemlje koje žele izvoziti vodik trebale bi regulirati domaću proizvodnju vodika u skladu sa standardima čistoće ciljanih zemalja. Poput referentnih vrijednosti intenziteta ugljika, standardi čistoće vodika razlikuju se od zemlje do zemlje. U Kini, na primjer, standardi čistoće za vodik nisu niži od 99,97%, što je više od onoga za industrijski vodik, ali manje od onog za vodik za sektor električne energije. Osim toga, Odjel za poslovnu, energetska i industrijsku strategiju UK-a preporučuje minimalni standard čistoće vodika veći od 98%. Važno je uzeti u obzir cilj države i primjenu u krajnjoj upotrebi prilikom utvrđivanja odgovarajućih standarda kvalitete vodika.

Razine miješanja. Ako je vodik integriran u postojeće sustave prirodnog plina, kompatibilnost s materijalima cjevovoda i sustavima za krajnju upotrebu moraju se odrediti kako bi se uspostavili odgovarajući omjeri mješavine. U Sjedinjenim Državama, miješanje vodika u infrastrukturi prirodnog plina nosi ozbiljne rizike od krtosti čelika ili komplikacije sa plinomjerima čak i pri niskim stopama mješavine od 5% do 10%.

Kako je regulacija vodika u početnoj fazi, zemlje koje žele pridonijeti globalnom tržištu vodika trebale bi igrati aktivnu ulogu u razvoju upravljanja i regulatornih načela za trgovinu vodikom. Iako zemlje počinju razvijati referentne vrijednosti intenziteta ugljika i više od 25 zemalja je najavilo vodikove strategije, jasni i dosljedni propisi za globalna tržišta, poput onih navedenih gore u tekstu još nisu provedeni. Ovo predstavlja priliku za zemlje, poput Saudijske Arabije, da budu dio ovog globalnog procesa donošenja odluka.

4.2. RAZVOJ POLITIKE I REGULATIVE ZELENOG VODIKA

Dok više od 25 zemalja sada ima neki oblik vodika ili politike, malo zemalja ima koherentan pravni i fiskalni okvir koji regulira proizvodnju vodika, uključujući zeleni vodik.

Budući da su regulatorni režimi koji se tiču proizvodnje, distribucije i marketinga zelenog vodika uglavnom u fazi formiranja, zakonodavci trenutno imaju jedinstvenu priliku stvoriti zakonske okvire koji slijede dobru međunarodnu praksu. To uključuje uključivanje regulatornih načela i nametanje standarda koji mogu pridonijeti zajedničkoj osnovi za učinkovit razvoj vodika kao novog velikog globalnog prijenosnika energije. Tamo gdje zemlje već imaju politike i zakone, sve veći globalni fokus na zeleni vodik mogao bi poslužiti kao poticaj za reformu njihovih zakona kako bi se bolje uskladili s dobrom međunarodnom praksom.

Da bi se povećala atraktivnost ulaganja u sektor zelenog vodika u zemlji, vlada bi trebala formulirati jasnu politiku i stvoriti regulatorni okvir koji promiče predvidljivost i izvjesnost.

Budući da sektor zelenog vodika uključuje različite komponente, uključujući proizvodnju obnovljive energije, proizvodnju vodika, transport i distribuciju vodika, vlade će morati osigurati da svaki korak u lancu vrijednosti zelenog vodika bude reguliran.

Priroda i opseg do kojeg se moraju regulirati različite faze lanca vrijednosti zelenog vodika razlikovat će se od jedne jurisdikcije do druge. To je zato što će dijelovi vrijednosnog lanca već biti razmatrani prema postojećim politikama (kao što je državna strategija obnovljive energije) ili regulirani prema postojećim zakonima (postojeći zakoni o plinu i energiji).

Različite grane vlasti odgovorne su za različite korake u procesu reforme zakona. Izvršna vlast objavljuje politiku zelenog vodika. Kako bi politika bila učinkovita, zakonodavna grana vlasti proglašava zakon (ili zakone) za stvaranje pravnog okvira koji reguliraju proizvodnju, marketing, distribuciju i prodaju zelenog vodika. Izvršna vlast također provodi zakone. U skladu s ovlastima koje zakon(i) daje izvršnoj vlasti, od različitih vladinih ministarstava može se tražiti da objave propise, izdaju dozvole/odobrenja i smjernice te sklope ugovore s proizvođačima obnovljive energije i zelenog vodika. Ovi sekundarni pravni instrumenti dodatno reguliraju određene dijelove lanca vrijednosti zelenog vodika.

4.3. POLITIČKE MJERE ZA POTPORU ZELENOJ INDUSTRIJI VODIKA

Kako bi se stvorilo okruženje koje je pogodno za ulaganja, politike u zemlji ili regiji trebale bi razmotriti kako i u kojoj mjeri svaki dio u lancu vrijednosti treba regulirati. Posebne mjere politike za različite elemente u lancu vrijednosti vodika treba definirati od samog početka. Dok se tema kojom bi se trebala baviti politika zelenog vodika u zemlji/regiji može razlikovati od regije do regije (ovisno o tome je li određena tema, poput obnovljive energije, već obrađena u okviru zasebne politike), vlade bi trebale razmotriti uključivanje sljedećih tema u svojim pravilima:

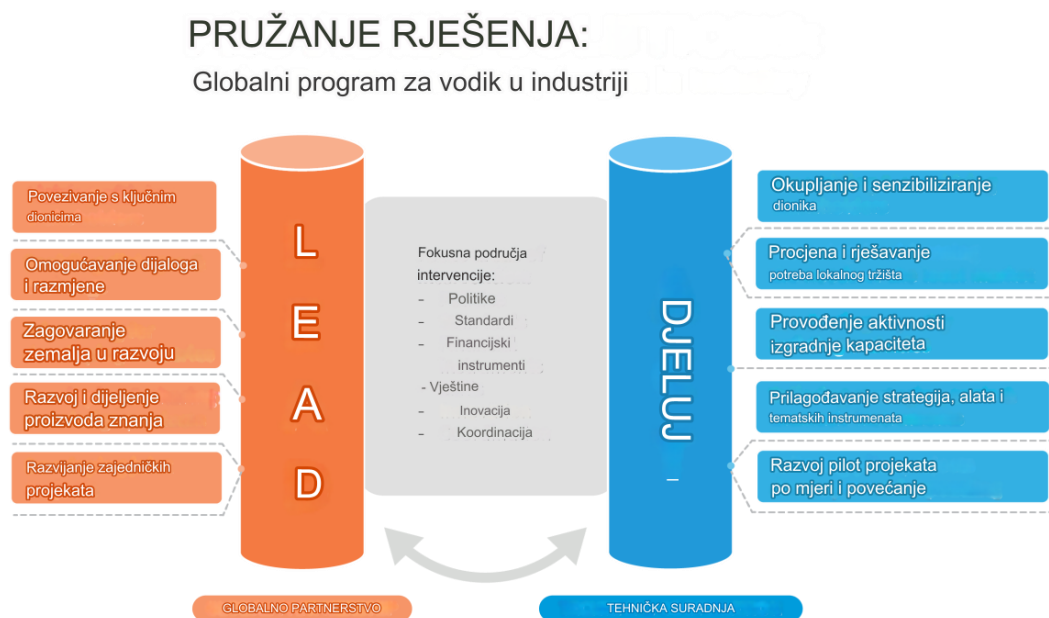
1. Izvori obnovljive energije, proizvodni kapaciteti i potreba za daljnji razvoj- Politika zelenog vodika mora identificirati različite izvore obnovljive energije (uključujući hidroenergiju, solarnu energiju i vjetar) koji bi podržali razvoj sektora zelenog vodika. Politika bi trebala utvrditi koliki bi udio električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije bio određen za uporabu u postrojenjima za proizvodnju zelenog vodika. Politika također treba uzeti u obzir postojeću infrastrukturu obnovljivih izvora energije, uključujući postrojenja za obnovljive izvore energije te mreže za distribuciju i prijenos električne energije. Konkretno, treba utvrditi može li trenutna infrastruktura podržati uspostavu sektora zelenog vodika.

2. **Financijska potpora-** Politika bi trebala identificirati sve mehanizme javnih financija koje bi vlada ponudila kako bi omogućila uspostavu sektora zelenog vodika. Državna financijska potpora može imati različite oblike i ovisi, između ostalog, o financijskim resursima zemlje domaćina. Primjeri mehanizama koje bi vlade mogle razmotriti uključuju angažmane u pogledu dugoročnih ugovora o kupnji električne energije, koncesijskih zajmova, izravnih paketa financijske potpore i drugih financijskih poticaja gdje pristup odgovarajućim financijskim resursima ograničava razvoj specifičnih projekata zelenog vodika. *Carbon Contracts for Difference (CCfD)* može biti prikladna shema za projekte zelenog vodika. CCfD je ugovor koji podupire vlada ili institucija između dviju strana pri čemu se korisniku nadoknađuje razlika između efektivne cijene CO₂ i troškova ublažavanja nove tehnologije, što je izvršna cijena.
3. **Proizvodnja-** Podrazumijeva se da će proizvodnja zelenog vodika ovisiti o brojnim temeljnim pokretačima, uključujući postojeću infrastrukturu, pristup obnovljivoj energiji, pristup vodi, sposobnosti plasiranja, distribucije i prodaje vodika, potražnju potrošača i krajnji korisnici. Politika bi trebala identificirati pokretače, sva ograničenja kapaciteta i utjecaje koje ove varijable mogu imati na sposobnost zemlje ili regije da proizvede zeleni vodik. Kao posljedica takve procjene, politika bi trebala predložiti odgovarajuće proizvodne ciljeve i rokove unutar kojih će se oni postići.
4. **Infrastruktura-** Kao što je spomenuto, status infrastrukture za proizvodnju obnovljive energije može utjecati na sposobnost zemlje ili regije da uspostavi i razvije sektor zelenog vodika. Politika bi trebala identificirati sve infrastrukturne prepreke za uspostavu sektora zelenog vodika, kao i mjere koje će vlada provesti za rješavanje problema. Postoji nekoliko načina koje bi vlade mogle učiniti. Na primjer, vlada bi mogla staviti projekte zelenog vodika na dražbu putem javnih posrednika. Stranke iz privatnog sektora mogle bi kao odgovor podnijeti prijedloge koji pokazuju kako bi mogli riješiti nedostatke infrastrukture. Vlada bi također mogla financirati razvoj infrastrukture, cjevovoda i terminala.
5. **Potrošači i krajnji korisnici-** Politika bi trebala identificirati potencijalne potrošače ili krajnje korisnike zelenog vodika. Potencijalni krajnji korisnik mogao bi uključivati određene sektore (kao što su sektori zrakoplovstva i javnog prijevoza) ili određene unaprijed određene kupce (kao što su određene rudarske tvrtke ili proizvođači čelika i cementa). Mogli bi se uključiti ciljevi usmjereni na količinu zelenog vodika koja bi zamijenila vodik na bazi fosilnih goriva koji se trenutno koristi ili količinu emisija CO₂ koja se očekuju kao rezultat korištenja zelenog vodika.

4.4. MEĐUNARODNI SAVEZI I SURADNJA

U eri globalne povezanosti i zajedničkih ekoloških izazova, međunarodna savezi i suradnja pojavljuje se kao ključni instrument u pokretanju prijelaza na gospodarstvo temeljeno na vodik. Uloga međunarodnih saveza, istraživačkih konzorcija, harmonizacije standarada, bilateralnih sporazuma, multilateralnih inicijativa i diplomatskog angažmana važna je u usvajanju i integraciji vodika kao goriva. Težnja prema gospodarstvu temeljenom na vodik nadilazi geografske granice, kulturne razlike i političke programe. Međunarodna suradnja i partnerstva, bilo kroz saveze, istraživačke konzorcije, usklađene standarde ili diplomatske angažmane postavljaju temelje za skladnu globalnu energetska tranziciju.

Slika 13. Globalni program o zelenom vodik u industriji



Izvor: <https://www.unido.org/hydrogen> (24.08.2023.)

Mnoge nacionalne politike formulirane su prema općim crtama i često im nedostaju specifične strategije i jasni ciljevi za proizvodnju vodika i dekarbonizaciju drugih sektora

Čini se da su pristupi koje slijede Kina, Čile, Danska, Francuska, Njemačka, Indija, Južna Afrika, Namibija i Španjolska iznimke jer su te zemlje formulirale ambiciozne strategije. Mnoge od ovih strategija ipak moraju biti uključene u nacionalno zakonodavstvo.

Na ambicije zemalja da dekarboniziraju energetske sektor utječe nekoliko pokretača. Važni primjeri ključnih pokretača uključuju prevladavajuće geopolitičke okolnosti u zemlji i regiji, domaće gospodarske i razvojne politike, energetske politike, dostupnost različitih izvora energije, postojeće razine emisije ugljika, nacionalno određene doprinose prema Pariškom sporazumu, okolišne čimbenike (uključujući biološku raznolikost) i dostupnost proizvodnih područja u moru.

Energetski ciljevi određene zemlje kao takvi često su rezultat drugih već postojećih ciljeva nacionalne politike i mogu se definirati u različitoj mjeri u vladinim i drugim javnim dokumentima. Domaće energetske politike mogu biti pod utjecajem:

- Politika energetske tranzicije
- Industrijska politika
- Nacionalna politika opskrbe energijom
- Politika državnih prihoda i proračuna
- Kapacitet nacionalne financijske potpore
- Relevantna politika razvoja infrastrukture
- Politika elektroenergetskog kapaciteta
- Regulatorni mehanizmi ¹⁶

Na regionalnoj razini, Europski zeleni dogovor (odobren 2020.) koristan je primjer skupa političkih inicijativa kojima se nastoji podržati prijelaz EU-a na smanjenje emisija stakleničkih plinova do 2050. Očekuje se da će vodik igrati važnu ulogu u postizanju ciljeva EU-a za smanjenje emisija stakleničkih plinova za najmanje 55% do 2030. i postizanje nulte emisije u sljedeća dva desetljeća.

Vodikova strategija EU-a za klimatski neutralnu Europu propisuje ciljeve regije za proizvodnju vodika. To uključuje povećanje kapaciteta za proizvodnju vodika u državama članicama i utvrđuje specifične ciljeve, na primjer obvezu instaliranja najmanje 6GW elektrolizatora obnovljivog vodika u EU do 2024. i 40 GW elektrolizatora obnovljivog vodika do 2030.

U određenoj mjeri, održivost strategije EU-a za zeleni vodik ovisi o temeljnim programima gospodarske potpore. Glavne zakonodavne mjere u tom pogledu uključuju EU paket čiste energije od 2019., paket *Fir for 55* i predloženi paket za vodik i dekarbonizaciju EU Komisije.

¹⁶ United Nations Industrial Development Organization.: *A Hydrogen Economy*, 2023. p. 1373-1384

U eri definiranoj globalnim izazovima i zajedničkim težnjama, međunarodni savezi i predstavljaju moćne instrumente za poticanje transformativnih promjena. U kontekstu gospodarstva vodika, ovi savezi ujedinjuju zemlje, industrije, akademsku zajednicu i civilno društvo kako bi iskoristili potencijal vodika kao temelja održivih energetske sustava.

Međunarodni savezi služe kao središta zajedničkih inovacija, gdje dionici s različitim stručnim znanjima surađuju kako bi ubrzali razvoj i primjenu vodikovih tehnologija. Udruživanjem resursa, znanja i uvida, ovi savezi pojačavaju kolektivni utjecaj, nadilazeći individualna ograničenja i pokrećući tehnološki napredak.

Jedna od temeljnih funkcija međunarodnih saveza je olakšati usklađivanje politika i usklađivanje među zemljama članicama. Razmjenom najboljih praksi, dijeljenjem regulatornih okvira i utvrđivanjem zajedničkih ciljeva, uspostavlja se koherentan pristup integraciji vodika. Ovo usklađivanje smanjuje prepreke ulasku na tržište, potiče prekograničnu trgovinu i osigurava jednake uvjete za industrije u zemljama sudionicama.

Međunarodni savezi služe kao kanali za razmjenu znanja i izgradnju kapaciteta. Zemlje članice imaju koristi od zajedničkih iskustava, naučenih lekcija i najboljih praksi, ubrzavajući svoje krivulje učenja u usvajanju vodikovih tehnologija. Ovi savezi stvaraju plodno tlo za inicijative za izgradnju kapaciteta, tehničku obuku i razvoj vještina, posebno u zemljama s tek začetkom industrije vodika. Zamah koji stvaraju međunarodni savezi privlači ulaganja iz javnog i privatnog sektora. Zajednička predanost prihvaćanju vodika šalje snažan signal ulagačima o dugoročnoj održivosti i potencijalu rasta vodikovog gospodarstva. Ovaj priljev investicijskog kapitala podupire istraživanje, razvoj, razvoj infrastrukture i inovacije, gurajući sektor naprijed.

Savezi igraju ulogu u zagovaranju politika usmjerenih na vodik na nacionalnoj i međunarodnoj razini. Kroz jedinstvene glasove, zemlje članice mogu učinkovito komunicirati o prednostima integracije vodika, pokrećući reforme politika koje olakšavaju istraživanje, razvoj i prodiranje na tržište vodika. Ovi napori zagovaranja jačaju zamah potreban za sustavnu promjenu.

Praktični učinak međunarodnih saveza i koalicija u unapređenju vodikovog gospodarstva najbolje je osvijetljen kroz studije slučaja koje prikazuju njihovo formiranje, ciljeve, postignuća i značaj.

1. Europska alijansa za čisti vodik (ECH2A) predstavlja pionirski model međunarodne suradnje unutar Europske unije (EU). Pokrenut kao dio vodikove strategije EU-a, ECH2A ujedinjuje zainteresirane strane u industriji, vlade, istraživačke institucije i civilno društvo u zajedničkom nastojanju da ubrzaju razvoj i primjenu čistih vodikovih tehnologija.

Ciljevi i utjecaj:

- Međusektorska suradnja: ECH2A potiče međusektorsku suradnju okupljajući dionike iz industrija kao što su energija, transport i industrija. Ovaj multidisciplinarni pristup osigurava da je integracija vodika usklađena s potrebama i prioritetima različitih sektora.
 - Usklađivanje politike: savez igra ključnu ulogu u usklađivanju nacionalnih i regionalnih politika, utirući put za usklađeno regulatorno okruženje koje podržava usvajanje vodika i ulaganja.
 - Poticaj ulaganja: predanost ECH2A robusnom vodikovom ekosustavu služi kao magnet za privatna i javna ulaganja. Njegovi strateški projekti i istraživačke inicijative privlače sredstva, potičući rast europskog sektora vodika.
 - Razvoj inovacija: stvaranjem platforme za dijeljenje znanja, ECH2A ubrzava istraživanje, inovacije i razvoj tehnologije. Projekti suradnje obuhvaćaju područja poput proizvodnje zelenog vodika, distribucijske infrastrukture i primjene gorivih ćelija.¹⁷
2. Nacionalna strategija za vodik SAD-a primjer je kako nacionalne vlade mogu iskoristiti saveze za koordinaciju napora i poticanje inovacija vezanih uz vodik. Strategija koju je pokrenulo Ministarstvo energetike SAD-a naglašava važnost međunarodne suradnje u postizanju globalnih ciljeva energetske tranzicije
- Javno-privatno partnerstvo: strategija naglašava važnost javno-privatnog partnerstva za ubrzanje razvoja i komercijalizacije vodikovih tehnologija. Angažiranjem zainteresiranih strana u industriji, američka vlada koristi zajedničke resurse za poticanje usvajanja vodika.
 - Industrijski i istraživački konzorciji: strategija potiče formiranje konzorcija koji ujedinjuju industrijske igrače, istraživačke institucije i vladina tijela. Ovi konzorciji olakšavaju razmjenu znanja, suradničke projekte i tehnološki napredak koji pridonosi rastu američkog sektora vodika.
 - Istraživanje i inovacije: nacionalna strategija za vodik SAD-a naglašava vrijednost međunarodne istraživačke suradnje, zagovarajući partnerstva koja prelaze granice radi promicanja zajedničkog učenja, ubrzanih inovacija i zajedničkog napretka.

¹⁷ *Global Hydrogen Policy and Regulatory Review, 2022. 1-21*

3. Azijski energetski lanac vodika (AHEC) predstavlja primjer međunarodne suradnje za uspostavljanje lanca opskrbe vodikom. Pokrenut od strane japanskih tvrtki i organizacija, AHEC ima za cilj stvoriti sustav za proizvodnju vodika u Australiji i njegov transport u Japan na korištenje.
- Prekogranična suradnja: AHEC pokazuje kako prekogranična partnerstva mogu iskoristiti regionalne prednosti za uspostavljanje vodikovog ekosustava. Koristeći obilne obnovljive resurse Australije i industrijsku potražnju Japana, inicijativa optimizira proizvodnju i korištenje vodika.
 - Tehnološke inovacije: suradnja potiče tehnološke inovacije, rješavajući izazove u proizvodnji vodika, skladištenju, transportu i korištenju. AHEC je primjer kako savezi mogu potaknuti napredak koji je obostrano koristan za zemlje sudionice.
 - Strateške gospodarske veze: osim tehnoloških aspekata, AHEC jača gospodarske veze između Australije i Japana, poboljšavajući trgovinske odnose i diverzificirajući izvore opskrbe energijom.¹⁸

4.5. USKLAĐIVANJE STANDARDA I PROPISA

U svijetu u kojem vodikove tehnologije nadilaze granice, usklađivanje standarda i propisa pojavljuju se kao okosnica besprijekorne globalne integracije. Raznovrsnost primjena vodika, od proizvodnje do upotrebe, zahtijeva jedinstveni okvir koji osigurava sigurnost, interoperabilnost i širenje tržišta.

Višestruka priroda vodikovih tehnologija (od gorivih ćelija i sustava za pohranu do infrastrukture za punjenje goriva) zahtijeva standardizirane protokole kako bi se osigurala interoperabilnost. Uspostavom zajedničkih tehničkih specifikacija, međunarodna normizacijska tijela poput Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) i Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC) osiguravaju zajednički jezik koji nadilazi geografske granice.

Sigurnost je najvažnija u vodikovom sektoru, a usklađeni standardi igraju ključnu ulogu u osiguravanju sigurne primjene i rada vodikovih tehnologija. Definiranjem sigurnosnih protokola, operativnih smjernica i postupaka ispitivanja, usklađeni standardi smanjuju rizike povezane s proizvodnjom, skladištenjem, transportom i korištenjem vodika. Ovo jamstvo

¹⁸ Global Hydrogen Policy and Regulatory Review, 2022. 1-21

sigurnosti podiže povjerenje javnosti, potiče ulaganja i potiče rast vodikove industrije diljem svijeta.

Usklađivanje standarda proteže se izvan tehničkih specifikacija na regulatornu konvergenciju. Kada zemlje usklade svoje regulatorne okvire s međunarodnim standardima, stvaraju jednake uvjete za prekogranično poslovanje industrija. Ova konvergencija pojednostavljuje pristup tržištu, olakšava prijenos tehnologije i smanjuje regulatorna opterećenja koja bi mogla spriječiti usvajanje vodikovih tehnologija.

Usklađeni standardi i propisi olakšavaju prekograničnu trgovinu robom i tehnologijama povezanim s vodikom. Kada se vodikovi proizvodi pridržavaju dosljednih tehničkih zahtjeva, mogu se neometano kretati globalnim opskrbnim lancima, povećavajući učinkovitost i dostupnost međunarodne trgovine. Ovo olakšavanje trgovine doprinosi gospodarskom rastu, inovacijama i otvaranju radnih mjesta u zemljama sudionicama.

1. ISO/IEC 19800 bavi se sigurnosnim zahtjevima za benzinske postaje za vodik, kritičnu komponentu vodikove infrastrukture za vozila s gorivim ćelijama. Ovi standardi uspostavljaju smjernice za sigurnosno projektiranje, rad i održavanje stanica za punjenje vodikom, osiguravajući dosljedan sigurnosni okvir na globalnoj razini. Ovi standardi pridonose razvoju kohezivne globalne mreže postaja za punjenje vodikom, omogućujući širenje FCV-ova u raznim zemljama.
2. Standardi gorivih ćelija za vozila obuhvaćaju različite aspekte, uključujući skladištenje vodika, komponente vozila i testiranje performansi. Ovi standardi osiguravaju siguran rad, interoperabilnost i kvalitetu FCV-ova na međunarodnim tržištima. Usklađeni standardi za gorive ćelije za vozila pojednostavljuju razvoj i proizvodnju, promičući ekonomiju razmjera i smanjujući troškove za proizvođače automobila. Potrošači imaju koristi od standardiziranih sigurnosnih protokola, osiguravajući dosljedne performanse vozila smanjujući zabrinutost oko kvalitete i sigurnosti vozila.
3. Standardi kvalitete vodika definiraju parametre za čistoću vodika, sadržaj vlage i razine nečistoća, osiguravajući kompatibilnost vodika u različitim primjenama i zemljama. Usklađeni standardi kvalitete vodika omogućuju besprijekornu trgovinu i transport vodika između zemalja, promičući učinkovito globalno tržište vodika. Ovi standardi olakšavaju implementaciju vodikovih tehnologija koje se oslanjaju na dosljednu kvalitetu vodika, kao što su gorive ćelije, povećavajući pouzdanost i performanse sustava.¹⁹

¹⁹ Global Hydrogen Policy and Regulatory Review, 2022. 1-21

5. EKOLOŠKA I EKONOMSKA RAZMATRANJA PRIMJENE VODIKA

U potrazi za održivim energetske rješenjima, uporaba vodika pojavila se kao višestruka paradigma koja nudi i ekološke i ekonomske implikacije. Dok globalna zajednica nastoji odgovoriti na hitne izazove povezane s klimatskim promjenama, degradacijom kvalitete zraka, energetske sigurnošću i gospodarskim rastom, integracija vodika kao čistog i svestranog prijenosnika energije privukla je značajnu pozornost.

Svijet stoji na raskrižju, primoran uravnotežiti imperativ smanjenja emisija stakleničkih plinova i očuvanja prirodnih ekosustava s potrebom održavanja i povećanja ekonomskog prosperiteta. Vodik, sa svojom sposobnošću da omogući puteve čiste energije i promiče održivi razvoj, nudi jedinstveni most između ovih naizgled različitih ciljeva.

5.1. PREDNOSTI VODIKA ZA OKOLIŠ

Vodik, često hvaljen kao kamen temeljac prijelaza na čistu energiju, ima golem potencijal za ublažavanje ekoloških izazova zahvaljujući svom minimalnom utjecaju na okoliš. Ovaj odjeljak bavi se mnogim prednostima za okoliš koje nudi vodik, naglašavajući njegovu ulogu u smanjenju emisija stakleničkih plinova, poboljšanju kvalitete zraka i unapređenju ciljeva održivosti.

Smanjenje emisije stakleničkih plinova korištenjem vodika kao goriva može se zahvaliti nekoliko ključnih segmenata i prednosti koje isto nudi. Važno je napomenuti put nulte emisije. Vodik kada se koristi kao gorivo ili prijenosnik energije, stvara minimalne ili nulte emisije, što ga čini neprocjenjivim alatom u dekarbonizaciji raznih sektora. Druga stavka koja daje prednost vodikom je čisto izgaranje. Izgaranje vodika u motorima ili gorivim ćelijama proizvodi samo vodenu paru kao nusprodukt, zaobilazeći oslobađanje ugljičnog dioksida (CO₂) i drugih štetnih zagađivača. Nadalje zamjenom vodika za fosilna goriva u transportu, industriji i proizvodnji električne energije, emisije CO₂ i drugih stakleničkih plinova su smanjene, pridonoseći naporima za ublažavanje klimatskih promjena.

Kada se vodik proizvodi iz obnovljivih izvora, naziva se „zeleni vodik“. Ovaj naziv znači proizvodnju vodika s minimalnim ili nikakvim izravnim emisijama stakleničkih plinova. Nekoliko je ključnih pojedinosti o niskim emisijama stakleničkih plinova povezanih sa zelenim vodikom. Važno je napomenuti njegov proizvodni proces. Zeleni vodik se prvenstveno proizvodi kroz proces koji se zove elektroliza, u kojem električna struja prolazi kroz vodu

(H₂O) kako bi se razdvojila na vodik (H₂) i kisik (O₂). Ovaj proces je vrlo učinkovit i proizvodi vodik bez izravnih emisija ugljičnog dioksida (CO₂) ili drugih stakleničkih plinova.

Ključ za proizvodnju zelenog vodika je izvor električne energije koji se koristi u procesu elektrolize. Da bi bila doista „zelená“, ova električna energija mora dolaziti iz obnovljivih izvora energije kao što su:

- Solarna energija: solarni paneli pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju, koja se može koristiti za elektrolizu. Ovo je posebno učinkovito u regijama s dovoljno sunčeve svjetlosti.
- Snaga vjetra: vjetroturbine koriste kinetičku energiju vjetra za proizvodnju električne energije, koja se zatim može koristiti za proizvodnju vodika. Vjetroelektrane, posebno one u vjetrovitim područjima, mogu proizvesti značajne količine zelenog vodika.
- Hidroenergija: hidroenergetski objekti koriste energiju tekuće vode za proizvodnju električne energije. To su pouzdani izvori za proizvodnju zelenog vodika, posebno u regijama s obilnim vodnim resursima.
- Geotermalna energija: u područjima s geotermalnom aktivnošću, toplina iz Zemljine jezgre može se koristiti za proizvodnju električne energije.

Jedna od ključnih prednosti zelenog vodika je da kada se koristi kao gorivo, bilo u gorivim ćelijama za vozila ili u industrijskim procesima, stvara nultu izravnu emisiju. Kada vodik sagorijeva ili se koristi u gorivim ćelijama, proizvodi samo vodenu paru kao nusprodukt. Zeleni vodik ima potencijal za dekarbonizaciju sektora koje je teško izravno elektrificirati, kao što su teška industrija (npr. proizvodnja čelika i cementa), prijevoz na duge relacije (npr. kamioni i otprema) i određeni kemijski procesi. Ti se sektori obično oslanjaju na fosilna goriva, ali mogu prijeći na vodik kao čišću alternativu ako se proizvodi na održiv način. Zamjena fosilnih goriva zelenim vodikom u različitim primjenama, doprinosi smanjenju ukupnih emisija stakleničkih plinova, pomažući u borbi protiv klimatskih promjena.

Smanjeno onečišćenje zraka jedna je od značajnih prednosti za okoliš povezanih s korištenjem vodika kao goriva, posebno u primjenama gdje vodik zamjenjuje tradicionalna fosilna goriva. Nekoliko je stavki gdje vodik može pomoći u smanjenju onečišćenja zraka:

- Nulte emisije ispušnih cijevi: kada se vodik koristi kao gorivo u vozilima opremljenim vodikovim gorivim ćelijama, nema emisija iz ispušnih cijevi. To znači da vozila s pogonom na vodikove gorive ćelije tijekom rada ne ispuštaju štetne zagađivače kao što su dušikovi oksidi (NO_x), čestice (PM), ugljični monoksid (CO) ili hlapljivi organski

spojevi (VOC). Ove emisije uvelike pridonose lošoj kvaliteti zraka i imaju štetne učinke na zdravlje, uključujući probleme s dišnim sustavom i kardiovaskularne bolesti.

- Poboljšanje kvalitete zraka u gradovima: korištenje vozila s vodikovim gorivim ćelijama u urbanim područjima može dovesti do poboljšanja kvalitete zraka. Autobusi i kamioni s pogonom na vodik, na primjer, mogu pomoći u smanjenju emisija u gusto naseljenim područjima gdje je kvaliteta zraka problem.
- Smanjeno zagađenje bukom: vozila s vodikovim gorivim ćelijama tiša su od vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem. Ovo smanjenje zagađenja bukom može biti posebno korisno u urbanim sredinama, gdje buka od prometa može imati negativan utjecaj na dobrobit stanovnika.
- Čišći industrijski procesi: u industrijskim okruženjima, vodik može zamijeniti fosilna goriva kao sirovina ili izvor energije. Na primjer, u proizvodnji kemikalija i rafiniranju, vodik može zamijeniti prirodni plin, smanjujući emisije povezane s tim procesima.
- Proizvodnja električne energije: vodik se može koristiti kao čisto gorivo u elektranama za proizvodnju električne energije. Kada vodik sagorijeva u plinskoj turbini, proizvodi samo vodenu paru kao nusprodukt. Ovo može biti osobito vrijedno u područjima sa strogim propisima o kvaliteti zraka, jer eliminira emisiju onečišćujućih tvari koje mogu pridonijeti smogu i kiseloj kiši.
- Smanjenje emisija u pomorskom i zračnom prometu: vodik ima potencijal igrati ulogu u smanjenju emisija u pomorskom i zračnom sektoru, koji se tradicionalno uvelike oslanja na fosilna goriva. Brodovi i zrakoplovi na vodikov pogon ne proizvode izravne emisije, što pomaže u smanjenju utjecaja ovih načina prijevoza na okoliš.
- Prijelaz s ugljena: u regijama gdje je ugljen dominantan izvor energije, vodik se može koristiti kao čisto gorivo za zamjenu ili dopunu ugljenu u proizvodnji električne energije. To može značajno smanjiti emisije sumpornog dioksida (SO₂), dušikovih oksida (NO_x) i čestica povezanih sa izgaranjem ugljena.

Prednosti vodika za okoliš nadilaze smanjenje emisija. Oni obuhvaćaju poboljšanu kvalitetu zraka, sinergiju skladištenja energije s obnovljivim izvorima energije i potencijal za dekarbonizaciju inače izazovnih sektora. Prihvatanjem vodika kao nositelja energije, društva mogu zacrtati put prema održivoj energetskej budućnosti koja ograničava degradaciju okoliša i potiče skladan suživot između ljudske aktivnosti i prirodnog svijeta.²⁰

²⁰ Nowotny, J., Veziroglu, T.,N.: Impact of hydrogen on the environment, 2011. p.8

Tablica 1. Usporedba goriva s ekološkog aspekta

Vodik	Fosilno gorivo	Električne baterije
Nulta emisija stakleničkih plinova	Stvara CO ₂ , metan i druge stakleničke plinove	Nulta emisija
Poboljšana kvaliteta zraka	Ispušta NO _x i zagađivače	Nema lokalnih emisija
Smanjeno zagađenje bukom	Bučni motori s izgaranjem	Tihi rad
Održivo korištenje resursa	Iscrpljuje neobnovljive resurse	Učinkovito korištenje obnovljivih izvora
Minimalni utjecaj na prirodne ekosustave	Vađenje nafte i uništavanje zemljišta	Minimalni utjecaj
Potencijal za ublažavanje klimatskih promjena	Doprinosi globalnom zatopljenju	Potencijal za ublažavanje klimatskih promjena
Niži utjecaj na okoliš	Degradacija okoliša	Smanjeni utjecaj na okoliš
Diverzifikacija resursa	Ograničeni izvori goriva	Različiti izvori energije
Dugoročna održivost	Konačne rezerve i iscrpljenost	Održiva energija budućnosti
Očuvanje biološke raznolikosti	Narušavanje staništa i onečišćenje	Manji utjecaj na biološku raznolikost

Izvor: Izradio student prema „Impact of hydrogen on the environment“; J.Nowotny, T.N.Veziroglu; October 2011. (24.08.2023.)

5.2. EKONOMSKA ISPLATIVOST VODIKA

Kako se društva okreću prema održivim energetske rješenjima, ekonomska izvedivost integracije vodika kao prijenosnika energije zauzima središnje mjesto. Važna je dinamika troškova, tržišna konkurentnost, potencijal za otvaranje radnih mjesta i transformacijski potencijal industrija koje se temelje na vodik.

Ekonomska isplativost vodika kao nositelja energije i goriva ovisi o različitim čimbenicima, uključujući način proizvodnje, razvoj infrastrukture i potražnju na tržištu. Nekoliko je ključnih točaka koje treba razmotriti.

1. Metoda proizvodnje:

- Sivi vodik: sivi vodik, proizveden iz prirodnog plina kroz parni reforming metana (SMR) bez skladištenja ugljika (CCS), često najjeftinija metoda ali sa

značajnim emisijama ugljika. Na njegovu ekonomsku održivost mogu utjecati cijena prirodnog plina i politika određivanja cijena ugljika.

- Plavi vodik: plavi vodik se proizvodi iz prirodnog plina uz CCS, čime se smanjuju emisije ugljika. Ekonomska izvedivost ovisi o cijeni CCS tehnologije, koja uključuje transport i skladištenje CO₂. Državni poticaji i cijene ugljika mogu utjecati na profitabilnost plavog vodika.
 - Zeleni vodik: zeleni vodik, proizveden iz obnovljivih izvora energije putem elektrolize, smatra se ekološki najprihvatljivijim, ali može biti i najskuplji zbog cijene infrastrukture za obnovljivu energiju i opreme za elektrolizu. Međutim, kako se troškovi obnovljive energije smanjuju i ostvaruje se ekonomija razmjera, očekuje se da će zeleni vodik postati ekonomski konkurentniji.
2. Razvoj infrastrukture: uspostavljanje vodikove infrastrukture, uključujući proizvodnju, skladištenje, transport i stanice za punjenje goriva, zahtijeva značajna ulaganja unaprijed. Ekonomska isplativost vodika ovisi o razmjeru i opsegu razvoja infrastrukture. Vlade često igraju ključnu ulogu u subvencioniranju ili poticanju razvoja vodikove infrastrukture putem bespovratnih sredstava, poreznih poticaja i regulatorne potpore.
 3. Tržišna potražnja: ekonomska isplativost vodika ovisi o potražnji na tržištu. Sektori kao što su transport, industrija i proizvodnja električne energije moraju imati sve veću zainteresiranost za vodik kako bi podržali svoju ekonomsku održivost. Vladine politike i propisi mogu potaknuti potražnju kroz mandate, subvencije ili ciljeve smanjenja emisija. Tehnologije u nastajanju poput vozila na vodikove gorive ćelije i industrijskih procesa koji se temelje na vodikom mogu potaknuti potražnju za vodikom ako postanu troškovno konkurentni postojećim alternativama.
 4. Troškovna konkurentnost: kako bi se postigla ekonomska isplativost, vodik mora biti konkurentan postojećim gorivima i tehnologijama. To zahtijeva stalna smanjenja troškova u proizvodnji vodika, skladištenju i transportu. Kako se ostvaruje tehnološki napredak i ekonomija razmjera, očekuje se smanjenje troškova proizvodnje i korištenja vodika.
 5. Integracija s obnovljivom energijom: vodik može igrati ulogu u integraciji obnovljivih izvora energije skladištenjem viška energije kada ponuda premašuje potražnju i oslobađanjem kada je to potrebno. To može povećati ekonomsku vrijednost obnovljive energije i podržati profitabilnost vodika.

6. Dugoročno planiranje: ulaganja u vodikove projekte često zahtijevaju dugoročno planiranje i obveze. Osiguravanje profitabilnosti vodika može uključivati strateška partnerstva i sporazume između vlada, industrija i energetske tvrtke.
7. Regionalne varijacije: ekonomska isplativost vodika može varirati ovisno o regiji zbog razlika u dostupnosti resursa, troškovima energije i regulatornim okruženjima. Vodikovi projekti moraju uzeti u obzir lokalne čimbenike kada procjenjuju svoju isplativost.
8. Otvaranje radnih mjesta: sektor vodika ima potencijal za otvaranje radnih mjesta, kako u proizvodnji vodika tako i u industrijama koje koriste vodik kao sirovinu ili gorivo. Otvaranje novih radnih mjesta može biti čimbenik u procjeni ekonomske koristi vodikovih projekata.²¹

Uloga vodika kao izvozne robe sve se više prepoznaje, stvarajući nove puteve za trgovinu i stvaranje prihoda. Zemlje bogate obnovljivim izvorima mogu iskoristiti izvoz vodika kako bi poboljšale ekonomsku otpornost.

Ekonomska održivost vodika nadilazi lokalizirana razmatranja, pokrećući širu transformaciju energetske tržišta. Kako integracija vodika uzima zamah, ona inherentno preoblikuje dinamiku cijena i odnose ponude i potražnje. Pojava vodika kao nositelja energije predstavlja izgled za diverzifikaciju energetske portfelja i ublažavanje nestabilnosti tržišta.

Sinergija između vodika i obnovljivih izvora pojavljuje se kao kamen temeljac ekonomske održivosti. Budući da proizvodnja obnovljive energije doživljava fluktuacije zbog vremenskih prilika, vodik napreduje kao neprocjenjivo rješenje za skladištenje viška energije tijekom nestašica. Ovaj inovativni pristup ne samo da sprječava smanjenje obnovljive energije, već i jača stabilnost mreže nudeći dinamičan spremnik energije. Naknadna primjena vodika u raznim sektorima, kao što su proizvodnja električne energije i industrijski procesi, poboljšava ukupnu ekonomiju integracije obnovljivih izvora energije.

²¹ Li, Y., Taghizadeh-Hesary, F.: *The economic feasibility of green hydrogen and fuel cell electric vehicles for transport in China, 2022. p.34-41*

6. PRIMJENA VODIKA KAO GORIVA

U potrazi za čistim i održivim energetska rješenjima, vodik se pojavljuje kao obećavajući izvor goriva koji ima potencijal transformirati energetska krajolik. Sa svojom izuzetnom gustoćom energije, izgaranjem bez emisija i različitim primjenama, vodik nudi put za rješavanje nekih hitnih izazova koje postavljaju potrošnja fosilnih goriva i emisije stakleničkih plinova. Dok se svijet nalazi na pragu globalne tranzicije prema čistim energetska sustavima, praktična i djelotvorna integracija vodika kao goriva u različitim sektorima od najveće je važnosti. Ovo poglavlje odnosi se na primjenu vodika kao goriva, istražujući njegovu upotrebu od pogona vozila do osiguranja energije za stacionirane primjene i industrijske procese.

6.1. TEHNOLOGIJA VOZILA S GORIVIM ĆELIJAMA

Tehnologija vozila s gorivim ćelijama predstavlja pionirski pristup održivom prijevozu, nudeći mobilnost bez emisija koja se pokreće pretvorbom vodika u električnu energiju putem elektrokemijskih reakcija.

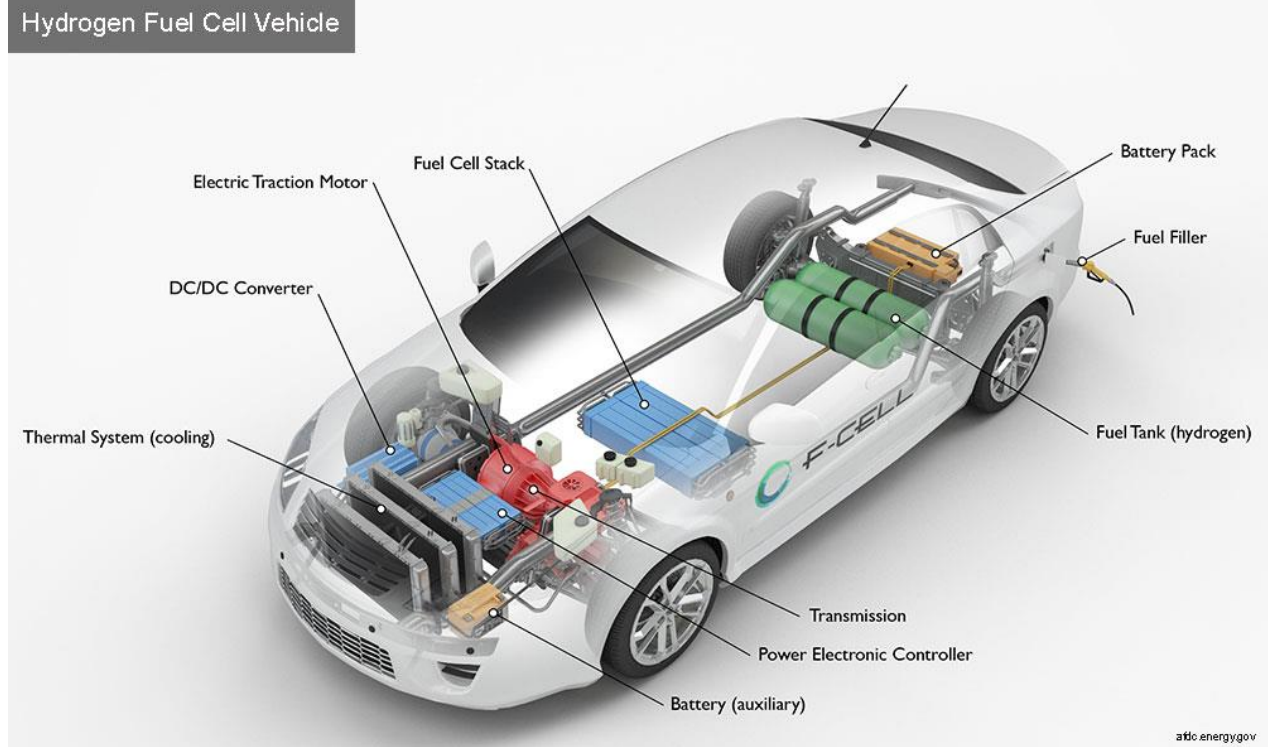
U središtu vozila s gorivnim ćelijama nalazi se sklop gorivih ćelija-skup pojedinačnih ćelija u kojima vodik i kisik prolaze kroz elektrokemijske reakcije za proizvodnju električne energije. Rad gorive ćelije može se opisati kroz tri faze:

1. Oksidacija vodika (anoda): plinoviti vodik ulazi na stranu anode sklopa gorivih ćelija. Ovdje se molekule vodika dijele na protone i elektrone u procesu poznatom kao oksidacija vodika. Protoni prolaze kroz membranu elektrolita, dok se elektroni usmjeravaju kroz vanjski krug, stvarajući električnu struju.
2. Protok elektrona (vanjski krug): protok elektrona kroz vanjski krug čini električnu struju vozila, koja pokreće električni motor i pokreće vozilo.
3. Redukcija kisika (katoda): na katodnoj strani dimnjaka, kisik iz zraka reagira s protonima i elektronima, kombinirajući se i stvarajući vodenu paru kao jedinu emisiju. Ovaj elektrokemijski proces proizvodi elektricitet i toplinu

Ključne komponente električnog automobila s vodikovim gorivim ćelijama (slika 12.):

- *Battery (auxiliary)*-baterija (pomoćna): u vozilu s električnim pogonom, niskonaponski pomoćni akumulator daje električnu energiju za pokretanje automobila prije nego što se uključi pogonski akumulator; također napaja dodatnu opremu vozila.
- *Battery pack*-paket baterija: ova visokonaponska baterija pohranjuje energiju generiranu regenerativnim kočenjem i osigurava dodatnu snagu električnom motoru.
- *DC/DC converter*- DC/DC pretvarač: ovaj uređaj pretvara više-naponsku istosmjernu struju iz pogonske baterije u niženaponsku istosmjernu struju potrebnu za rad dodatne opreme vozila i ponovno punjenje pomoćne baterije.
- *Electric traction motor* (FCEV)-električni vučni motor (FCEV): koristeći snagu iz gorive ćelije i pogonske baterije, ovaj motor pokreće kotače vozila. Neka vozila koriste motor generatore koji obavljaju i pogon i regeneraciju.
- *Fuel cell stack*-sklop gorivih ćelija: sklop pojedinačnih membranskih elektroda koje koriste vodik i kisik za proizvodnju električne energije.
- *Fuel filler*-punjenje goriva: mlaznica za gorivo pričvršćuje se na spremnik na vozilu za punjenje spremnika
- *Fuel tank (hydrogen)*-spremnik goriva (vodik): pohranjuje plin vodik u vozilu dok ga ne zatreba goriva ćelija
- *Power electronics controller* (FCEV)-kontroler energetske elektronike (FCEV): ova jedinica upravlja protokom električne energije koju isporučuju gorivne ćelije i vučna baterija, kontrolirajući brzinu električnog vučnog motora i okretni moment koji proizvodi.
- *Thermal system (cooling)*-toplinski sustav (hlađenje): Ovaj sustav održava pravilan radni temperaturni raspon gorive ćelije, elektromotora, energetske elektronike i ostalih komponenti.
- *Transmission (electric)*-prijenos (električni): prenosi mehaničku snagu od električnog vučnog motora za pogon kotača

Slika 14. Komponente električnog automobila s vodikovim gorivim ćelijama



Izvor: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work> (23.08.2023.)

Nekoliko je prednosti električnih vozila na gorive ćelije (FCEV), one se očituju kroz nulte emisije ispušnih plinova, dug domet vožnje, brzo punjenje gorivom i učinkovitost. FCEV proizvodi samo vodenu paru kao nusprodukt, pridonoseći poboljšanoj kvaliteti zraka i smanjenoj emisiji stakleničkih plinova. Visoka gustoća energije vodika omogućuje FCEV vozilima da postignu duži domet vožnje u usporedbi s električnim vozilima na baterije. Vrijeme punjenja vodikom usporedivo je s konvencionalnim punjenjem benzinom i traje samo nekoliko minuta. Sustavi gorivih ćelija mogu postići više razine učinkovitosti od motora s unutarnjim izgaranjem.

Usprkos svim navedenim prednostima ovog načina korištenja vodika, važno je napomenuti kako je potrebno riješiti brojne izazove i ostvariti napredak u raznim poljima da bi se korištenje vodika u transportu povećalo. Širenje infrastrukture za punjenje vodikom ključno je za omogućavanje široke primjene FCEV-a. Razvoj održivih metoda proizvodnje vodika s niskim udjelom ugljika ključan je za ostvarivanje ekoloških prednosti. Isto tako napredak u materijalima, proizvodnim procesima i ekonomiji razmjera potrebni su za smanjenje troškova

FCEV komponenti. Poboljšanje izdržljivosti i dugovječnosti sklopova gorivih ćelija ključno je za produljenje ukupnog vijeka trajanja vozila.²³

Tehnologija vozila s gorivim ćelijama predstavlja revolucionarni napredak u održivom prijevozu. Iskorištavanjem elektrokemijskog potencijala vodika za proizvodnju električne energije, FCEV nudi uvjerljivo rješenje za rješavanje problema urbane kvalitete zraka, smanjenje emisija ugljika i poticanje automobilske industrije prema održivijoj budućnosti.

6.2. KAMIONI S VODIKOVIM GORIVIM ĆELIJAMA

Teški prijevoz, koji uključuje kamione i teretna vozila, predstavlja značajan doprinos globalnoj emisiji stakleničkih plinova. Integracija vodika kao goriva u ovom sektoru ima potencijal, nudeći čistu i održivu alternativu tradicionalnim vozilima s dizelskim motorom.²⁴

Izazovi u prijevozu teških tereta su smanjenje emisija i potražnja za energijom. Teška vozila s dizelskim motorima poznata su po svojim značajnim emisijama čestica, dušikovih oksida i ugljičnog dioksida, što zahtijeva čišće alternative. Isto tako teški prijevoz zahtijeva veću izlaznu energiju od lakih vozila, što veliku gustoću energije vodika čini kao prednost.

Kamioni s vodikovim gorivnim ćelijama predstavljaju revolucionarnu inovaciju u sektoru prijevoza teških tereta, nudeći rješenje za rješavanje ekoloških i operativnih izazova s kojima se suočavaju tradicionalni kamioni na dizelski pogon. Kako potražnja za učinkovitim, čistim i održivim prijevozom tereta raste, kamioni s vodikovim gorivnim ćelijama pojavljuju se kao obećavajuća tehnologija s potencijalom da unaprijedi logistiku na dugim relacijama.

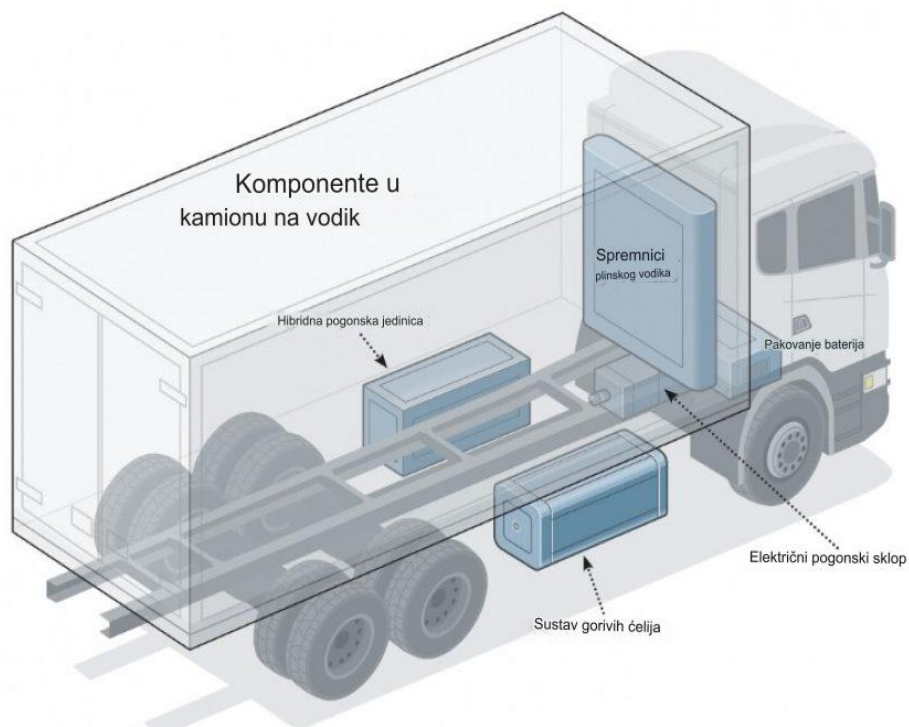
Nekoliko je ključnih dijelova tehnologije ovih vrsta kamiona (slika 13.). Jedna od njih je sustav gorivih ćelija. Kamioni s vodikovim gorivim ćelijama koriste sustav gorivih ćelija za pretvaranje plinovitog vodika u električnu energiju. Električna energija pokreće električni motor koji pokreće vozilo. Zatim važno je i skladištenje vodika. Komprimirani vodikov plin pohranjuje se u spremnike na kamionu, obično izrađene od naprednih materijala koji osiguravaju sigurnost i učinkovitost. Električni motor daje okretni moment i snagu za pogon kamiona, doprinoseći glatkom i tihom radu. Važno je napomenuti da je jedini nusprodukt sustava gorivih ćelija vodena para, što kamione s vodikovim gorivim ćelijama čini bez emisija tijekom rada.²⁵

²³ *How do fuel cell electric vehicles work using hydrogen*, U.S. Department of Energy, 2022

²⁴ Wilmer, G.: *Heavy-duty trucks drive clean hydrogen to the next level*, 2020 p.17

²⁵ *How does a hydrogen fuel cell electric truck work*, Scania, 20 January 2020.

Slika 15. Komponente u kamionu na vodik



Izvor: <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2020/how-does-a-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-work.html> (23.08.2023.)

Prednosti kamiona s vodikovim gorivnim ćelijama:

1. Smanjenje emisija: kamioni s vodikovim gorivnim ćelijama proizvode nulte emisije iz ispušnih cijevi, smanjujući onečišćenje zraka i smanjujući ugljični otisak industrije kamiona.
2. Dugi domet vožnje: visoka gustoća energije vodika omogućuje produženi domet vožnje, čineći kamione na vodikove gorive ćelije prikladnima za dugo-linijski teretni prijevoz.
3. Brzo punjenje gorivom: vrijeme punjenja vodikom usporedivo je s punjenjem dizelskog goriva, što smanjuje vrijeme zastoja i povećava radnu učinkovitost.
4. Kapacitet korisne nosivosti: kompaktna priroda skladišta vodika omogućuje kamionima s vodikovim gorivim ćelijama da nose velike količine tereta bez ugrožavanja učinkovitosti.

5. Tihi rad: kamioni s vodikovim gorivnim ćelijama rade tiho, smanjujući zagađenje bukom u urbanim i stambenim područjima.²⁶

U svijetu postoji nekoliko primjera stvarne primjene kamiona pokretanih uz pomoć energije vodika. Jedan od njih je Nikola Motors` Tre odnosno kamion s vodikovim gorivnim ćelijama. Može se pohvaliti impresivnim specifikacijama, uključujući velik domet vožnje i brzo punjenje gorivom. Hyundaijev Xcient Fuel Cell kamion još je jedan primjer, sa stvarnim primjenama u Švicarskoj i planovima za proširenje. Suradnje između proizvođača kamiona, logističkih tvrtki i vlada olakšavaju pilot programe i ispitivanje kamiona s vodikovim gorivnim ćelijama u raznim regijama.

Slika 16. Xcient Fuel Cell kamion



Izvor: <https://www.trucksales.com.au/editorial/details/hyundai-updates-xcient-fuel-cell-truck-130111/>
(23.08.2023.)

6.3. AUTOBUSI NA VODIKOV POGON

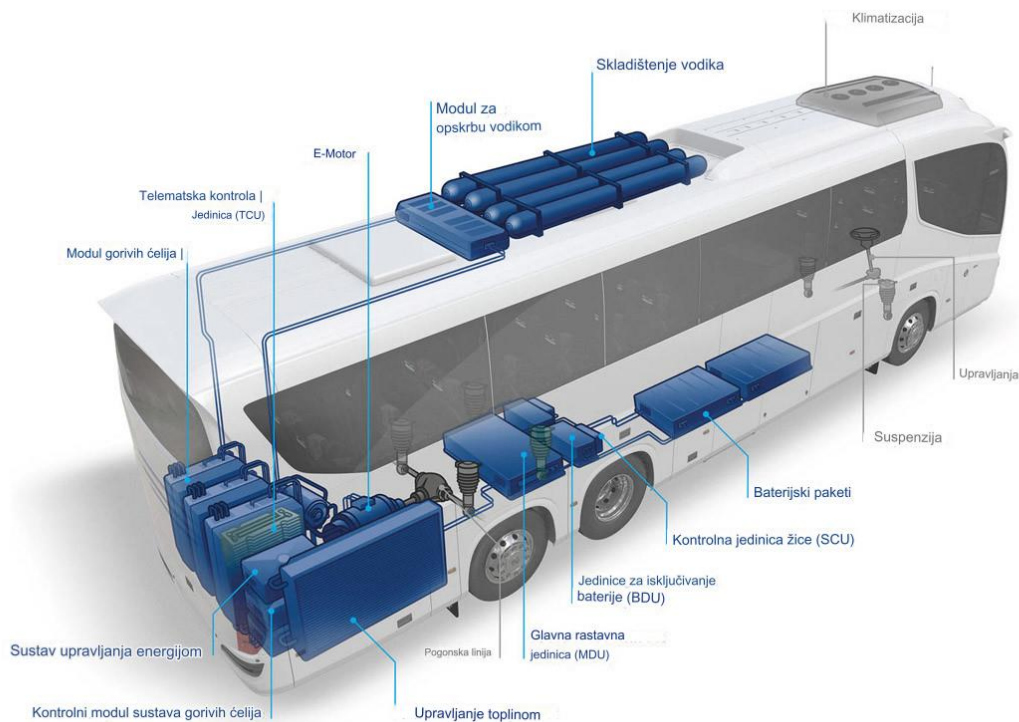
Autobusi na vodik predstavljaju početni napredak u sektoru javnog prijevoza, nudeći čistu, tihu i ekološki prihvatljivu alternativu tradicionalnim autobusima na dizelski pogon. Dok urbana središta nastoje poboljšati kvalitetu zraka, smanjiti zagađenje bukom i prijeći na održiva prijevozna rješenja, autobusi na vodik pojavljuju se kao obećavajuća tehnologija koja rješava te izazove.

Nekoliko je bitnih dijelova tehnologije koju koriste ove vrste autobusa (slika 14.), iako vrlo slični kamionima na pogon vodika, ipak postoji razlika. Autobusi s pogonom na vodik koriste sustav gorivih ćelija koji pretvara vodikov plin u električnu energiju. Ova struja pokreće

²⁶ Scania.: *How does a hydrogen fuel cell electric truck work, 2020*

elektromotor koji pokreće autobus. Komprimirani vodikov plin pohranjuje se u spremnike u autobusu. Ovi spremnici su dizajnirani imajući na umu sigurnost i učinkovitost. Nadalje električni motor pokreće autobus, nudeći glatki i tihi rad bez emisije ispušnih plinova. Jedini nusprodukt kao i kod kamiona je vodena para, što i ovu vrstu transporta čini pogodnom za okoliš.²⁷

Slika 17. Komponente autobusa na vodikov pogon



Izvor: <https://tomorrow.city/a/roads-with-less-fumes-hydrogen-fuel-cell-buses-for-long-distance-routes>
(23.08.2023.)

Prednosti autobusa na vodikov pogon:

1. **Smanjenje emisija:** autobusi s pogonom na vodik ne proizvode emisije ispušnih plinova, što pridonosi poboljšanoj kvaliteti zraka i smanjenoj emisiji stakleničkih plinova u urbanim područjima.
2. **Smanjenje buke:** autobusi na vodik rade tiho, smanjujući zagađenje bukom u gusto naseljenim urbanim sredinama.
3. **Dugi radni vijek:** autobusi na vodikov pogon obično imaju duži vijek trajanja u usporedbi s tradicionalnim dizelskim autobusima.

²⁷ Roads with less fumes: Hydrogen fuel cell buses for long-distance routes; Patricia M.Liceras, January 2020.

4. Regenerativno kočenje: sustav regenerativnog kočenja pretvara kinetičku energiju u električnu energiju, povećavajući energetska učinkovitost i smanjujući trošenje kočnica.
5. Smanjena potrošnja energije: autobusi na vodik nude veću energetska učinkovitost i smanjenu potrošnju energije u usporedbi s autobusima s motorom s unutarnjim izgaranjem.

Nekoliko europskih gradova, uključujući London, Hamburg, Koln, uveli su autobuse na vodik u svoj javni prijevoz. Japan je bio pionir u autobusima na vodikov pogon, uvodeći ih u gradove poput Tokija i Kyota. Da bi se njihova upotreba povećala u odnosu na današnje stanje potrebno je osigurati širenje infrastrukture, odnosno, rast infrastrukture za punjenje vodikovim gorivom ključan je za široku primjenu autobusa s pogonom na vodik. Isto tako napredak u tehnologiji gorivih ćelija, skladištenje vodika i integracija će povećati učinkovitost i pristupačnost sustava vodikovih autobusa. Postizanje konkurentnosti troškova s konvencionalnim autobusima kroz ekonomiju razmjera i tehnološki napredak ključni je cilj.

Slika 18. Autobus na vodikov pogon

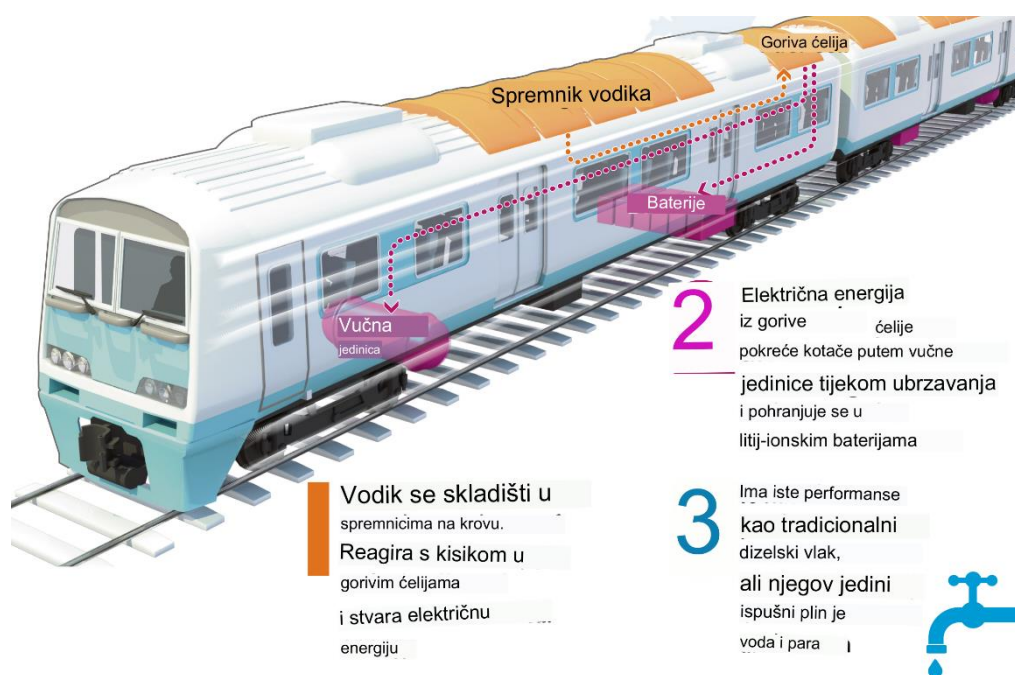


Izvor: <https://thepointer.com/article/2020-10-13/mississauga-councillors-consider-hydrogen-bus-pilot-diesel-jeopardizing-city-s-climate-targets> (23.08.2023.)

6.4. VLAKOVI S VODIKOVIM GORIVIM ČELIJAMA

U transportu, hydrail je pojam koji opisuje sve oblike željezničkih vozila, velikih ili malih, koji koriste ugrađeno vodikovo gorivo kao izvor energije za pogon vučnih motora, ili pomoćnih uređaja, ili oboje. Vlakovi na vodikove gorive ćelije predstavljaju inovativno i ekološki prihvatljivo rješenje za sektor željezničkog prometa. Ove vlakove pokreću vodikove gorivne ćelije koje proizvode električnu energiju kemijskom reakcijom između vodika i kisika, a jedini nusprodukt je vodena para. Raširena uporaba vodika za gorivo željezničkog prometa osnovni je element ekonomije vodika.

Slika 19. Vlakovi na vodikove gorive ćelije



Izvor: <https://www.thetimes.co.uk/article/hydrogen-fuel-cell-trains-herald-new-steam-age-mdf78f2dk>

(15.9.2023.)

Prednosti vlakova s vodikovim gorivim ćelijama:

1. Nulta emisija: jedna od primarnih prednosti vlakova s vodikovim gorivim ćelijama je ta da proizvode nultu izravnu emisiju. To ih čini ekološki prihvatljivom opcijom i atraktivnim izborom za regije sa strogim propisima o emisijama i predanošću smanjenju onečišćenja zraka.
2. Smanjena buka: vlakovi s vodikovim gorivnim ćelijama tiši su u usporedbi s vlakovima na dizelski pogon. Ovo smanjenje zagađenja bukom posebno je korisno u urbanim područjima i za putnike koji cijene tišu i udobniju vožnju.

3. Domet i brzina: vlakovi na vodik imaju potencijal za velike domete i modu održavati velike brzine, što ih čini prikladnima za regionalne i međugradske željezničke usluge. Mogu prijeći slične udaljenosti kao i tradicionalni dizelski vlakovi bez potrebe za dugim punjenjem. Ovi vlakovi imaju domet od 1000 kilometara između punjenja gorivom što je deset puta više od električnih vlakova na baterije. Centralizirane stanice za punjenje vodikom moraju biti samo unutar 1000 kilometara jedna od druge.
4. Brzo punjenje gorivom: punjenje goriva u vlak na vodik relativno je brzo, obično traje oko 15-20 minuta. To je usporedivo s vremenom potrebnim za punjenje goriva dizelskih vlakova, što je ključno za održavanje učinkovitih rasporeda i operacija.²⁸

Nekoliko država prednjači u implementaciji i inicijativi za korištenje ove vrste vlakova. Jedna od njih je Njemačka (*Coradia iLint*). *Coradia iLit*, razvila je *Alstom*, to je prvi putnički vlak na svijetu koji pokreću vodikove gorivne ćelije. Uveden je u Lower Saxony u Njemačkoj i od tad se koristi za regionalne željezničke usluge.

UK također istražuje vlakove na vodik. *HydroFLEX*, koji su razvili Porterbrook i Sveučilište u Birminghamu, projekt je konverzije vodika za postojeće vlakove. Prošla je uspješna ispitivanja, a vlada Ujedinjenog Kraljevstva izrazila je interes za usvajanje ove tehnologije.

Japan aktivno razvija i testira vlakove na vodikove gorive ćelije kao dio svojih napora za smanjenje emisija i promicanje čistih tehnologija prijevoza.

Infrastruktura i izazovi:

1. Vodikova infrastruktura: za podršku vlakovima s vodikovim gorivim ćelijama mora se uspostaviti infrastruktura za punjenje vodikom. To uključuje izgradnju stanica za opskrbu gorivom i skladišta duž željezničkih ruta.
2. Trošak: vlakovi na vodikove gorive ćelije trenutno su skuplji za proizvodnju od tradicionalnih dizel vlakova. Međutim, kako se proizvodnja povećava i tehnologija napreduje, očekuje se smanjenje troškova.
3. Opskrba vodikom: osiguravanje pouzdanog lanca opskrbe vodikom je ključno. To uključuje proizvodnju, transport i skladištenje vodikovog goriva, koje mora biti spremno i dostupno za podršku operacijama vlakova.

²⁸ Hydrogen Trains: The Railroad Revolution of the 21st Century; Terry Howe, May.13.2021.

4. Sigurnost: za rukovanje i skladištenje vodika moraju postojati odgovarajuće sigurnosne mjere. Iako je vodik općenito siguran, zapaljiv je i zahtijeva odgovarajuće sigurnosne protokole.²⁹

Budućnost vlakova na vodikove gorive ćelije izgleda obećavajuće jer sve više regija i zemalja nastoji smanjiti emisije štetnih plinova iz svojih prometnih sektora. Ovi su vlakovi posebno prikladni za regije s razgranatom željezničkom mrežom i posvećenošću čistoj energiji. S napretkom tehnologije i ostvarenjem ekonomije razmjera, očekuje se pad cijene vlakova s vodikovim gorivim ćelijama, čineći ih konkurentnom i održivom alternativom tradicionalnim lokomotivama na dizelski pogon. Uz stalna ulaganja u infrastrukturu i istraživanje, vlakovi s vodikovim ćelijama imaju potencijal igrati značajnu ulogu u prijelazu na čistije i održivije sustave željezničkog prijevoza diljem svijeta.

6.5. POMORSKI PROMET

Vodik nudi značajan potencijal za unapređenje dekarbonizacije pomorskog sektora i podršku za prijelaz na alternativne čiste izvore energije diljem svijeta. Luke mogu predvoditi napore u pomorstvu za poticanje integriranog pristupa koji pokreće odmak od fosilnih goriva. Taj pristup se odnosi na pitanja kako povećati korištenje čiste energije u lučkim poslovima i pogonu plovila te kako uspostaviti proizvodnju i distribucijske sposobnosti za razvoj lanca opskrbe vodikom.

Postoji više načina za korištenje energije vodika u pomorstvu i lučkoj industriji. Luke mogu potaknuti razvoj vodikovih čvorišta tako da postanu međunarodni centri za proizvodnju vodika, primjenu, uvoz i transport u druge zemlje. Vodikova čvorišta mogu se definirati kao prostor u kojem su smješteni različiti korisnici vodika kako u industriji, transportu tako i u energetske tržišta. Čvorišta pomažu smanjiti troškove infrastrukture i podržati ekonomiju razmjera u proizvodnji i isporuci vodika kupcima kao i olakšavanje međusektorskih mogućnosti za inovacije i suradnju. Razvoj vodikovih čvorišta dobiva zamah u cijelom svijetu, kao što pokazuju nedavni zajednički napori:

- U Europi, luka Rotterdam planira koristiti vodik uvezen iz različitih mjesta širom svijeta, kao što su Latinska Amerika, Bliski istok, Sjeverna Afrika i Australija, za opskrbu Europe vodikom. Uprava luke Rotterdam i mnoge lučke

²⁹ Hydrogen Trains: The Railroad Revolution of the 21st Century; Terry Howe, May.13.2021.

tvrtke pripremaju se za izgradnju infrastrukture potrebne za cjelovit sustav lokalne i međunarodne ponude i potražnje, razvoj Rotterdama kao jednog od europskih vodikovih čvorišta. U susjednoj Belgiji, luke Antwerpen i Zeebrugge potpisali su Memorandum o razumijevanju (MoU) s vladom Čilea koji će uspostaviti koridor za ubrzanje protoka zelenog vodika između Južne i Zapadne Amerike sa Europom.

- U Sjevernoj Americi, Apex Clean Energy, Ares, EPIC Midstream i PCCA (Port of Corpus Christi) istražuju razvoj proizvodnje zelenog vodika, uključujući novi cjevovod u američkoj luci Corpus Christi u državi Texas.
- U Australiji, luka Newcastle surađuje s Macquarie Groups Green Investment Group i Australskom agencijom za obnovljivu energiju vlade Commonwealtha kako bi podržali razvoj zelenog vodikovog čvorišta u luci.
- U Japanu, luka Kobe istražuje potencijal korištenja vodika i amonijaka pod vladinom strategijom da se uspostavi kao ugljično neutralna luka do 2050. godine. Luka nastoji razviti infrastrukturu za uvoz, skladištenje i opskrbu vodika za ciljano pokretanje 2030. godine kao dio nastojanja da se pomogne predloženi prijenos goriva unutar luke i susjednih područja.³⁰

Primjena vodika u pomorskom prometu:

1. Vodikove gorivne ćelije za pogon: vodikove gorivne ćelije mogu se koristiti za napajanje električnih pogonskih sustava na brodovima. U ovoj postavci vodik se dovodi u gorive ćelije, gdje reagira s kisikom iz zraka i proizvodi električnu energiju za pogon električnih motora. Jedini nusprodukt je vodena para, što ovu pogonsku tehnologiju čini nultom emisijom.
2. Gorivne ćelije za pomoćnu snagu: osim primarne propulzije, vodikove gorivne ćelije mogu osigurati pomoćnu energiju na brodovima. One mogu zamijeniti konvencionalne generatore i osigurati električnu energiju za rasvjetu. Navigaciju i druge sustave.
3. Vodik kao produživač dometa: vodik se može koristiti u kombinaciji s baterijama ili drugim sustavima za pohranu energije kako bi se produžio domet i izdržljivost električnih brodova. Vodik se može skladištiti i koristiti prema potrebi, što ga čini vrijednim prijenosnikom energije.³¹

³⁰ Hydrogen-green superhero cleared for take-off; J.Smith, O.Antonenko, J.Larsen, April 16,2021.

³¹ Hydrogen in Maritime: Opportunities and challenges; J.Matthe, J. Pooja, J. Jonathan, 2022.

Nekoliko je primjera država koje razvijaju sustave prijevoza i korištenja vodika u plovilima. Jedan takav primjer je Norveška, koja je pionir u pomorskom prometu na vodik. Razvila je nekoliko trajekata na vodikov pogon i planira proširiti svoju vodikovu infrastrukturu za podršku tim plovilima. Japan istražuje brodove s pogonom na vodik i pokrenuo je projekte za razvoj plovila s pogonom na gorive ćelije, uključujući istraživački brod i mali putnički brod. Projekt HySeas III u Ujedinjenom Kraljevstvu ima za cilj razviti trajekt na vodikove gorive ćelije za korištenje na škotskom otočju Orkney.

Vodik ima potencijal igrati značajnu ulogu u smanjenju emisija i poboljšanju održivosti pomorskog prometa. Iako postoje izazove koje treba prevladati, tekuća istraživanja i inicijative pokazuju izvedivost i prednosti korištenja vodika u luka i na brodovima, posebno u regijama koje imaju inicijativu za pronalaskom rješenja čistog prijevoza.

7. RAZVOJ I TENDENCIJE KORIŠTENJA VODIKA KAO GORIVA

Budući razvoj i uporaba vodika kao goriva ima značajan potencijal za rješavanje hitnih globalnih izazova, uključujući klimatske promjene, energetske sigurnost i održivost.

Budućnost vodika uglavnom se vrti oko zelenog vodika proizvedenog elektrolizom uz obnovljivi izvor energije. Kako se cijena obnovljivih izvora energije poput sunca i vjetra i dalje smanjuje, proizvodnja zelenog vodika postaje ekonomski isplativija. Tekuća istraživanja i razvojni naponi usmjereni su na poboljšanje učinkovitosti i isplativosti tehnologije elektrolize. Inovacije uključuju ćelije i sustave za elektrolizu viših performansi, koji će proizvodnju zelenog vodika učiniti konkurentnijom.

Vodik može zamijeniti fosilna goriva u raznim industrijskim procesima, kao što je proizvodnja čelika i cementa. Dok industrije nastoje smanjiti udio ugljičnog zagađenja, očekuje se porast potražnje za vodikom kao čistim izvorom energije u proizvodnji. Vodik može poslužiti kao sirovina za proizvodnju „zelenih“ kemikalija i materijala, pridonoseći razvoju gospodarstva i smanjenju emisija stakleničkih plinova u kemijskoj industriji.

Automobilska industrija će vjerojatno svjedočiti širem rasponu vozila s vodikovim gorivim ćelijama, uključujući osobna vozila, gospodarska vozila i autobuse. Napredak u tehnologiji gorivih ćelija, povećano domet vozila i proširena infrastruktura za punjenje goriva

potaknut će ovaj rast. Vodik se sve više koristi u željezničkom i pomorskom sektoru, gdje su velike udaljenosti i smanjenje emisija stakleničkih plinova bitni. Očekuje se da će vlakovi i brodovi na vodikov pogon postati sve češći, posebno za regionalni i međugradski prijevoz te prijevoz tereta.

Vodik može igrati ključnu ulogu u pohranjivanju viška energije koju stvaraju obnovljivi izvori, poput vjetra i sunca. Kada potražnja premaši ponudu, vodik se može pretvoriti natrag u električnu energiju, pomažući u stabilizaciji energetske mreže. Razvoj vodikovih čvorišta kao što su pomorske luke gdje se vodik proizvodi, skladišti i distribuira u velikom obimu, podržat će skladištenje i distribuciju energije. Razmatraju se isto tako i cjevovodi za učinkovit transport vodika kroz regije.

Sve veća pažnja se daje zrakoplovnoj industriji gdje se istražuje korištenje vodika kao čistog goriva za zrakoplove. Zrakoplovi s pogonom na vodik imaju potencijal za značajno smanjenje emisija, iako su tehnički izazovi i razvoj infrastrukture stalni problemi. U istraživanju svemira vodik ima dugu povijest kao raketno gorivo. Buduće misije na Mjesec, Mars i šire mogle bi se nastaviti oslanjati na vodik za pogon i sustave za održavanje života.

Neke regije aktivno rade na uspostavi „ vodikovih gospodarstava“ u kojima je vodik značajan dio energetske krajolika. Ove regije imaju za cilj integrirati vodik u različite sektore, uključujući proizvodnju električne energije, industriju i transport. U budućnosti bi se moglo razviti globalno tržište vodika, sa zemljama koje izvoze i uvoze vodik kako bi zadovoljile energetske potrebe, slično trenutnoj trgovini prirodnim plinom.

Kontinuirano istraživanje naprednih materijala ključno je za razvoj učinkovitih tehnologija skladištenja vodika, poboljšanje trajnosti gorivih ćelija i povećanje sigurnosti transporta i skladištenja vodika. Inovacije u alternativnim putevima proizvodnje vodika, kao što su biološka proizvodnja vodika i napredne tehnike elektrolize, mogu dodatno diverzificirati opcije opskrbe vodikom.

Vladine politike i propisi nastaviti će oblikovati razvoj i korištenje vodika. Očekuje se da će cijene ugljika, ciljevi smanjenja emisija i subvencije za proizvodnju zelenog vodika potaknuti prihvaćanje. Međunarodna suradnja bit će ključna za uspostavljanje zajedničkih standarda, sigurnosnih protokola i trgovinskih sporazuma u vezi s vodikom.

SWOT analiza primjene vodika kao goriva.

1. Snage:

- Čista energija: vodik je često gorivo koje sagorijevanjem proizvodi samo vodenu paru, što ga čini poželjnom opcijom za smanjenje emisija stakleničkih plinova i onečišćenja zraka

- Svestranost: vodik se može koristiti u širokom rasponu primjena, uključujući transport, industrijske procese, skladištenje energije i proizvodnju električne energije.
- Gustoća energije: vodik ima visoku gustoću energije u odnosu na težinu, što ga čini prikladnim za primjene koje zahtijevaju dugotrajne i visokoenergetske sadržaje, kao što su vozila s gorivnim ćelijama.
- Pohranjivanje i uravnoteženje mreže: vodik služi kao izvrstan medij za pohranjivanje viška energije generirane obnovljivim izvorima, pridonoseći stabilnosti mreže i skladištenju energije.
- Podrška vlade: mnoge vlade i međunarodne organizacije aktivno podupiru razvoj i usvajanje vodika putem politika, poticaja i financiranja.

2. Slabosti:

- Izazovi u proizvodnji: većina vodika trenutno se proizvodi iz fosilnih goriva, što rezultira povećanim emisijama ugljika. Prijelaz na proizvodnju zelenog vodika je ključan, ali zahtijeva značajna ulaganja i razvoj infrastrukture.
- Skladištenje i transport: vodik ima nižu gustoću energije po volumenu od tradicionalnih goriva, što zahtijeva učinkovite metode skladištenja i transporta, koje često uključuju visokotlačne spremnike.
- Razvoj infrastrukture: uspostava vodikove infrastrukture, uključuje proizvodnju, distribuciju i postaje za punjenje goriva, skupa je i dugotrajna.
- Sigurnosna pitanja: vodik je vrlo zapaljiv i zahtijeva stroge sigurnosne mjere tijekom proizvodnje, skladištenja i transporta.
- Konkurentne tehnologije: vodik se suočava s konkurencijom drugih tehnologija čiste energije, poput baterija za električna vozila i amonijaka za industrijske procese.

3. Prilike:

- Dekarbonizacija: hitna potreba za smanjenjem emisija ugljika predstavlja značajnu priliku za vodik da zamijeni fosilna goriva u različitim sektorima, pridonoseći gospodarstvu nisku razinu ugljika.
- Tehnološki napredak: tekući napori istraživanja i razvoja, poboljšavaju učinkovitost i isplativost tehnologija proizvodnje, skladištenja i korištenja vodika.
- Ekonomija vodika: razvoj vodikovih čvorišta i regionalnih vodikovih gospodarstava može stvoriti radna mjesta, potaknuti gospodarski rast i poboljšati energetske sigurnost.

- Globalna trgovina: vodik ima potencijal da postane energetska roba kojom se globalno trguje, slično prirodnom plinu ili nafti, potičući međunarodnu suradnju i trgovinske sporazume.
- Prijevoz na vodikov pogon: porast broja vozila s vodikovim gorivim ćelijama, autobusa, vlakova i pomorskih plovila predstavlja mogućnosti za čišće i učinkovitije transportne sustave.

4. Prijetnje:

- Konkurencija: vodik se često suočava s konkurencijom dobro poznatih fosilnih goriva i alternativnih tehnologija čiste energije, što potencijalno usporava njegovo usvajanje.
- Infrastrukturni troškovi: izgradnja potrebne infrastrukture za proizvodnju i distribuciju vodika kapitalno je intenzivna i može odvratiti ulaganja.
- Prekidi u lancu opskrbe: prekidi u lancu opskrbe, kao što su prekidi u proizvodnji ili transportu vodika, mogu utjecati na pouzdanost vodika kao izvora goriva.
- Tehnološke prepreke: Napredak u tehnologiji vodika potreban je za rješavanje izazova koji se odnose na skladištenje, transport i sigurnost.
- Regulatorna nesigurnost: Propisi i standardi koji se razvijaju mogu stvoriti nesigurnosti za investitore i mogu samim tim spriječiti razvoj vodika.

Tablica 2. SWOT analiza za vodik kao gorivo

1. SNAGE	2. SLABOSTI
Čista energija	Izazovi u proizvodnji
Svestranost	Skladištenje i transport
Gustoća energije	Razvoj infrastrukture
Pohranjivanje i uravnoteženje mreže	Sigurnosna pitanja
Podrška vlade	Konkurentske tehnologije
3. PRILIKE	4. PRIJETNJE
Dekarbonizacija	Konkurencija
Tehnološki napredak	Infrastrukturni troškovi
Ekonomija vodika	Prekidi u lancu opskrbe
Globalna trgovina	Tehnološke prepreke
Prijevoz na vodikov pogon	Regulatorna nesigurnost

Izvor: Izradio student (25.09.2023.)

SWOT analiza vodika kao goriva otkriva snage, slabosti, prilike i prijetnje koje oblikuju njegovu sadašnju i buduću ulogu u globalnoj energetskej tranziciji. Prednosti vodika leže u njegovom statusu čistog izvora energije, svestranosti u više sektora, visokoj gustoći energije i snažnoj potpori vlade. Sve ovo pozicionira vodik kao važan alat za smanjenje emisija, poticanje održivosti i inovacija u raznim industrijama. Međutim, vodik se također suočava sa značajnim slabostima, uključujući izazove u proizvodnji, skladištenju i razvoju infrastrukture. Briga o sigurnosti i konkurencija alternativnih tehnologija čiste energije predstavljaju dodatne prepreke. Unatoč ovim izazovima, mogućnosti za vodik su značajne. Nudi jasan put do dekarbonizacije. Prilagodljivost vodika različitim primjenama, kao što je transport, postavlja ga kao ključnog za stvaranje krajolika čiste energije. Ipak, vodik nije bez prijetnji. Konkurencija fosilnih goriva i konkurentskih tehnologija, visoki troškovi infrastrukture, ranjivost opskrbnog lanca i regulatorne nesigurnosti predstavljaju rizike za njegovu široku primjenu.

Budućnost vodika je obećavajuća i višestruka, s potencijalom da igra ključnu ulogu u globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promjena i prijelaza na čišće, održivije energetske sustave. Dok izazovi ostaju, očekuje se da će tekuća istraživanja, tehnološki napredak i politike podrške osloboditi golemi potencijal vodika kao goriva u širokom rasponu primjena.

8. ZAKLJUČAK

U potrazi za održivom energetsom budućnošću, analiza i primjena vodika kao goriva pojavljuje se temelj inovacijama, baveći se ekološkim problemima i preoblikujući globalne energetske paradigme. Kroz sveobuhvatno istraživanje različitih dimenzija, ovaj rad prikazuje potencijal vodika kroz poglavlja koja se bave proizvodnim metodama, skladištenjem i transportom, primjenom, ekološkim i ekonomskim razmatranjima, političkim okvirima i budućim izgledima.

Proučavanje različitih metoda proizvodnje vodika, od parne reforme metana do obećavajuće biološke proizvodnje vodika, rad prikazuje dinamičnost koju nudi vodik kao rješenje za rastuće energetske potrebe i dostupnosti resursa. Prijelaz vodika od proizvodnje do upotrebe ovisi o učinkovitim metodama skladištenja i transporta. Skladištenje stlačenog plina, skladištenje tekućeg vodika i kemijsko skladištenje vodika, isprepletено s prometnom infrastrukturom, primjer je zamršene sinergije potrebne za iskorištavanje njegovog potencijala. Od područja vozila s gorivim ćelijama do transformacije teškog transporta, primjene vodika naglašavaju njegove razne mogućnosti u smanjenju emisija ugljika i redefiniranju sektora koji su ključni za gospodarski rast i očuvanje okoliša. Važno je izdvojiti posebno u današnjim vremenima kako ekonomska isplativost i ekološka prednost u odnosu na fosilna goriva može povećati prednosti vodika. Istraživanje njegovih prednosti za okoliš, uključujući smanjenje emisije i održivost resursa, skladno koegzistira s ispitivanjem njegove ekonomske izvedivosti i potencijala za preoblikovanje energetske ekonomije. Kulminacija političkih i regulatornih okvira naglašava iznimnu važnost međunarodnih saveza, standardiziranih okvira i vizionarskih politika. Ova suradnička nastojanja premošćuju geopolitičke granice, olakšavaju jedinstveni pristup usvajanju vodika, potiču razmjenu znanja i utiru put globalno integriranom vodikovom ekosustavu.

Budućnost vodika kao goriva obećavajuća je. Tehnologije u nastajanju, promjene politike i inovacije u industriji projektiraju pravac u kojemu vodik zauzima središnje mjesto u pokretanju energetske tranzicije. Dok svijet nastoji izbjeći oslanjanje na konvencionalne izvore energije, potencijal vodika kao održivog i obilnog energenta i goriva daje nadu za učinkovitijom energetsom sigurnošću od današnje.

LITERATURA

Knjige:

1. Kalea, M.: *Obnovljivi izvori energije, energetski pogled*, Kiklos-Krug knjige d.o.o., Zagreb, 2014.
2. Alvera, M.: *The Hydrogen Revolution: A Blueprint for the Future of Clean Energy*, Hachette Book Group, New York, 2021.

Članci u časopisima:

1. Belak, S., Vujčić, R.: *Analiza transporta vodika brodom*, Zbornik radova, Energija i zaštita okoliša, Hrvatsko udruženje za sunčevu energiju Rijeka, Hrvatska 1996., p. 299-306

Internetski izvori:

1. Lovrak, A.: *Tehnologija rasplinjavanja biomase*, 2020. <https://supeus.hr/wp-content/uploads/2020/05/Tehnologija-rasplinjavanja-biomase.pdf?x69875> (05.08.2023.)
2. Safari, F., Dincer I.: *A review and comparative of themorchemical water splitting cycles for hydrogen production*, February 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890419311884?via%3Dihub> (20.08.2023.)
3. Dincer, I., Ishaq, H.: *Solar Energy-Based Hydrogen Production*, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323851763000093> (20.08.2023.)
4. Veziroglu, T.N.: *Hydrogen production using photobiological methods*, 2015, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781782423614000108> (21.08.2023.)
5. Soares, J.F., Confortin, C.T., Todero, I.: *Dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technological challenges and future prospects*, January 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119306926> (21.08.2023.)
6. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.: *Physical Hydrogen Storage*, 2023. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage> (21.08.2023.)
7. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.: *Hydrogen Pipelines*, 2023. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines> (21.08.2023.)

8. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.: *Hydrogen Tube Trailers*, 2023. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-tube-trailers> (22.08.2023.)
9. U.S. Department of Energy.: *How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen*, 2023. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work> (23.08.2023.)
10. Melaina, M.W., Antonia, O., Penev, M.: *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues*, 2013. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf> (23.08.2023.)
11. Willmer, G.: *Heavy-duty trucks drive clean hydrogen to the next level*, 2022. <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/heavy-duty-trucks-drive-clean-hydrogen-next-level> (24.08.2023.)
12. Scania.: *How does a hydrogen fuel cell electric truck work*, 2020. <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2020/how-does-a-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-work.html> (23.08.2023.)
13. Nowotny, J., Veziroglu, T.,N.: *Impact of hydrogen on the environment*, 2011. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319911017319> (24.08.2023.)
14. Li, Y., Taghizadeh-Hesary, F.: *The economic feasibility of green hydrogen and fuel cell electric vehicles for road transport in China*, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421521005681> (25.08.2023.)
15. United Nations Industrial Development Organization.: *A Hydrogen Economy*, 2023. <https://www.unido.org/hydrogen> (27.08.2023.)
16. Nadaleti, C.W., Santos, G.,B., Lourenco., V., A.: *The potential and economic viability of hydrogen production from the use of hydroelectric and wind farms surplus energy in Brazil: A national and pioneering analysis*, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319919332185> (28.08.2023.)
17. Howe, T.: *Hydrogen Trains: The Railroad Revolution of the 21st Century*, 2021. <https://blog.ballard.com/rail/hydrogen-train> (15.09.2023.)
18. J.Matthe., J. Pooja., J. Jonathan.: *Hydrogen in Maritime: Opportunities and challenges*, 2022. <https://www.linkedin.com/advice/0/what-main-challenges-opportunities-using-hydrogen> (18.09.2023.)

KAZALO KRATICA

AE (Alkaline electrolysis)- Alkalna elektroliza

CCS (Carbon capture and storage)- Hvatanje i skladištenje ugljika

CIPEC (Concentrated integrated photo-electrochemical system)- Koncentrirani integrirani foto-elektrokemijski sustav

ECH2A (European alliance for clean hydrogen)- Europska alijansa za čisti vodik

FCEV (Electric traction motor)- Električni vučni motor

PEC (Photoelectrochemical cell)- Fotoelektrokemijske ćelije

PEM (Proton exchange membrane)- Elektroliza s membranom za izmjenu protona

SMR (Metahne steam reforming)- Reformiranje metana

SOE (Solid oxide electrolysis)- Elektroliza krutog oksida

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba goriva s ekološkog aspekta	40
Tablica 2. SWOT analiza za vodik kao gorivo	58

POPIS SHEMA

Slika 1. Elektroliza vode- proizvodnja čistog vodika	6
Slika 2. Shema sustava za rasplinjavanje s plinskim motorom	8
Slika 3. Ciklus razdvajanja vode za proizvodnju vodika	9
Slika 4. Uređaj za pretvaranje energije sunca u energiju vodika	11
Slika 5. Protok elektrolita kroz ćeliju	12
Slika 6. Tamna fermentacija	13
Slika 7. Fotobiološka metoda	14
Slika 8. Komponente spremnika vodika pod tlakom	17
Slika 9. Sustav spremnika tekućeg vodika	18
Slika 10. Promjena isparavanja LNG-a u funkciji veličine spremnika i izolacije	22
Slika 11. Prikolica za prijevoz vodika	25
Slika 12. Zemlje s vlastitim strategijama za vodik.....	25
Slika 13. Globalni program o zelenom vodik u industriji.....	31
Slika 14. Komponente električnog automobila s vodikovim gorivim ćelijama	45
Slika 15. Komponente u kamionu na vodik	47
Slika 16. Xcient Fuel Cell kamion	48
Slika 17. Komponente autobusa na vodikov pogon	49
Slika 18. Autobus na vodikov pogon	50
Slika 19. Vlakovi na vodikove gorive ćelije	51

