

# Vodik kao pogonsko gorivo

---

**Bojko, Adriano**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:318491>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Adriano Bojko

# ZAVRŠNI RAD

Zagreb, lipanj, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidat Adriano Bojko

Predao je izrađen završni rad dana: 28. svibnja 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Andrej Vidak, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Miroslav Jerković, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Elvira Vidović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred  
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 3. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Adriano Bojko

## VODIK KAO POGONSKO GORIVO

### ZAVRŠNI RAD

Mentor: doc. dr. sc. Iva Movre Šapić

Članovi ispitnog povjerenstva:

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić

doc. dr. sc. Andrej Vidak

doc. dr. sc. Miroslav Jerković

Zagreb, lipanj, 2024.

## *Zahvala*

*Prije svega, želim izraziti iskrenu zahvalnost svojoj mentorici, doc. dr. sc. Ivi Movre Šapić, na njezinom strpljenju, znanju i neprocjenjivoj podršci tijekom izrade ovog završnog rada. Zahvaljujem joj na svim prilikama za učenje koje mi je pružila i na vremenu koje je uložila kako bi pomogla da ostvarim svoje ciljeve.*

*Također, posebnu zahvalnost dugujem svojoj obitelji i prijateljima. Hvala vam na podršci, razumijevanju i strpljenju.*

## SAŽETAK

Vodik se smatra važnim elementom u potrazi za čistim i održivim energetske rješenjima zbog svoje sposobnosti da proizvede energiju s minimalnim emisijama štetnih plinova. Najlakši element u svemiru, vodik je izuzetno privlačan za dekarbonizaciju teško transformabilnih sektora poput transporta i industrije. Međutim, upotreba vodika kao goriva suočava se s izazovima kao što su proizvodnja, skladištenje, distribucija i sigurnost. Globalna energetska kriza i klimatske promjene potaknule su intenzivna istraživanja za njegovu širu primjenu. Vodik se može proizvoditi na više načina, uključujući elektrolizu i termokemijske procese, gdje je "zeleni" vodik, dobiven iz obnovljivih izvora, najčišći oblik. S druge strane, "sivi" i "smeđi" vodik proizvode se iz fosilnih goriva, često uz velike količine CO<sub>2</sub>. Parni metanski reforming (SMR) trenutno je najrasprostranjenija metoda proizvodnje vodika, dok "plavi" vodik, iako koristi fosilna goriva, smanjuje emisije hvatanjem i skladištenjem CO<sub>2</sub>. Proizvedeni vodik se koristi u gorivnim ćelijama gdje elektrokemijske reakcije proizvode električnu energiju, vodu i toplinu kao jedine nusprodukte, što predstavlja značajan odmak od fosilnih goriva koja ispuštaju ugljični dioksid i druge štetne emisije. Vodik ima potencijal znatno povećati energetske efikasnost i smanjiti ovisnost o konvencionalnim izvorima energije. Unatoč prednostima, šira upotreba vodika još uvijek zahtijeva rješavanje tehničkih i ekonomskih prepreka. Cilj ovog rada je pružiti dublji uvid u potencijale i izazove vodika kao alternativnog goriva, analizirati postojeće tehnologije, integraciju u energetske sustave te ekonomske i sigurnosne aspekte implementacije. Vodik predstavlja obećavajući pravac u ostvarivanju održive energetske budućnosti, ali je neophodno daljnje istraživanje i razvoj kako bi se maksimizirao njegov potencijal.

**Ključne riječi:** Vodik, održivi izvori energije, gorivne ćelije, dekarbonizacija, elektroliza

## ABSTRACT

Hydrogen is considered a key element in the search for clean and sustainable energy solutions due to its ability to produce energy with minimal emissions of harmful gases. The lightest element in the universe, hydrogen is extremely attractive for decarbonizing hard-to-transform sectors such as transport and industry. However, the use of hydrogen as a fuel faces challenges such as production, storage, distribution and safety. The global energy crisis and climate change have stimulated intensive research for its wider application. Hydrogen can be produced in a number of ways, including electrolysis and thermochemical processes, where "green" hydrogen, obtained from renewable sources, is the purest form. On the other hand, "grey" and "brown" hydrogen are produced from fossil fuels, often with large amounts of CO<sub>2</sub>. Steam methane reforming (SMR) is currently the most widespread method of hydrogen production, while "blue" hydrogen, although using fossil fuels, reduces emissions by capturing and storing CO<sub>2</sub>. The produced hydrogen is used in fuel cells where electrochemical reactions produce electricity, water and heat as the only by-products, which represents a significant departure from fossil fuels that release carbon dioxide and other harmful emissions. Hydrogen has the potential to significantly increase energy efficiency and reduce dependence on conventional energy sources. Despite the advantages, the wider use of hydrogen still requires solving technical and economic obstacles. The aim of this paper is to provide a deeper insight into the potential and challenges of hydrogen as an alternative fuel, to analyze existing technologies, integration into energy systems, and economic and safety aspects of implementation. Hydrogen represents a promising direction in achieving a sustainable energy future, but further research and development is necessary to maximize its potential.

**Keywords:** Hydrogen, sustainable energy sources, fuel cells, decarbonization, electrolysis

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Proizvodnja vodika: metode, ekološki utjecaji i primjene.....	2
1.1.1. Procesi i tehnologije za dobivanje zelenog vodika .....	3
1.1.2. Proizvodnja plavog vodika: tehnologije i ekološki utjecaji.....	4
1.1.3. Proizvodnja sivog vodika.....	5
1.1.4. Smeđi vodik .....	7
1.1.5. Elektroliza vode kao metoda proizvodnje vodika.....	8
1.1.7. Fotoelektrokemijsko dobivanje vodika.....	10
1.1.8. Rasplinjavanje ugljena .....	11
1.1.9. Rasplinjavanje biomase .....	12
2. SKLADIŠTENJE VODIKA .....	14
2.1. Skladištenje stlačenog vodika.....	14
2.2. Proces skladištenja tekućeg vodika.....	16
3. TRANSPORT VODIKA.....	18
4. POTREBNA INFRASTRUKTURA ZA IMPLEMENTACIJU VODIKOVE TEHNOLOGIJE	20
5. USPOREDBA VODIKA S OSTALIM GORIVIMA .....	23
5.1. Usporedba pogona vodikom s dizelom.....	23
5.2. Usporedba pogona vodikom s baterijskim pogonom.....	24
6. PRAVNA REGULATIVA .....	26
7. ZAKLJUČAK.....	28
8. LITERATURA.....	29



# 1. UVOD

Vodik, najlakši i najrasprostranjeniji element u svemiru, predstavlja važnu komponentu u potrazi za čistim, održivim izvorima energije. Bez boje, mirisa i okusa, vodik se pojavljuje primarno u molekularnom obliku ( $H_2$ ) i može proizvesti energiju s minimalnim ili nultim emisijama štetnih plinova kada se koristi u gorivnim ćelijama. Ova karakteristika čini ga izuzetno privlačnim u kontekstu globalnih napora za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i mitigaciju klimatskih promjena [1].

Globalna energetska kriza i klimatske promjene potaknule su intenzivna istraživanja alternativnih izvora energije. Među njima, vodik se ističe kao jedan od najperspektivnijih kandidata za pogonsko gorivo budućnosti. Korištenje vodika kao pogonskog goriva omogućuje proizvodnju energije kroz elektrokemijske reakcije u gorivnim ćelijama, pri čemu su jedini nusprodukti voda i toplina. Značajna razlika u odnosu na konvencionalna fosilna goriva, koja svojom upotrebom proizvode velike količine ugljičnog dioksida i drugih štetnih emisija [1].

Značaj vodika u energetskim sustavima leži ne samo u njegovoj čistoći, već i u visokoj energetskoj gustoći, što ga čini jednim od najučinkovitijih nosača energije. Ova svojstva su doprinijela da se vodik smatra ključnim elementom u tranziciji prema dekarbonizaciji različitih sektora, uključujući prijevoz, industriju i stambeni sektor. Međutim, unatoč brojnim prednostima, široka upotreba vodika kao goriva suočava se s tehničkim i ekonomskim izazovima, uključujući pitanja u vezi s proizvodnjom, skladištenjem, distribucijom i sigurnošću [1].

Cilj ovog rada je istražiti potencijale i izazove vodika kao pogonskog goriva, s posebnim naglaskom na njegovu primjenu. Analizirat će se postojeće tehnologije, potencijal za integraciju u postojeće energetske sustave, kao i ekonomske i sigurnosne aspekte koji prate njegovu implementaciju. Ovaj rad namjerava pružiti sveobuhvatan pregled vodika kao alternativnog goriva, te ukazati na njegovu ulogu u ostvarivanju održive energetske budućnosti [2].

## 1.1. Proizvodnja vodika: metode, ekološki utjecaji i primjene

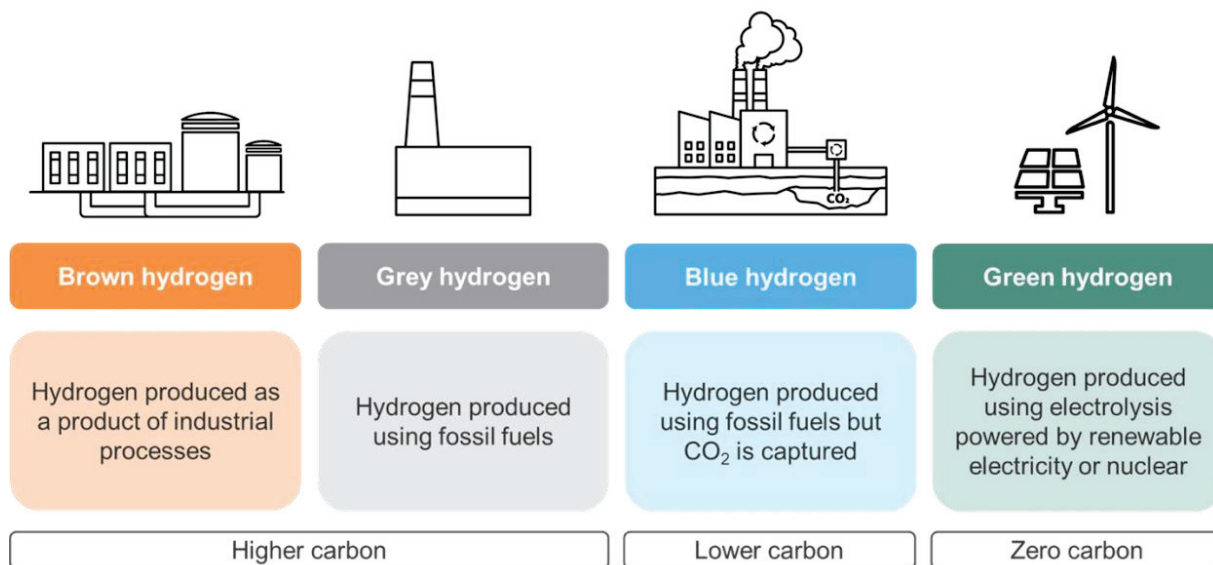
Vodik, element označen simbolom H i atomskim brojem 1, predstavlja najlakši element periodnog sustava. Pri standardnim uvjetima, vodik se nalazi u obliku dvoatomnog plina ( $H_2$ ), bez boje, mirisa i okusa. Ovaj netoksičan i izrazito zapaljiv plin znatno je lakši od zraka, čak 14,4 puta lakši, što ga čini dominantnim elementom u svemiru, čineći približno 75% svih normalnih materija. Vodik je također temeljni element iz kojeg su putem nuklearne fuzije nastali svi drugi elementi, a u plazma stanju je glavni sastojak zvijezda poput Sunca [2].

Na Zemlji, vodik većinom postoji u kombinaciji s drugim elementima, kao što su voda i razni organski spojevi, i pokazuje nisku reaktivnost na sobnoj temperaturi. No, na visokim temperaturama, njegova reaktivnost se značajno povećava. Kao gorivo, vodik ima sposobnost izgaranja u kisiku bez proizvodnje štetnih ugljikovih spojeva, što ga čini idealnim izborom za čisto gorivo u različitim aplikacijama, uključujući zrakoplovne pogonske sustave [2].

Vodik se može klasificirati u nekoliko kategorija temeljem načina njegove proizvodnje: sivi i smeđi vodik proizvode se iz fosilnih goriva s emisijom  $CO_2$ , dok plavi vodik također proizlazi iz fosilnih izvora ali uz hvatanje i skladištenje  $CO_2$ , čime se emisije značajno smanjuju. Najčišći oblik, zeleni vodik, dobiva se elektrolizom vode koristeći električnu energiju dobivenu iz obnovljivih izvora energije, poput vjetra, sunca, geotermalne energije i hidroelektrana. Ova metoda trenutno čini manje od 4% ukupne proizvodnje vodika, ali je važna za ostvarenje ciljeva dekarbonizacije u različitim sektorima ekonomije [3].

Proizvodnja vodika ima važnu ulogu u zrakoplovstvu koje sudjeluje s oko 3% u globalnom iznosu emisija  $CO_2$ . Da bi se ispunili međunarodni sporazumi o smanjenju emisija, industrija se mora okrenuti od fosilnih goriva prema čistijim tehnologijama, poput onih temeljenih na vodik. Ovaj dio će detaljno objasniti različite metode proizvodnje vodika, njihove razlike, ekološke aspekte i održivost, kako je ilustrirano na Slici 1.1.1.

Sve navedene metode i principi proizvodnje vodika ne samo da nude širok spektar mogućnosti za industrijsku primjenu, već i predstavljaju važne komponente u težnji za energetsom revolucijom i tranzicijom prema dekarboniziranom gospodarstvu [3].



Slika 1.1.1. Prikaz procesa proizvodnje vodika, [4]

### 1.1.1. Procesi i tehnologije za dobivanje zelenog vodika

Zeleni vodik predstavlja ekološki prihvatljiv oblik vodika koji se proizvodi bez upotrebe fosilnih goriva, čime se izbjegava emisija štetnih plinova u atmosferu. Ovaj termin se koristi za opisivanje vodika proizvedenog metodom koja ne uključuje fosilna goriva i rezultira čistom proizvodnjom bez negativnih ekoloških utjecaja. Glavni procesi za dobivanje zelenog vodika uključuju razgradnju molekule vode (H<sub>2</sub>O) na kisik i vodik koristeći energiju dobivenu iz obnovljivih izvora [5].

Postoje različiti pristupi za ekstrakciju vodika iz vode, pri čemu su najučestalije metode sljedeće:

- Elektroliza vode: ovo je najčešća metoda, gdje se električna struja proizvedena iz obnovljivih izvora (kao što su solar, vjetar, hidroenergija) koristi za razlaganje molekula vode na vodik i kisik.

- Termokemijski ciklusi: ova metoda koristi visoke temperature, obično dobivene iz solarne ili geotermalne energije, za iniciranje kemijskih reakcija koje oslobađaju vodik iz vode.
- Fotoelektrokemijska proizvodnja: korištenje svjetlosne energije za izravno razdvajanje vode na vodik i kisik bez potrebe za vanjskim električnim izvorom.

Iako su ovi procesi trenutno najdominantniji, postoje i druge inovativne metode koje su u eksperimentalnoj fazi ili nemaju veliku komercijalnu primjenu, uključujući:

- Fotobiološka proizvodnja vodika: ova metoda koristi fotosintetičke organizme poput algi da proizvede vodik iz vode.
- Radioliza: koristi radijaciju za razbijanje molekula vode i oslobađanje vodika.
- Termoliza: razdvajanje vode na vodik i kisik pomoću izuzetno visokih temperatura.
- Fotokatalitičko cijepanje vode: korištenje svjetlosti za aktiviranje katalizatora koji potom cijepa molekule vode [5].

Iako ove manje konvencionalne metode trenutno predstavljaju samo malu frakciju ukupne proizvodnje vodika, one su predmet intenzivnih istraživanja i razvoja [5]. U posljednjih nekoliko godina, značajna financijska sredstva su uložena u razvoj i poboljšanje tehnologija za proizvodnju zelenog vodika, što ukazuje na rastući interes i potencijal za njihovu buduću komercijalizaciju [5]. Svi ovi naponi su usmjereni na ostvarivanje cilja dekarbonizacije i stvaranje održivijeg energetskog sistema.

### **1.1.2. Proizvodnja plavog vodika: tehnologije i ekološki utjecaji**

Plavi vodik predstavlja važnu kategoriju u proizvodnji vodika koja je usmjerena prema smanjenju ekoloških utjecaja fosilnih goriva, ali uz zadržavanje njihove energetske učinkovitosti. Ovaj tip vodika proizvodi se iz fosilnih goriva, najčešće prirodnog plina, s ključnom razlikom u procesu – emisije ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>), koje su nusprodukt proizvodnje, aktivno se hvataju i skladište ili koriste umjesto da se ispuštaju u atmosferu. Plavi vodik, stoga, omogućava korištenje postojeće tehnologije i infrastrukturu za fosilna goriva dok istovremeno značajno reducira ekološki otisak [6].

## **Tehnologije za proizvodnju plavog vodika**

- Proizvodnja plavog vodika obično se oslanja na dva osnovna procesa: parni metanski reforming (SMR) i auto-termalni reforming (ATR). Oba procesa uključuju reakcije metana i vode pri visokim temperaturama da bi se proizveo vodik i ugljični dioksid:
- Parni metanski reforming (SMR): Metan iz prirodnog plina reagira s parom pod visokim temperaturama i pritiskom, rezultirajući proizvodnjom vodika i CO<sub>2</sub>. SMR je trenutno najraširenija metoda za proizvodnju vodika.
- Auto-termalni reforming (ATR): ATR kombinira oksidaciju i reforming metana u jednom koraku, koristeći kisik i paru za proizvodnju vodika i CO<sub>2</sub> [6].

Ključni aspekt plavog vodika je upravljanje emisijama CO<sub>2</sub> koje se proizvode tijekom njegove proizvodnje. Za razliku od tradicionalnih metoda, plavi vodik koristi tehnologije za hvatanje i skladištenje ugljika (CCS). Ove tehnologije uključuju hvatanje CO<sub>2</sub> na mjestu proizvodnje i njegovo transportiranje na sigurnu lokaciju gdje se može trajno skladištiti pod zemljom ili koristiti u industrijskim procesima, poput proizvodnje cementa ili sintetičkih goriva [6].

Dok plavi vodik nudi značajne prednosti u smislu smanjenja emisija u atmosferu, njegova proizvodnja i dalje ovisi o fosilnim gorivima, što može biti kontradiktorno obzirom na globalne ciljeve dekarbonizacije. Također, infrastruktura za CCS mora biti rigorozno dizajnirana i održavana kako bi se osiguralo sigurno i efikasno skladištenje CO<sub>2</sub>, čime se dodatno povećavaju operativni troškovi. Unatoč tim izazovima, plavi vodik se smatra važnim korakom prema tranziciji energetskog sustava koji je manje ovisan o ugljiku, pružajući vrijeme i prostor za razvoj i skaliranje zelenijih tehnologija poput proizvodnje zelenog vodika [6].

### **1.1.3. Proizvodnja sivog vodika**

Sivi vodik predstavlja najčešći oblik proizvodnje vodika koji se koristi danas, uglavnom zbog svoje ekonomske isplativosti u trenutnim energetskim i industrijskim okvirima. Ova vrsta vodika

se dobiva iz fosilnih goriva, prvenstveno prirodnog plina, putem procesa poznatog kao parni metanski reforming (SMR). Ključna karakteristika sivog vodika je da tijekom njegove proizvodnje dolazi do velikih emisija ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>), koje se obično ispuštaju u atmosferu bez primjene tehnologija za hvatanje i skladištenje ugljika (CCS) [7].

Proizvodnja sivog vodika uključuje sljedeće korake:

- Reakcija vodene pare i metana: u procesu SMR, metan iz prirodnog plina reagira s vodenom parom pri visokoj temperaturi i pritisku. Katalizator se koristi za poboljšanje efikasnosti reakcije, što rezultira proizvodnjom vodika i CO<sub>2</sub>.
- Separacija: nakon reakcije, vodik se odvaja od CO<sub>2</sub> i ostalih nečistoća kako bi se dobila čista vodikova plinska struja [7].

Proces reformiranja parom predstavlja dominantnu metodu za proizvodnju vodika iz prirodnog plina, često koristeći metan kao izvor. Ova tehnika je poznata po svojoj ekonomičnosti i širokoj primjeni u industriji. Proces započinje zagrijavanjem plina do temperatura između 700 i 1100 °C i pod tlakom približno 17,2 bara, uz dodatak pare i katalizatora. Kao rezultat toga, formira se sintetizirani plin koji se sastoji od ugljičnog monoksida i vodika. Glavni nedostatak ove metode je što proizvodi značajne količine stakleničkih plinova, uključujući CO<sub>2</sub> i CO, pri čemu jedna tona proizvedenog vodika rezultira između 9 i 12 tona CO<sub>2</sub>, koji se potencijalno može uhvatiti i skladištiti kako bi se izbjegla emisija u atmosferu [7].

Prvi korak ovog procesa može se opisati reakcijom između metana i pare na visokoj temperaturi uz prisutnost katalizatora, rezultirajući sintezom plina. Reakcija se može pojednostavljeno prikazati kao:



Drugi korak uključuje reakciju sintetiziranog plina s dodatnom parom na temperaturi oko 360°C uz prisustvo katalizatora na bazi metalnih oksida, poput nikla u prvoj fazi i platine ili paladija u drugoj fazi, što omogućava oksidaciju CO u CO<sub>2</sub>. Oksidacija se koristi za dobivanje energije

potrebne za održavanje procesa, a toplina potrebna za pokretanje reakcije se dobiva izgaranjem metana. Ukupna toplinska učinkovitost procesa reformiranja parom je otprilike 70%, što znači da 70% energije vodika potječe iz uložene energije sirovine i potrebnih dodatnih izvora energije. Ova metoda, iako je ekonomična, nosi sa sobom ekološke izazove zbog velike količine generiranog CO<sub>2</sub> [7].

#### 1.1.4. Smeđi vodik

Smeđi vodik se smatra jednim od ekološki manje prihvatljivih načina proizvodnje vodika zbog svoje povezanosti s korištenjem lignita ili smeđeg ugljena. Ovaj proces rezultira visokim razinama ispuštanja ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>). Kao izvor energije, smeđi ugljen je jedan od najmanje učinkovitih i najviše zagađujućih fosilnih goriva. Tehnike korištene za proizvodnju smeđeg vodika su slične onima za proizvodnju sivog vodika, ali ekološki utjecaj smeđeg vodika je veći zbog vrste fosilnog goriva koje se koristi [7].

Proces dobivanja vodika iz ugljena uključuje parcijalnu oksidaciju s nekoliko kemijskih reakcija:

- Rasplinjavanje parom
- Rasplinjavanje kisikom
- Reakcija smjene vodenog plina

Tijekom ovog procesa, fino mljeveni ugljen reagira s parom i kisikom na visokim temperaturama. Vodik se formira kada para reagira s ugljenom, dok je potrebna toplina osigurana oksidacijom dijela ugljena kisikom. Povećani prinos vodika postiže se reakcijom smjese vodenog plina koja koristi CO nastao u početnoj fazi rasplinjavanja parom. Opća formula za proizvodnju vodika iz ugljena može se izraziti kao [8]:



Ovaj postupak proizvodnje vodika iz lignita ima sličnosti s reformiranjem parom, ali je znatno složeniji za implementaciju. Razlog leži u teškoćama s manipulacijom ugljena koji je inertniji i ima niži omjer vodika prema ugljiku u odnosu na metan. Osim toga, vodik proizveden ovom metodom može sadržavati nečistoće poput ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) i vodikovog sulfida (H<sub>2</sub>S),

koje je potrebno ukloniti kako bi se osigurala veća čistoća vodika. Termalna učinkovitost ovog procesa kreće se između 61% i 66%. Tijekom proizvodnje, lignit se prvo pretvara u plin bogat ugljikom, koji se zatim obrađuje za izdvajanje vodika, pri čemu se stvara značajna količina CO<sub>2</sub> kao nusprodukt, često bez mogućnosti za njegovo učinkovito upravljanje ili skladištenje. Metoda je često na meti kritika zbog štetnog utjecaja na okoliš, posebice zbog visokih razina emisija CO<sub>2</sub>, što doprinosi problemu globalnog zagrijavanja. Obzirom na niske troškove lignita, smeđi vodik se još uvijek koristi u određenim industrijskim primjenama. Međutim, globalni trend smanjenja emisija ugljika dovodi u pitanje njegovu dugoročnu održivost. Postoji rastući interes za prijelaz na alternativne metode poput proizvodnje plavog i zelenog vodika, koji imaju znatno manji negativni ekološki utjecaj, čime se potiče smanjenje ovisnosti o ugljenu kao izvoru energije [9].

### **1.1.5. Elektroliza vode kao metoda proizvodnje vodika**

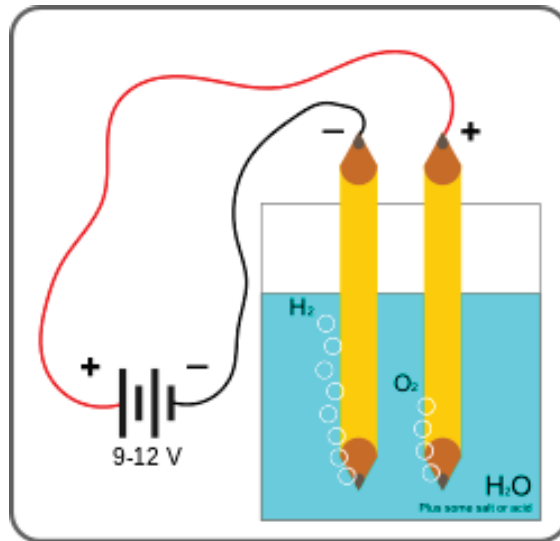
Elektroliza vode je proces kojim se molekule vode (H<sub>2</sub>O) razdvajaju na vodik (H<sub>2</sub>) i kisik (O<sub>2</sub>) koristeći električnu energiju, često dobivenu iz obnovljivih izvora kao što su solarna i vjetroelektrana. Ovaj proces je poznat po svojoj visokoj učinkovitosti, tipično između 70% i 80%, što implicira da konverzijski gubici iznose između 20% i 30%. Elektroliza je posebno cijenjena u aplikacijama koje zahtijevaju visoko čisti vodik, budući da vodik proizveden ovim putem sadrži minimalne nečistoće—u pravilu je 99% čist [10].

Tehnički, elektroliza se izvodi pomoću dvije elektrode uronjene u elektrolit i povezane s izvorom električne struje (Slika 1.1.5.1.). Vodik se formira na katodi (negativno nabijena elektroda), dok se kisik oslobađa na anodi (pozitivno nabijena elektroda). Elektrolit u ovom kontekstu djeluje kao ionski izmjenjivač, omogućavajući prolazak vodikovih iona kroz rastvor. Uobičajeni elektroliti su alkalijski hidroksidi koji se koriste zbog svojih svojstava poboljšanja električne vodljivosti.

Jednadžba koja opisuje ukupnu kemijsku reakciju elektrolize vode je:







Slika 1.1.5.1. Prikaz elektrolize , [11]

Ovaj proces rezultira dvostrukim brojem molekula vodika u odnosu na molekule kisika, što znači da ako se proizvode pod jednakim uvjetima temperature i tlaka, volumen vodika će biti dvostruko veći od volumena kisika. Također, broj elektrona koji se prenose kroz vodu je dvostruko veći u odnosu na broj proizvedenih molekula vodika i četiri puta veći u odnosu na broj proizvedenih molekula kisika. Elektroliza vode ne samo da proizvodi visoko čisti vodik bez potrebe za dodatnim pročišćavanjem, već predstavlja i ključnu tehnologiju u promicanju održivih energetska rješenja, koristeći obnovljive izvore energije za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima. To čini elektrolizu vode izuzetno važnom u kontekstu globalnih nastojanja za dekarbonizaciju i borbu protiv klimatskih promjena. U budućnosti se očekuje da će tehnološki napredci dalje povećati učinkovitost elektrolize i smanjiti operativne troškove, čime bi se ova metoda mogla učiniti još privlačnijom za širu primjenu [10].

### 1.1.6. Dobivanje vodika iz vode pomoću termokemijskih ciklusa

Termokemijski ciklusi predstavljaju sofisticiranu metodu razdvajanja molekula vode ( $H_2O$ ) na osnovne sastavnice, kisik ( $O_2$ ) i vodik ( $H_2$ ), isključivo kroz upotrebu kemijskih reakcija i termalne energije, bez izravne potrebe za električnom energijom. Kako naziv "ciklus" sugerira, ovi

procesi karakteriziraju se kontinuiranim recikliranjem kemijskih spojeva koji su uključeni, osim proizvedenog vodika i kisika. Rad ovih ciklusa odvija se na znatno nižim temperaturama u usporedbi s direktnom termolizom vode, koja zahtijeva temperature veće od 2000°C. Jedan od značajnih izvora topline za termokemijske cikluse su solarna energija ili nuklearna energija. Procjenjuje se da termokemijski ciklusi mogu postići učinkovitost između 40% i 50%, što bi moglo biti veće od učinkovitosti elektrolize ako se uzme u obzir cjelokupna učinkovitost proizvodnje električne energije. U slučajevima gdje se električna energija koristi za dio procesa, takvi termokemijski ciklusi se nazivaju hibridni ciklusi. Međutim, ovi procesi suočavaju se s nekoliko značajnih izazova. Jedan od najkritičnijih problema je odvajanje proizvedenog vodika od ostalih kemikalija, što može biti teško zbog korozivne prirode nekih kemikalija koje su dio ciklusa. Također, problemi povezani s korozijom zahtijevaju detaljnu pažnju kako bi se osigurala dugoročna stabilnost i funkcionalnost sistema. Zbog svoje složenosti i potrebe za visokim temperaturama, termokemijski ciklusi se često razmatraju za upotrebu u kombinaciji s nuklearnim elektranama četvrte generacije ili sa sustavima koncentrirane solarne energije. Očekuje se da će od 2030. godine doći do značajnijeg povećanja upotrebe ovih tehnologija kako bi se maksimalno iskoristili njihovi potencijali za proizvodnju čistog vodika. U skladu s globalnim ciljevima za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i dekarbonizaciju industrija, termokemijski ciklusi nude perspektivnu alternativu tradicionalnim metodama proizvodnje vodika, kombinirajući visoku učinkovitost s potencijalom za integraciju u obnovljive izvore energije. Njihova buduća primjena može znatno pridonijeti čistijem i održivijem energetsom sistemu [12].

### **1.1.7. Fotoelektrokemijsko dobivanje vodika**

Fotoelektrokemijski sustav predstavlja inovativnu tehnologiju koja integrira proizvodnju električne energije iz sunčeve svjetlosti i njenu direktnu upotrebu za proizvodnju vodika iz vode, sve u jednom uređaju. Ključna komponenta ovog sistema je poluvodič uronjen u vodenu otopinu koji ima sposobnost da izravno konvertira sunčevu svjetlost u kemijsku energiju, omogućavajući tako elektrolizu bez potrebe za vanjskim izvorom električne energije [13].

Ova metoda se ističe kao potencijalno izuzetno obećavajuća zbog svoje sposobnosti da potencijalno smanji troškove i poveća učinkovitost u odnosu na tradicionalne sustave fotonaponske elektrolize. Naime, fotoelektrokemijski procesi su pokazali na laboratorijskoj razini mogućnosti dostizanja učinkovitosti konverzije sunčeve energije u vodik i do 16%. Ovakvi rezultati predstavljaju značajan napredak u tehnologiji, no daljnji razvoj je nužan kako bi se ovi sistemi mogli komercijalno primjenjivati [13].

Trenutno, značajni istraživački naponi usmjereni su na poboljšanje materijala i inženjeringa ovih sistema kako bi se optimizirala njihova učinkovitost i smanjili operativni troškovi. Uključivanje naprednih poluvodičkih materijala koji su optimizirani za konverziju sunčeve svjetlosti u kemijsku energiju je ključno, kao i razvoj robusnijih i učinkovitijih elektrolizera koji mogu efektivno raditi pod ovim jedinstvenim uvjetima [13].

S tehničkom i komercijalnom zrelošću koja se očekuje u nadolazećim godinama, fotoelektrokemijsko dobivanje vodika može značajno doprinijeti energetskej tranziciji prema održivim izvorima, pružajući čistu i učinkovitu alternativu za proizvodnju vodika. Korištenje solarne tehnologije, omogućavajući direktnu produkciju vodika koja bi se mogla koristiti u različitim industrijskim procesima ili za pogon gorivnih ćelija, moglo bi unaprijediti dekarbonizaciju i smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima [13].

### **1.1.8. Rasplinjavanje ugljena**

Rasplinjavanje ugljena je industrijski postupak koji se, poput reformiranja prirodnog plina, koristi za proizvodnju vodika zbog svoje relativne ekonomičnosti. Proces uključuje korištenje ugljena, koji se prirodno sastoji od ugljične komponente formirane iz ostataka drevnih biljaka i mineralnih komponenata iz zemlje. Ugljična struktura ugljena sadrži elemente poput ugljika, vodika, kisika, sumpora i dušika, što ga čini pogodnim za kemijske transformacije potrebne u rasplinjavanju [14].

Da bismo razumjeli kako rasplinjavanje funkcionira, bitno je prvo pojasniti osnove procesa izgaranja, gdje ugljen potpuno oksidira dajući toplinu i ugljični dioksid, koji dalje ne gori jer je već maksimalno oksidiran. Za razliku od izgaranja, rasplinjavanje ne cilja na potpunu oksidaciju;

umjesto toga, dodaje se ograničena količina kisika kako bi se izbjeglo totalno sagorijevanje i omogućila produkcija korisnijih plinova poput ugljičnog monoksida i vodika. U ovom kontekstu, ugljen se tretira parcijalnom oksidacijom uz kisik, stvarajući pritom manju količinu CO<sub>2</sub> koja nije dostatna za potpuno sagorijevanje, ali je dovoljna za iniciranje procesa rasplinjavanja [14].

Proizvedeni CO<sub>2</sub> služi kao rasplinjavač koji, reagirajući dalje s ugljenom i dodatnom toplinom, producira ugljični monoksid. Ovaj ugljični monoksid zatim reagira s vodenom parom u procesu koji generira vodik i dodatni ugljični dioksid. Takav pristup omogućava učinkovitu proizvodnju vodika uz minimalne izravne emisije štetnih plinova, čineći rasplinjavanje privlačnim za industrije koje traže smanjenje svojih ekoloških otisaka [14].

Ova metoda se koristi u industrijskim centrima širom svijeta, uključujući gradove kao što su Pittsburgh u SAD-u i Shanghai u Kini, gdje se rasplinjavanje ugljena koristi ne samo za proizvodnju vodika, nego i za smanjenje ukupnih emisija CO<sub>2</sub> kroz napredne procese čišćenja ispuštenih plinova. Kako se svijet sve više okreće održivim izvorima energije, tehnologije poput rasplinjavanja ugljena nastavljaju se razvijati kako bi postale čišće i učinkovitije, pridonoseći globalnim naporima za smanjenje emisija stakleničkih plinova i promicanje ekološki održivih industrijskih praksi [14].

### **1.1.9. Rasplinjavanje biomase**

Rasplinjavanje biomase predstavlja jedan od procesa za pretvaranje organskog materijala u korisne plinovite, tekuće i čvrste bio-produnkte, uključujući vodik i bio-ulje. Za razliku od ugljena, biomasa se ne rasplinjava tako brzo niti jednostavno zbog prisustva kompleksnih prirodnih polimera poput celuloze, koji su osnovni sastojci biomase. Ovaj proces je složeniji jer biomasa tijekom rasplinjavanja, posebno u odsustvu kisika, stvara dodatne spojeve vodika i ugljika u smjesi plinova [14].

Za učinkovito razlaganje ovih spojeva i maksimiziranje proizvodnje vodika, neophodan je dodatni korak koji uključuje korištenje katalizatora. Katalizatori pomažu u rastavljanju kompleksnih organskih molekula u jednostavnije, čime se ubrzava proces rasplinjavanja i povećava učinkovitost proizvodnje željenih bio-produkata [14].

Jedna od najinovativnijih metoda u ovom kontekstu je superkrično rasplinjavanje vodom, koje predstavlja hidrotermalni pristup dobivanju bio-produkata. Ova metoda koristi visoke temperature i tlakove za postizanje superkričnog stanja vode, definirano temperaturom iznad 374°C i tlakom preko 22,1 MPa. U superkričnom stanju, voda postaje izuzetno učinkovit medij za hidrolizu biomase, što omogućava lakše razlaganje prirodnih polimera kao što je celuloza i time obilniju produkciju vodika i drugih korisnih bio-produkata.

Proces superkričnog rasplinjavanja vodom pruža niz prednosti u odnosu na tradicionalne metode, uključujući veću učinkovitost u konverziji biomase i bolju kontrolu nad kvalitetom proizvedenih bio-produkata. Pored toga, kritična točka vode kao rasplinjavača omogućava detaljniju manipulaciju procesom rasplinjavanja, što rezultira visokokvalitetnim bio-uljem i drugim produktima koji mogu naći široku primjenu u različitim industrijskim sektorima.

Korištenje superkričnog rasplinjavanja otvara nova vrata u tehnologijama obnovljive energije, čineći rasplinjavanje biomase ne samo ekološki prihvatljivijim, već i ekonomičnijim za industrijsku proizvodnju. Ove inovacije mogu znatno doprinijeti globalnim naporima za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i promicanje održivih energetske rješenja [14].

## 2. SKLADIŠTENJE VODIKA

Vodik se sve više ističe kao značajan „igrač“ u globalnom prijelazu na ekološki održivije izvore energije, zahvaljujući svojim impresivnim karakteristikama kao što su visoki kapacitet energije i čisto izgaranje. Ovaj element ima potencijal djelovati kao fleksibilan nositelj energije u različitim sektorima, uključujući transport, industrijsku proizvodnju i generaciju električne energije. Međutim, za realizaciju punog potencijala vodika kao praktične i sveobuhvatne energetske alternative, ključno je adresirati izazove povezane s njegovim skladištenjem i transportom [15].

Ovaj dio teksta bavi se različitim aspektima skladištenja i transporta vodika, koji su vitalni za integraciju vodika u šire energetske gospodarstvo. Učinkovito skladištenje i sigurni transportni mehanizmi su esencijalni za osiguranje da je vodik dostupan tamo gdje je potreban, bilo to u vozilima na gorivne ćelije, u industrijskim primjenama ili u postrojenjima za proizvodnju električne energije. Izazovi koji se javljaju zbog njegove niske gustoće energije i posebnih fizikalnih svojstava zahtijevaju razvoj inovativnih tehnoloških rješenja. Ova rješenja uključuju raznovrsne metode za skladištenje i transport vodika, koje trebaju biti razvijene i optimizirane kako bi se maksimalno iskoristili njegovi potencijali kao alternativnog izvora energije [15].

### 2.1. Skladištenje stlačenog vodika

Skladištenje vodika u obliku stlačenog plina je popularna opcija koja uključuje kompresiju vodika na visoke tlakove što rezultira smanjenjem njegovog volumena i povećanjem gustoće energije. To omogućava učinkovitije skladištenje i transport. Proces skladištenja stlačenog vodikovog plina prolazi kroz nekoliko ključnih faza:

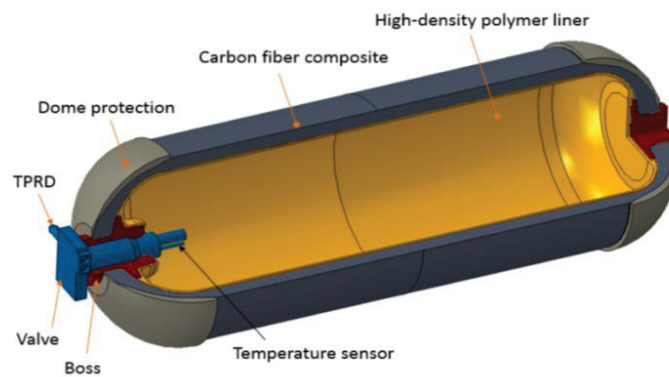
- Kompresija: vodik se komprimira na tlakove tipično između 350 i 700 bara. To se postiže koristeći kompresore koji vodik uvlače i stlačuju u robusne spremnike napravljene od materijala visoke izdržljivosti.
- Posuda za pohranjivanje: komprimirani vodik se skladišti u cilindrima ili spremnicima koji su specifično dizajnirani da izdrže visoke tlakove. Ove posude sadrže niz sigurnosnih

mehanizama, uključujući ventile za smanjenje tlaka koji sprječavaju potencijalne rizike od prekomjernog pritiska.

- Punjenje goriva i uporaba: nakon skladištenja, komprimirani vodik se može transportirati i koristiti na različitim mjestima, kao što su benzinske stanice za vodikove automobile ili u industrijskim postrojenjima [15].

Komponente spremnika za stlačeni vodik uključuju (slika 2.1.1.):

- Ventil (Valve): omogućava kontrolu izlaza i ulaza plina.
- Termički aktivirani uređaj za rasterećenje tlaka (TPRD): Automatski smanjuje tlak u spremniku u slučaju termičkog stresa.
- Senzor temperature: prati temperaturu unutar spremnika kako bi se osigurala stabilnost.
- Zaštita kupole (dome protection): štiti gornji dio spremnika od fizičkih oštećenja.
- Kompozit od karbonskih vlakana (Carbon fiber composite): koristi se za jačanje spremnika dok omogućava lakšu težinu.
- Podstava od polimera visoke gustoće (High-density polymer liner): pruža dodatni sloj izolacije i zaštite [15].



Slika 2.1.1. Prikaz spremnika stlačenog vodika, [15]

## 2.2. Proces skladištenja tekućeg vodika

Kako bi se vodik mogao skladištiti u tekućem stanju, potrebno je ohladiti plinoviti vodik na ekstremno niske temperature, točnije na  $-253^{\circ}\text{C}$ . Ova metoda omogućuje značajno povećanje gustoće energije vodika, čineći ga pogodnim za učinkovito dugoročno skladištenje i transport.

Proces skladištenja tekućeg vodika započinje njegovim ukapljivanjem, gdje se vodik hladi do točke gdje prelazi iz plinovitog u tekuće stanje pomoću specijaliziranih rashladnih sustava. Kada se vodik ohladi, on prolazi fazni prijelaz i postaje tekućina s visokom gustoćom energije. Ova tekućina se zatim skladišti u specijalno dizajniranim kriogenim spremnicima koji su izolirani kako bi se održala potrebna niska temperatura i minimizirao prijenos topline [16].

Ovi spremnici su opremljeni s naprednim izolacijskim materijalima, uključujući vakuumske slojeve i reflektirajuće premaze, koji pomažu u smanjenju gubitaka topline. U procesu skladištenja, neizbježno je da će određena količina tekućeg vodika ispariti; ovi plinovi se mogu skupiti i ponovno kondenzirati ili koristiti za druge potrebe, kao što je generiranje procesne topline.

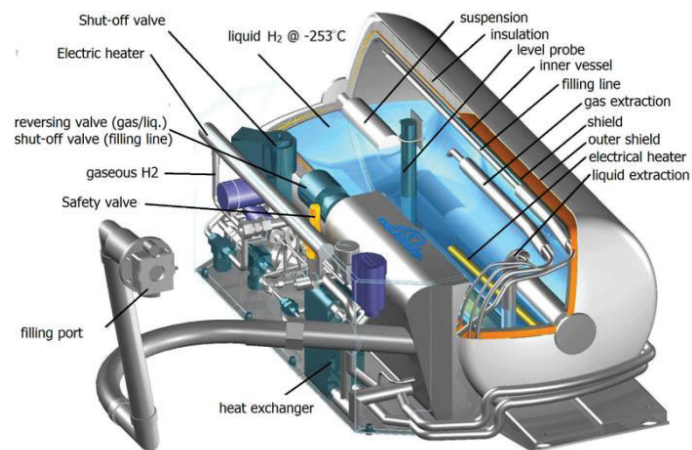
Komponente spremnika za tekući vodik:

- otvor za punjenje (filling port)
- ekstrakcija tekućine (liquid extraction)
- ekstrakcija plina (gas extraction)
- linija za punjenje (filling line)
- sonda razine (level probe)
- super-izolacija (super-insulation)
- unutarnja posuda (inner vessel)
- vanjska posuda (outer vessel)
- ovjes (suspension)
- tekući vodik ( $-253^{\circ}\text{C}$ )
- sigurnosni ventil (safety valve)
- plinoviti vodik ( $+20^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ )
- ventil za zatvaranje (shut-off valve)
- izmjenjivač topline rashladne vode (cooling water heat exchanger)



- povratni ventil (reversing valve - gaseous/liquid)
- električni grijač (electrical heater)

Sigurnosne mjere su od vitalne važnosti pri rukovanju tekućim vodikom zbog njegove izuzetno niske temperature i kriogene prirode. Pravilan dizajn spremnika, učinkoviti sigurnosni ventili i adekvatna ventilacija su ključni za sprječavanje potencijalnih nesreća. Tekući vodik se koristi u raznim primjenama, od raketnog goriva za istraživanje svemira, preko akceleratora čestica i fuzijskih eksperimenata u znanstvenim istraživanjima, do proizvodnje električne energije u udaljenim područjima kroz gorive ćelije [16].



Slika 2.2.1. Komponente spremnika za tekući vodik, [17]

### 3. TRANSPORT VODIKA

Integracija vodika kao nositelja energije u globalni energetske krajolik zahtijeva razvoj učinkovitih metoda ne samo za njegovu proizvodnju i skladištenje, već i za njegov siguran i pouzdan transport. Vodik može imati značajnu ulogu u diversifikaciji izvora energije u različitim sektorima poput transporta, industrije i električne energije, ali ključ za to leži u razvijanju robusnih sistema za njegov transport od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje [18].

#### **Transport vodika brodom**

Transport vodika brodom može se obavljati u nekoliko oblika: kao plin, ukapljeni vodik ili u obliku kemijskog spoja poput metilcikloheksana. Međutim, vodikova niska gustoća i izazovi s njegovim ukapljenjem na vrlo niske temperature čine ove metode skupima i tehnički zahtjevnima. Za transport vodika brodom, vodik se može:

- Stlačiti u cilindre pod visokim tlakom,
- Ukapljiti pri temperaturi nižoj od  $-253^{\circ}\text{C}$ ,
- Kemijski pretvoriti u stabilnije spojeve poput metilcikloheksana.

Svaki od ovih pristupa zahtijeva značajnu energiju: za stlačivanje, ukapljivanje ili kemijsku reakciju, što utječe na ukupnu učinkovitost transporta vodika. Specifično, ukapljivanje vodika zahtijeva najveći utrošak energije, a isto tako, zahtijeva i visoko učinkovite izolacijske tehnike za minimiziranje gubitaka vodika zbog isparavanja [18].

#### **Transport vodika cjevovodom**

Cjevovodi predstavljaju učinkovit način za masovni transport vodika, slično kao što se danas koriste za prirodni plin. U Sjedinjenim Američkim Državama već postoji oko 1600 milja cjevovoda za vodik koji služe industrijskim potrebama. Transport plinovitog vodika cjevovodom je relativno jeftin, ali izgradnja novih cjevovoda može biti skupa zbog visokih početnih investicija [18].

## **Prikolice za transport vodika**

Alternativa cjevovodima su prikolice za transport stlačenog vodika, koje pružaju fleksibilnost za dostavu vodika na mjestima bez cjevovodne infrastrukture. Prikolice mogu brzo dostaviti vodik na udaljene lokacije i idealne su za privremene ili hitne situacije. Ove prikolice, međutim, imaju ograničen kapacitet u usporedbi s cjevovodima i zahtijevaju detaljnu logistiku i sigurnosne mjere za utovar, prijevoz i istovar vodika.

Kroz različite metode transporta, od prikolica do brodova i cjevovoda, industrija teži optimizaciji logističkih lanaca za vodik kako bi se maksimizirala njegova energetska efikasnost i minimizirali troškovi. Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i izazove te će izbor optimalne metode ovisiti o specifičnim okolnostima, uključujući udaljenost, potrošnju, infrastrukturne mogućnosti i ekonomske faktore [18].

## **4. POTREBNA INFRASTRUKTURA ZA IMPLEMENTACIJU VODIKOVE TEHNOLOGIJE**

Implementacija vodikove tehnologije na širokoj skali zahtijeva razvoj opsežne infrastrukture koja bi omogućila proizvodnju, skladištenje, distribuciju i korištenje vodika kao ključnog energetskeg resursa. Ova infrastruktura uključuje nekoliko komponenata, od proizvodnih pogona do mreže za distribuciju, kao i stanica za punjenje za krajnje korisnike [19].

### **Proizvodnja**

Infrastruktura za proizvodnju vodika može uključivati elektrolizerske stanice koje koriste elektrolizu, termokemijska postrojenja i fotoelektrokemijske sustave. Ova postrojenja trebaju biti idealno smještena u blizini izvora obnovljive energije, kao što su solarni parkovi ili vjetroelektrane, kako bi se minimizirali troškovi energije i optimizirala efikasnost [19].

### **Skladištenje**

Vodik može biti skladišten u tekućem ili plinovitom stanju u velikim tankovima pod visokim pritiskom. Skladištenje tekućeg vodika zahtijeva vrlo niske temperature, što može biti energetski zahtjevno. Razvoj učinkovitih skladišnih tehnologija ključan je za smanjenje energetskeg troškova i osiguranje sigurnosti [19].

### **Distribucija**

Distribucijska mreža za vodik uključuje cjevovode, kamione za transport tekućeg vodika i željezničke sustave. Ova infrastruktura mora biti izrađena od materijala koji su otporni na koroziju koju može uzrokovati vodik te mora biti dizajnirana da minimizira bilo kakve gubitke tijekom transporta [19].

## **Stanice za punjenje**

Stanice za punjenje vodika su dio infrastrukture koji omogućava krajnjim korisnicima da pune svoja vozila vodikom. Ove stanice moraju biti opremljene visokotlačnim pumpama i sigurnosnim sistemima za zaštitu potrošača i okoline [19].

## **Primjeri gradova**

Uzmimo za primjer gradove poput Hamburga u Njemačkoj ili San Francisca u SAD-u, koji aktivno razvijaju svoju infrastrukturu za vodik:

Hamburg je pokrenuo inicijative za izgradnju 'zelene' cestovne mreže koja bi se u potpunosti oslanjala na vodikove autobuse i taksi službe. Planiraju izgraditi više elektrolizerskih stanica koje koriste vjetar sa Sjevernog mora za proizvodnju vodika.

San Francisco radi na implementaciji fotoelektrokemijskih sistema koji bi koristili kalifornijsko sunce za proizvodnju vodika te planira široku mrežu stanica za punjenje kako bi se potaknula upotreba vodikovih vozila.

Ovi gradovi su primjeri kako bi urbanističko planiranje moglo integrirati vodik kao dio svoje infrastrukture za smanjenje emisija i tranziciju prema održivim izvorima energije. Ključ uspjeha leži u sinergiji između proizvodnje, skladištenja, distribucije i korištenja, što zahtijeva koordinirano planiranje i suradnju između različitih sektora i tehnologija [19].

## **Ponašanje vodika kao goriva u automobilskoj industriji**

Vodik kao gorivo u automobilskoj industriji predstavlja jedan od elemenata u tranziciji prema održivim izvorima energije. Upotreba vodika u vozilima na gorivne ćelije nudi brojne prednosti uključujući visoku energetska efikasnost i čistu emisiju. Međutim, kao i svaka tehnologija, i vodik kao gorivo ima specifične karakteristike koje utječu na njegovo praktično korištenje, posebno u kontekstu performansi automobila kao što su domet i brzina putovanja [19].

## **Domet vozila**

Vozila na vodik, kao što su ona koja koriste gorivne ćelije, mogu postići sličan, ako ne i veći, domet u odnosu na tradicionalna vozila na fosilna goriva. Prosječno vodikovo vozilo može preći oko 500-700 kilometara na jednom punjenju, što je usporedivo s većinom modernih benzinskih vozila. Ovaj domet je značajno veći u usporedbi s električnim vozilima koje trenutno na tržištu često imaju domet od 150-400 kilometara po punjenju baterije [19].

## **Brzina punjenja**

Jedna od najvećih prednosti vodikovih vozila u odnosu na električna vozila je brzina punjenja. Vodikova vozila se mogu napuniti za samo 3-5 minuta, što je slično vremenu potrebnom za punjenje tradicionalnih vozila na benzin ili dizel. Ovo omogućava korisnicima brzu i efikasnu opciju za duga putovanja, gdje dugotrajno punjenje baterija električnih vozila može predstavljati logistički problem [19].

## **Brzina putovanja**

Što se tiče brzine putovanja, vodikova vozila ne zaostaju za tradicionalnim vozilima. Moderna vodikova vozila mogu dostići brzine koje su pariraju brzinama koje postižu benzinska i dizel vozila. Tehnologije gorivnih ćelija omogućavaju snažan i kontinuiran izlaz energije, što znači da vozila ne samo da mogu brzo putovati, već i održavati visoke brzine bez degradacije performansi ili dosega [19].

## **Primjeri iz prakse**

Toyota Mirai i Hyundai Nexo su primjeri vozila na vodik koja su već dostupna na tržištu i koja demonstriraju ovakve performanse. Toyota Mirai, na primjer, nudi domet do 650 kilometara po punjenju i može se napuniti u samo pet minuta, pružajući praktičnost i performanse koje su potrebne za svakodnevnu upotrebu [19].

## 5. USPOREDBA VODIKA S OSTALIM GORIVIMA

Korištenje vodika kao goriva u automobilske industriji ima veliki potencijal zahvaljujući visokom dometu, brzom mogućnosti punjenja i sposobnosti održavanja visokih brzina putovanja. Dok se infrastruktura za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika razvija, očekuje se da će vodikova vozila postati još praktičnija i dostupnija za široku uporabu, što bi moglo značajno doprinijeti globalnim naporima za smanjenje emisija stakleničkih plinova i promicanje održivih transportnih rješenja [20].

### 5.1. Usporedba pogona vodikom s dizelom

Da bismo shvatili utjecaj koji prijelaz na vodik kao gorivo ima na industriju, važno je razmotriti kako se vodik uspoređuje s trenutno dominantnim pogonskim gorivima, poput dizela i baterija. Analizirat ćemo vodik u kontekstu složenosti procesa transporta i njegovog doprinosa dekarbonizaciji, što će nam pomoći da identificiramo prednosti i nedostatke vodika u odnosu na dominantne izvore energije [20].

Dizel trenutno dominira kao izbor goriva u rudarskoj industriji zbog svoje sposobnosti da proizvede znatnu količinu energije, njegove relativne sigurnosti u korištenju i fleksibilnosti koje pruža rudarskim operaterima. Međutim, unatoč ovim prednostima, dizel gorivo ima značajne nedostatke koji bi mogli utjecati na njegovu buduću upotrebu, posebno u kontekstu globalnih nastojanja za dekarbonizaciju. Kako bi vodik postao ekonomski konkurentan dizelu, neophodno je daljnje unapređenje tehnologije proizvodnje vodika.

Jedan od glavnih problema s dizelom je taj što njegovo sagorijevanje proizvodi velike količine stakleničkih plinova, što postaje sve veći ekološki problem. Ambicije za smanjenje emisija stakleničkih plinova i postizanje nultih emisija do 2050. godine čine dizel sve manje poželjnim izborom u rudarstvu. Stoga, iako se trenutno vodik ne može direktno natjecati s dizelom po cijeni i rasprostranjenosti, on predstavlja vitalnu alternativu u kontekstu ekološke održivosti [20].

Goriva poput dizela odgovorna su za veliki dio emisija stakleničkih plinova u rudarstvu, stvarajući između 30-50% emisija I. stupnja na radilištima, što može dostići i do 80%. Nasuprot tome, vodik koji se proizvodi iz obnovljivih izvora energije može značajno smanjiti te emisije, slično kao i električna vozila koja se napajaju iz obnovljivih izvora. To pokazuje da je usporedba vodikovog pogona s baterijskim pogonom možda i važnija od usporedbe s dizelom.

Uz to, daljnji razvoj i optimizacija tehnologija za proizvodnju vodika mogli bi dodatno poboljšati njegovu konkurentnost. Inovacije u elektrolizi i poboljšanja u učinkovitosti gorivnih ćelija mogu dovesti do smanjenja troškova i povećanja dostupnosti vodika kao goriva. Ovo bi moglo omogućiti vodik da ne samo da zamijeni dizel kao glavni izvor energije u rudarstvu, već i da pruži održivu alternativu koja bi mogla transformirati cijelu industriju, čineći je čistom i zelenijom. U konačnici, budućnost vodika u rudarstvu izgleda obećavajuće kao dio šire strategije za smanjenje utjecaja industrije na okoliš i poticanje energetske tranzicije prema održivijim izvorima [20].

## **5.2. Usporedba pogona vodikom s baterijskim pogonom**

Usporedba pogona na vodik s baterijskim pogonom otkriva različite prednosti i nedostatke oba sustava, posebno u kontekstu teških industrijskih aplikacija kao što je rudarstvo. Baterijski pogon, iako efikasan za laka vozila i korištenje u situacijama gdje nosivost i domet nisu kritični faktori, može predstavljati izazov u rudarskim operacijama. Rudarski strojevi koji rade kontinuirano svakodnevno zahtijevaju izdržljivo i pouzdano rješenje koje može podnijeti teške uvjete rada bez potrebe za čestim stankama za punjenje.

Jedan od glavnih problema s baterijskim pogonom u rudarstvu je dodatna težina baterija koja direktno utječe na nosivost vozila. Svaka dodatna jedinica težine koju baterija dodaje smanjuje kapacitet vozila za transport mineralne sirovine, što može biti značajan ekonomski i operativni nedostatak. U situacijama gdje je maksimalna nosivost od kritične važnosti, veća težina baterija znači da vozilo može transportirati manje sirovine po putovanju, čime se povećavaju operativni troškovi i smanjuje efikasnost [20].



S druge strane, vozila na vodik nude nekoliko ključnih prednosti koje ih čine idealnim za upotrebu u teškim industrijskim i transportnim aplikacijama. Vodikovi pogoni pružaju veći domet u odnosu na baterijske sustave, što je ključno za operacije koje zahtijevaju dugotrajni transport bez potrebe za čestim punjenjem. Osim toga, vodikovi strojevi su pogodniji za dugotrajnu upotrebu jer ne proizvode lokalne emisije zagađujućih čestica kao što su one koje otpuštaju dizelski motori, generiraju manje buke i topline te zahtijevaju kraće vrijeme punjenja u usporedbi s baterijskim strojevima [20].

Ove karakteristike čine vodik privlačnijim za industrije koje teže minimiziranju svojeg ekološkog otiska i optimizaciji operativne učinkovitosti. Vodikovi strojevi, s njihovom sposobnošću da se brže napune i dulje rade, mogu značajno smanjiti vremenski gubitak povezan s punjenjem, što je ključno u industrijskim operacijama koje se oslanjaju na kontinuiranu proizvodnju i transport.

U kontekstu sve većih ekoloških regulativa i potrebe za smanjenjem emisija stakleničkih plinova, vodik kao gorivo nudi održivu alternativu koja može pomoći rudarskoj industriji i drugim sektorima da postignu svoje ekološke ciljeve dok istovremeno zadržavaju visoku razinu operativne efikasnosti i ekonomske isplativosti [20].

## 6. PRAVNA REGULATIVA

Dok globalna zajednica nastoji udovoljiti svojim obvezama prema dekarbonizaciji, više od 25 vlada širom svijeta već je objavilo sveobuhvatne strategije za ubrzanje razvoja vodikovog tržišta do 2050. godine. Krovni europski strateški dokumenti poput Europskog zelenog plana, Strategija za vodik za klimatski neutralnu Europu i Rezoluciju o europskoj strategiji za vodik, obuhvaćaju širok spektar prioriteta koji uključuju, ali nisu ograničeni na, postavljanje standarda za intenzitet ugljika u proizvodnji vodika. Prijelaz na klimatski neutralan energetska sustav treba pažljivo planirati, potiče se čista proizvodnja vodika koji može smanjiti emisije stakleničkih plinova s pomoću više načina uporabe, razvoj trajnih opskrbnih lanaca, kreiranje stimulativnih investicijskih portfelja, političke poticaje, adaptaciju radne snage, poticanje međunarodne suradnje, i uspostavu rigoroznih plinskih standarda i infrastrukture. Središnji element većine ovih strategija jest potreba za koherentnošću u regulatornim politikama koje bi omogućile robustan razvoj globalnog vodikovog tržišta [21].

U težnji za globalnim pristupom, brojne zemlje već planiraju uvođenje dodatnih strategija u nadolazećim godinama. Kako se interes za vodik kao ključnu energetska opciju širi, ključno je stvoriti regulirano tržišno okruženje koje bi omogućilo efikasnu trgovinu i smanjenje troškova, koristeći političke alate koji su prilagođeni specifičnostima pojedinih zemalja.

S obzirom na to da mnoge zemlje, uključujući one u Bliskoistočnoj i Sjevernoafričkoj regiji (MENA), još uvijek ne posjeduju cjelovit regulatorni okvir, postoji značajna prilika za postavljanje temelja za vodikovo gospodarstvo koje bi moglo koristiti obilje lokalnih obnovljivih izvora energije i strateške geografske lokacije za diversifikaciju ekonomije dalje od izvoza nafte i plina.

Trenutno globalno tržište vodika većinom funkcionira na temelju bilateralnih ugovora, a standardi i cijene su često specifični za pojedine slučajeve. Za daljnji razvoj vodikove ekonomije neophodno je proširiti postojeće regulatorne okvire kako bi se uključile inovacije i nove tehnologije koje omogućuju širu upotrebu vodika [21].

Potrebno je formirati jasne i konzistentne regulatorne principe koji će regulirati sve aspekte proizvodnje, skladištenja, transporta i upotrebe vodika. To uključuje definicije čistog vodika, koje

se razlikuju od države do države, i standardizaciju materijala koji se koriste za skladištenje i transport vodika kako bi se izbjegli rizici poput krtosti materijala ili neadekvatne žilavosti.

Sigurnost u rukovanju vodikom je od izuzetne važnosti, posebno kad su u pitanju transport i skladištenje. Države trebaju razvijati i usvajati međunarodne standarde koji će omogućiti sigurno rukovanje i minimizirati rizike od nezgoda. To uključuje regulacije vezane za izloženost opasnim tvarima, sigurnosne protokole za opremu i cjevovode, te precizne specifikacije za materijale koji su kompatibilni s vodikom.

Kako se tržište vodika razvija, postaje imperativ da se kroz međunarodnu suradnju usklade tehnološki i ekološki standardi. Ovo je ključno ne samo za zemlje koje izvoze vodik, već i za one koje planiraju koristiti vodik za zadovoljavanje svojih energetske potrebe. Implementacija jasnih i pravičnih pravila pomoći će u stabilizaciji tržišta vodika i omogućiti njegovu održivu globalnu trgovinu [21].

## 7. ZAKLJUČAK

Vodik predstavlja jedan od najperspektivnijih kandidata za transformaciju globalnog energetskeg sistema u pravcu održivosti i ekološke prihvatljivosti. Uvod u ovo istraživanje naglašava ključne prednosti vodika, uključujući njegovu visoku energetske gustoću i sposobnost da proizvede energiju bez emisije štetnih plinova. Unatoč tehničkim i ekonomskim izazovima koje vodik još uvijek nosi, ovaj rad detaljno razmatra kako bi ove prepreke mogle biti prevladane kroz inovacije u proizvodnji, skladištenju i distribuciji. Kao rezime, vodik se ističe, ne samo kao alternativa tradicionalnim fosilnim gorivima zahvaljujući svojim čistim svojstvima izgaranja, već kao i ključni element u dekarbonizaciji teško transformabilnih sektora kao što su industrija i teški transport. Ovaj rad jasno pokazuje kako vodik, iako trenutno zaostaje za fosilnim gorivima u nekim aspektima, poput infrastrukture i početnih troškova, njegove dugoročne koristi u smislu smanjenja emisija i održavanja energetske sigurnosti čine ga nezaobilaznim izborom za budućnost. Strategije koje uključuju vodik su već počele dobivati na težini na globalnom nivou, sa preko 25 vlada koje su već objavile planove za njegovo šire korištenje. Vodik nudi obećavajuću priliku za smanjenje globalne ovisnosti o fosilnim gorivima, promoviranje čistih industrijskih tehnologija, i postizanje ciljeva Pariškog sporazuma o klimatskim promjenama. Također, razvoj i implementacija efikasnih tehnologija za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika mogli bi značajno ubrzati njegovu adaptaciju kao glavnog energetskeg resursa. Kroz multidisciplinarni pristup, koji uključuje napredak u tehnologiji gorivnih ćelija, optimizaciju logističkih lanaca i razvoj sigurnih infrastrukturnih rješenja, vodik ima potencijal da ima centralnu ulogu u globalnom energetskeg prelazu. Ukratko, kontekst proizvodnje vodika odražava potrebu za čistom i održivom energijom te traži nove načine za smanjenje emisija stakleničkih plinova i diversifikaciju energetskeg sustava. Budućnost vodika kao temelja za održivi energetskeg sistem je svijetla, pružajući održivo gorivo za različite sektore i omogućujući skladištenje energije iz obnovljivih izvora, pod uvjetom da se nastavi sa globalnim naporima na usavršavanju tehnologija i politika koje će omogućiti njegovu širu primjenu.

## 8. LITERATURA

[1.] Kalea, M., Obnovljivi izvori energije, energetska pogled. Kiklos-Krug knjige d.o.o., Zagreb, 2014., 17-44

[2.] <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf> (Pristup 16. travnja 2024).

[3.] Hoang, A. T., Van Viet, P., A Study on a Solution to Reduce Emissions by Using Hydrogen as an Alternative Fuel for a Diesel Engine Integrated Exhaust Gas Recirculation. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics Inc., Vol. 2235. (2020.) 22-24

[4.] <https://ba.toptitech.com/info/classification-of-hydrogen-production-methods-88765204.html> (Pristup 6. svibnja.2024.)

[5.] <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112703> (Pristup 17. travnja 2024).

[6.] Alvera, M., The Hydrogen Revolution: A Blueprint for the Future of Clean Energy. Hachette Book Group, New York, 2020., str. 14-34

[7.] Kovač, A., Marciuš, D., Paranos, M., Thermal management of hydrogen refuelling station housing on an annual level. International Journal of Hydrogen Energy, 46 (2017) 29-44.

[8.] Atkins P, de Paula J. Physical Chemistry: Thermodynamics and Kinetics. 10th ed. ISBN 1-4641-2451-5.

[9.] Quaschnig, V., Understanding renewable energy systems. Bath Press, London, United Kingdom, 2005. str. 4-33

[10.] Vermeiren, Ph., Adriansens, W., Moreels, J. P., Leysen, R., Evaluation of the Zirfon® separator for use in alkaline water electrolysis and Ni-H<sub>2</sub> batteries. International Journal of Hydrogen Energy, 23 (1998), str 321-324

[11.] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektroliza\\_vode](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektroliza_vode) (Pristup 5. svibnja 2024.)

[12.] Đukić, A., Alar, V., Firak, M. (2024). The Nickel Foam as the Electrodes Material for an Alkaline Electrolyser. 7th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Ohrid, Macedonia, 2020., str.19

[13.] Meadows, D., Randers, J., Meadows, D. Limits of Growth. Earthscan, UK., 1998

[14.] <https://supeus.hr/wp-content/uploads/2020/05/Tehnologija-rasplinjavanja-biomase.pdf?x69875>, (Pristup 5. svibnja 2024.)

[15.] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>, (Pristup 5. svibnja.2024.)

[16.] Schmelz, W., Hochman, G., Miller K. (2020). Total cost of carbon capture and storage implemented at a regional scale: northeastern and midwestern United States.

[17.] [https://www.elizabethqueenseaswann.com/Boat\\_Development\\_Specifications/Liquid\\_Hydrogen\\_Cylinders\\_Mass\\_Storage\\_Ships\\_Hull\\_Calculations4000Nautical\\_Miles\\_Range.html](https://www.elizabethqueenseaswann.com/Boat_Development_Specifications/Liquid_Hydrogen_Cylinders_Mass_Storage_Ships_Hull_Calculations4000Nautical_Miles_Range.html) (Pristup 7. svibnja 2024.)

[18.] Parfomak, P. W., Pipeline Transportation of Hydrogen: Regulation, Research, and Policy. Izvješće, Congressional Research Service, 2021., str.33-43

[19.] Gerboni, R., Introduction to hydrogen transportation – Compendium of Hydrogen Energy, 2nd ed.: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure. Woodhead Publishing Series in Energy, 2016, str.56

[20.] Michel, M., Achieving Scalability in Hydrogen Projects for Mines Hydrogen And Mines Virtual Summit Report, Energy and Mines Magazine, 2021.

[21.] <https://www.cer-rec.gc.ca> (Pristup 12. travnja 2024).