

Ante Višić
HEP Operator distribucijskog sustava
ante.visic@hep.hr

Marijo Brkić
HEP Operator distribucijskog sustava
marijo.brkic@hep.hr

Kruno Trupinić
HEP Operator distribucijskog sustava
kruno.trupinic@hep.hr

Renato Ćučić
HEP Operator distribucijskog sustava
renato.cucic@gmail.com

VODIK – ENERGIJA BUDUĆNOSTI

SAŽETAK

Jedan od najvećih izazova trenutno je kako se efikasno boriti protiv klimatskih promjena. Rješenje leži u smanjenju emisije stakleničkih plinova. Vodik ima veliki potencijal da bude dio rješenja. Vodik je najčišće gorivo koje je ekološki prihvatljivo. Ima golemi potencijal da u budućnosti zadovolji većinu svjetskih energetske potrebe, čime bi zamijenio trenutnu infrastrukturu baziranu na fosilnom gorivu. Očekuje se da će riješiti problem nedostatka energije u bliskoj budućnosti, pogotovo u geografski zahtjevnijim područjima i područjima s oštrom klimom (pustinje, led, itd.). Tehnologije koje su već danas dostupne omogućuju vodikovu proizvodnju, skladištenje, prijenos i korištenje energije na različite načine. Proizvodnja vodika moguća je iz velikog izbora goriva, uključujući obnovljive izvore energije, nuklearnu energiju, prirodni plin, ugljen i naftu. Može se transportirati kao plin cjevovodima ili u tekućem obliku brodovima, slično kao ukapljeni prirodni plin (LNG). Može se transformirati u električnu energiju i metan za napajanje domova i industrije stočne hrane te u goriva za automobile, kamione, brodove i zrakoplove.

Ključne riječi: vodik, proizvodnja, transport, skladištenje, implementacije u energetska mreža

HYDROGEN – ENERGY OF THE FUTURE

SUMMARY

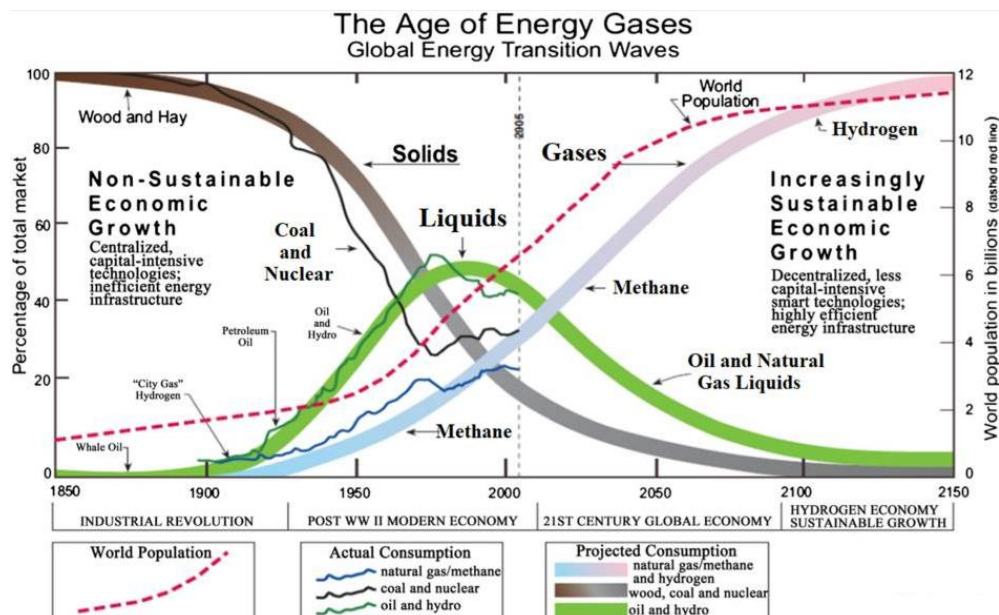
One of the biggest challenges today is how to effectively combat climate change. The solution lies in reducing greenhouse gas emissions. Hydrogen has great potential to be part of the solution. Hydrogen is the cleanest fuel that is environmentally friendly. It has enormous potential to meet most of the world's energy needs in the future, replacing the current fossil fuel-based infrastructure. It is expected to solve the problem of energy shortages in the near future, especially in geographically more demanding areas and areas with harsh climates (deserts, ice, etc.). Technologies that are already available today allow hydrogen to be produced, stored, transported and used in various ways. Hydrogen can be produced from a wide range of fuels, including renewable energy sources, nuclear energy, natural gas, coal and oil. It can be transported as a gas through pipelines or in liquid form by ships, similar to liquefied natural gas (LNG). It can be transformed into electricity and methane to power homes and the feed industry, and into fuels for cars, trucks, ships and planes.

Key words: hydrogen, production, transport, storage, implementation in the power grid

1. UVOD

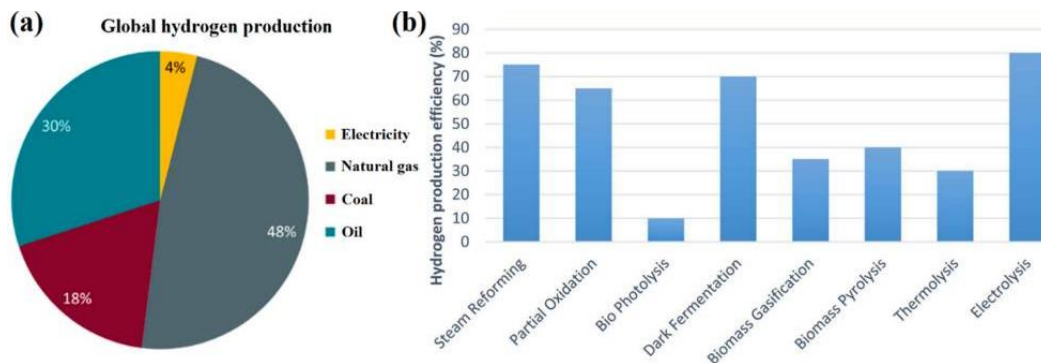
Potreba čovječanstva za energijom konstantno raste. Socijalni i ekonomski razvoj, razvoj zdravstvene zaštite, osnovne ljudske potrebe poput rasvjete, grijanja, kuhanja, mobilnosti i komunikacija su u porastu, te iziskuju sve više energije. S povećanom generacijom električne energije neizbježno dolazi do povećanja količine stakleničkih plinova koji imaju nepovoljan utjecaj na klimatske promjene. Zadnjih par desetljeća taj problem se nalazi u fokusu energetskeg sektora i aktivno se pokušava riješiti. Obnovljivi izvori energije za pomoć u ublažavanju klimatskih promjena izvrstan su pristup koji mora biti održiv kako bi se zadovoljila potražnja za energijom budućih generacija. Nažalost, obnovljivi izvori energije kao što su sunce, vjetar, valovi oceana, jako su zavisni o vremenskim uvjetima što rezultira isprekidanom proizvodnjom. Optimizacija mreže koja ima veliki postotak obnovljivih izvora energije, te konstantno povećanje potražnje predstavlja nepremostiv izazov. Vodik se nameće kao poveznica koja nedostaje. Energija iz vodika mogla bi se stvarati u industrijskim razmjerima bez oslanjanja na okoliš te vremenske uvjete. Vodik se može dobiti raznim postupcima baziranim na specifičnoj industrijskoj infrastrukturi pojedine zemlje što ga čini vrlo fleksibilnim energetskim gorivom.

U sve većem broju studija, vodik se promatra kao kritična komponenta globalnog održivog energetskeg plana koji značajno umanjuje klimatske promjene, onečišćenje zraka i globalno zatopljenje. Prema trendu razvoja ljudske civilizacije, svijet je pretvarao energiju iz jednog oblika u drugi. Na slici 1 prikazana su predviđanja tranzicije iz krutih u tekuća i plinovita goriva.



Slika 1. Prelazak s krutih na tekuća i plinovita goriva

Moguće je proizvesti vodik iz ekološki neutralnih izvora (sunce, vjetar, plima, itd.), što se smatra obnovljivim izvorima energije. Unatoč tome, trenutno većina vodika se proizvodi iz fosilnog goriva, a samo mali postotak se dobiva elektrolizom vode ili iz biomase. Oko 48% vodika se dobiva iz prirodnog plina, 18% iz ugljena i oko 30% iz nafte. Elektrolizom vode dobiva se ostalih 4%.



Slika 2. Globalna proizvodnja vodika - metode

2. Metode proizvodnje vodika

Različiti procesi za proizvodnju vodika mogu se karakterizirati označavanjem vodika odgovarajućom bojom. Iako je vodik bezbojan plin, ove su oznake sada uobičajene u upotrebi kao skraćeni opis metode dobivanja vodika.

Sivi vodik dobiva se parnim reformiranjem metana, a proizvedeni CO₂ ispušta se u atmosferu.

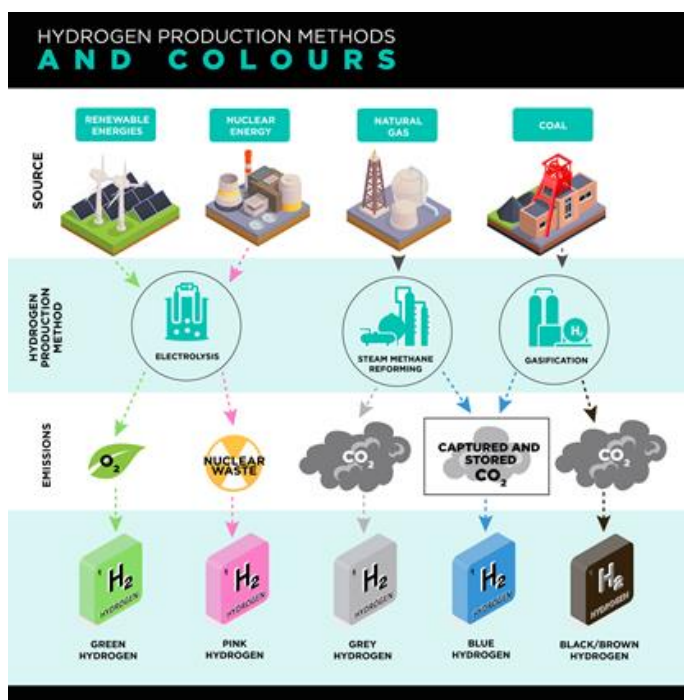
Plavi vodik dobiva se parnim reformiranjem metana, ali se CO₂ hvata i pohranjuje u CCUS sustavu.

Zeleni vodik dobiva se elektrolizom vode (ili pare) korištenjem električne energije dobivene iz obnovljivih izvora poput vjetrova ili sunca.

Ružičasti vodik dobiva se elektrolizom vode pri čemu se električna energija dobiva iz nuklearne energije.

Crni/smeđi vodik dobiva se iz ugljena rasplinjavanjem, ali to je proces s visokim zagađenjem jer se CO i CO₂ ispuštaju u atmosferu.[4]

Gore navedene boje su boje koje se koriste u standardom opisu metode dobivanja vodika. U novije vrijeme pojavljuje se sve više boja koje pokušavaju na detaljniji način opisati metodu dobivanja, ali za potrebe ovog rada, ova paleta boja je dovoljna. Možemo još spomenuti bijeli vodik. Bijeli vodik odnosi se na geološki vodik koji se nalazi u prirodnim podzemnim naslagama.



Slika 3. Metode proizvodnje vodika i boje

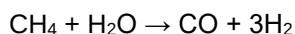
2.1. Metode dobivanja vodika iz fosilnih goriva

2.1.1. Reformiranje parom

Većina vodika koji se danas nalazi na tržištu je proizvedena metodom reformiranja parom. Reformiranje parom je proces koji koristi paru za razgradnju ugljikovodika (najzastupljeniji je metan) na vodik, ugljikov monoksid i ugljikov dioksid. Razna goriva se koriste u navedenom procesu kao što su prirodni plin i LPG, pa čak i nafta i u nekim slučajevima i kerozin. Proces se odvija u dva glavna koraka.

1. **Primarno reformiranje:** U primarnoj fazi reformiranja, prirodni plin (metan) reagira s parom uz prisutnost katalizatora (obično baziran na niklu) pri visokim temperaturama (od 700 - 900°C).

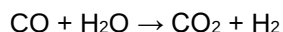
- reakcija reformiranja parom



Reakcijom nastaju ugljikov monoksid i tri molekule vodika.

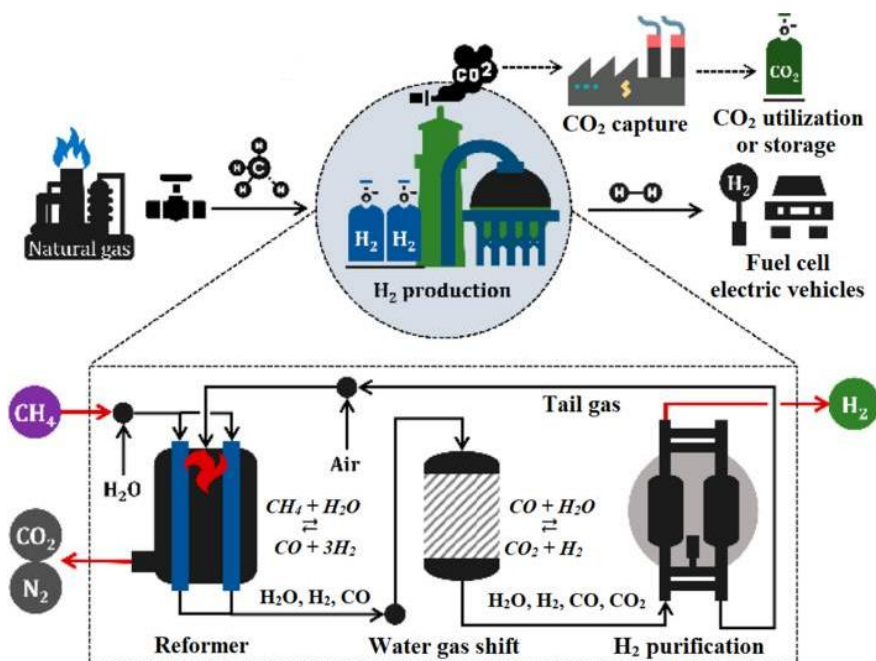
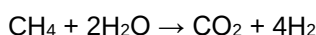
2. **Sekundarno reformiranje (Water gas shift):** U ovoj reakciji (WGS) ugljični monoksid dalje reagira s parom te se formira ugljični dioksid i još vodika

– WGS reakcija



Reakcijom nastaju ugljikov dioksid i molekula vodika.

Dakle, ukupna reakcija se može zapisati na sljedeći način:



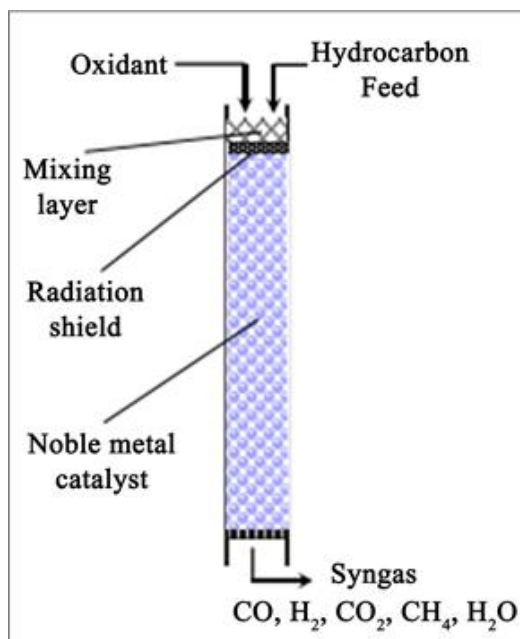
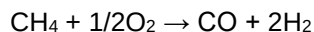
Slika 4. Skica parnog reformiranja metana za industrijsku proizvodnju vodika

Prednosti parnog reformiranja su vrlo velika učinkovitost metode, dobiva se vodik visoke čistoće (99,99%), mogućnost proizvodnje velikih količina vodika uz relativno niske troškove, metan kao gorivo je dostupno na globalnoj razini, proces je pouzdan s infrastrukturom širom svijeta, te se sam proces kontinuirano razvija.

Unatoč svojim prednostima, parno reformiranje ima nekoliko nedostataka, posebno u pogledu utjecaja na okoliš. Glavni izazov parnog reformiranja je proizvodnja ugljičnog dioksida (CO_2) kao nusprodukta. Za svakih 1kg proizvedenog goriva vodika proizvede se oko 8 kg CO_2 . Za rješavanje ovog problema razmatraju se razne strategije. Jedna od njih je implementacija tehnologija za hvatanje i skladištenje CO_2 . U drugom smjeru, kao gorivo može se koristiti biomasa, obnovljivi organski materijal. Biomasa bi mogla potencijalno ponuditi održiviji izvor vodika uz istovremeno smanjenje ukupnih emisija ugljika u usporedbi s fosilnim gorivima. Međutim, reformiranje parom biomase velikih razmjera suočava se s izazovima koji se odnose na dostupnost sirovine i optimizaciju procesa.

2.1.2. Parcijalna oksidacija

Parcijalna oksidacija je termokemijski proces koji uključuje nepotpuno izgaranje ugljikovodične sirovine s ograničenom količinom kisika (obično zraka ili čistog kisika). Za razliku od potpune oksidacije, koja proizvodi ugljični dioksid (CO_2) kao primarni produkt, djelomična oksidacija stvara sintetički plin - mješavinu ugljičnog monoksida (CO) i vodika (H_2) zajedno s nizom nusproizvoda. Opća kemijska jednačba za djelomičnu oksidaciju ugljikovodika, poput metana, je sljedeća:



Slika 5. Princip katalitičke parcijalne oksidacije

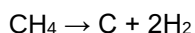
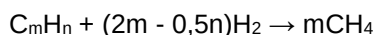
Djelomična oksidacija provodi se na visokim temperaturama (obično $800\text{--}1200^\circ\text{C}$) i zahtijeva pažljivo kontrolirani omjer kisika i ugljika kako bi se osiguralo da proces ostane nedovršen, čime se izbjegava stvaranje prekomjerne količine CO_2 . Proizvedeni sintetički plin CO može se dalje preraditi kako bi se proizveo čisti vodik kroz reakciju reformiranja parom (water gas shift).

Jedna od prednosti ove metode je jaka egzotermna reakcija s kisikom, što negira potrebu za vanjskim izvorom energije. Nadalje, ovakvi sustavi obično imaju manji fizički otisak u usporedbi s drugim tehnologijama proizvodnje vodika kao što je reformiranje pare. Zbog toga su reaktori djelomične oksidacije osobito poželjni u okruženjima gdje je prostor limitiran ili gdje je kapitalna investicija važna.

Slično kao i kod reformiranja parom ova metoda proizvodi stakleničke plinove, a kao rješenje se nameće implementacija tehnologija za hvatanje i skladištenje CO_2 .

2.1.3. Piroliza

Piroliza je tehnika toplinske razgradnje koja se odvija u uvjetima bez kisika ili u anaerobnim uvjetima kako bi se razni laki tekući ugljikovodici pretvorili u vodik i druge elemente ugljika. Ovaj proces se odvija na temperaturama u rasponu od 400°C do 900°C . Uporaba katalizatora prijelaznih metala poput Ni , Fe ili Co može sniziti temperaturu postupka pirolize. Piroliza ugljikovodika može se opisati sljedećim jednačbama:



Proces reakcije u pirolizi je kompleksan i sastoji se od nekoliko procesa:

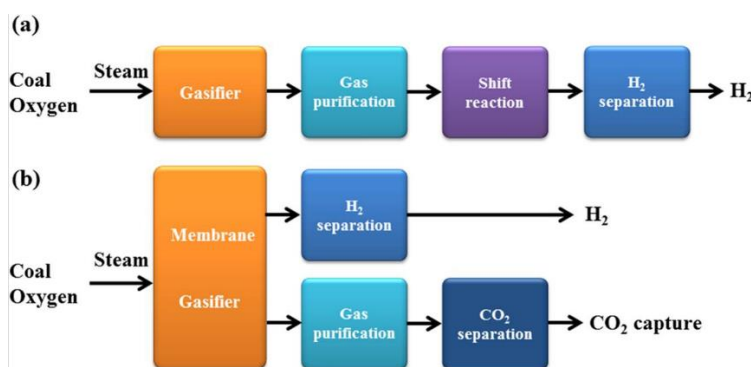
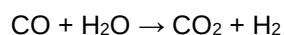
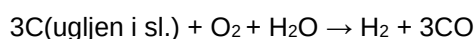
Termalno kreiranje - Organska sirovina prolazi kroz toplinsko kreiranje, razbijajući dugolančane ugljikovodike u kraće molekule, uključujući vodik.

Dehidracija i dekarbonizacija - Razgradnja sirovine često oslobađa vodik uz druge plinove, kao što je metan, koji se može dalje reformirati za proizvodnju dodatnog vodika

Formiranje ugljika: Ključni nusproizvod pirolize je ugljik, koji se može odvojiti za upotrebu u različitim primjenama ili koristiti kao ugljično neutralni materijal (ugljkove nanocijevi, ugljikova nanovlakna i ugljkove sfere).

2.1.4. Rasplinjavanje fosilnog goriva

Tehniku rasplinjavanja fosilnih goriva možemo opisati kao niz termokemijskih reakcija između sredstva za rasplinjavanje, poput kisika, pare, zraka ili ugljičnog dioksida, i fosilnog goriva, poput ugljena, koje se odvijaju na visokim temperaturama. Na primjer, proces termokemijske pretvorbe poznat kao rasplinjavanje ugljena pretvara ugljen u plinovite proizvode - vodik i ugljični monoksid. Ovaj postupak pokušava zamijeniti izgaranje ugljena kako bi se smanjile opasne emisije i povećala energetska gustoća goriva. Ključna prednost ove strategije je jeftinije gorivo od reformiranja prirodnog plina. Međutim, s obzirom na visok sadržaj ugljika, glavni problem s proizvodnjom vodika putem rasplinjavanja ugljena za razliku od alternativnih metoda koje koriste različite sirovine povezan je s većim emisijama CO₂. Zbog toga ova metoda zahtjeva implementaciju tehnologija hvatanja ugljika. Jednadžba reakcije je:



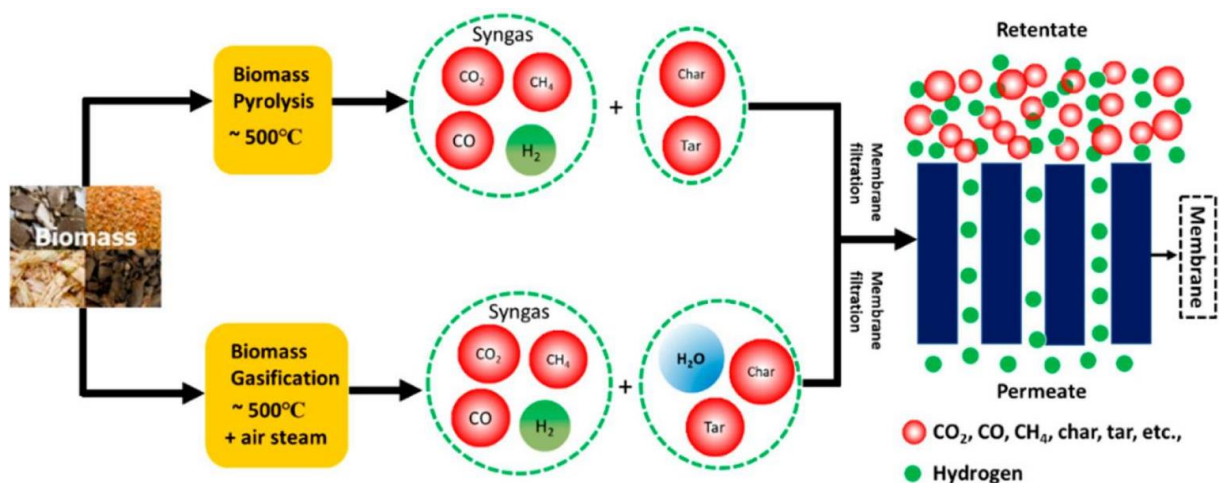
Slika 6. Shema proizvodnje vodika iz: a) tradicionalni proces rasplinjavanja ugljena, b) modificirani proces membranskog rasplinjavanja ugljena s hvatanjem CO₂

2.2. Metode dobivanja vodika iz obnovljivih izvora

2.2.1. Vodik iz biomase

Biomasa, poput poljoprivrednog otpada, drva ili namjenskih energetskih usjeva, može se pretvoriti u vodik pomoću termokemijskih procesa poput rasplinjavanja ili pirolize. Rasplinjavanje uključuje zagrijavanje biomase u prisutnosti kontrolirane količine kisika za proizvodnju sintetičkog plina bogatog vodikom (mješavina vodika, ugljikovog monoksida i drugih plinova). Nastali plin se zatim može dalje obraditi kako bi se izolirao vodik. Termokemijske metode su privlačne jer je biomasa obnovljivi izvor, a ti se procesi mogu implementirati u različitim razmjerima kako bi se osigurala lokalna proizvodnja vodika.

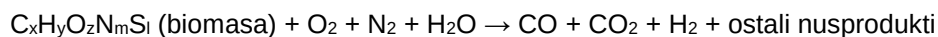
Najstarija i najpoznatija metoda za korištenje biomase kao izvora proizvodnje vodika je rasplinjavanje, koje koristi pažljivo regulirani proces koji uključuje toplinu, paru i kisik za pretvaranje biomase u vodik i druge proizvode bez izgaranja. Budući da se ugljični dioksid uklanja iz atmosfere tijekom razvoja biomase, ova metoda može imati zanemarive neto emisije ugljika, posebno ako se koristi tehnologija hvatanje i skladištenje ugljika.



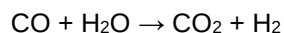
Slika 7. Proces pirolize i rasplinjavanja u proizvodnji vodika iz biomase

Ovu metodu možemo podijeliti na dva procesa.

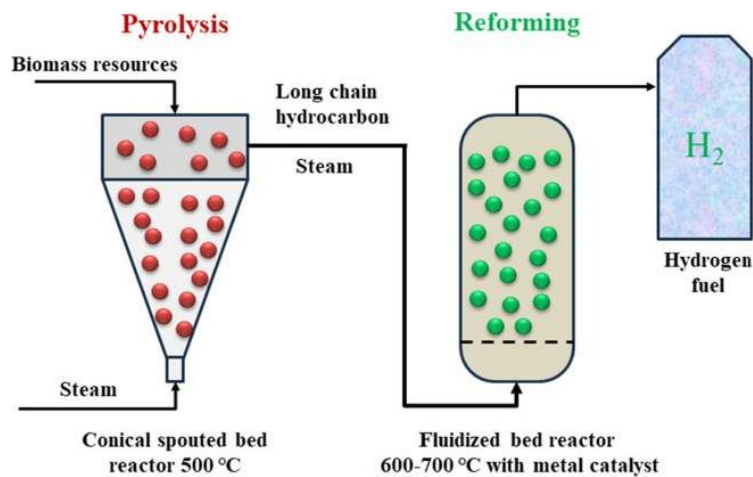
Gasifikacija (preko 500°C bez gorenja):



WGS reakcija:



Još jedna metoda za proizvodnju vodika iz biomase je piroliza. Piroliza je modificirana tehnologija rasplinjavanja u odsutnosti kisika. U usporedbi s ugljenom, biomasu je teže gasificirati. Plin koji napušta rasplinjač sadrži ugljikovodike, pa je potreban dodatni korak da bi se dobio čisti vodik, te ugljikov monoksid i ugljikov dioksid. Ugljikov monoksid se pretvara u ugljikov dioksid pomoću pare uz nastanak vodika (shift reaction). Na kraju, vodik se sortira i pročišćava.



Slika 8. Proces pirolize i reformiranja u proizvodnji vodika iz biomase

2.2.2. Elektroliza vode

Elektroliza vode je proces kojim se molekule vode razgrađuju na vodik i kisik primjenom električne struje. Osnovna jednačba za razdvajanje vode je:



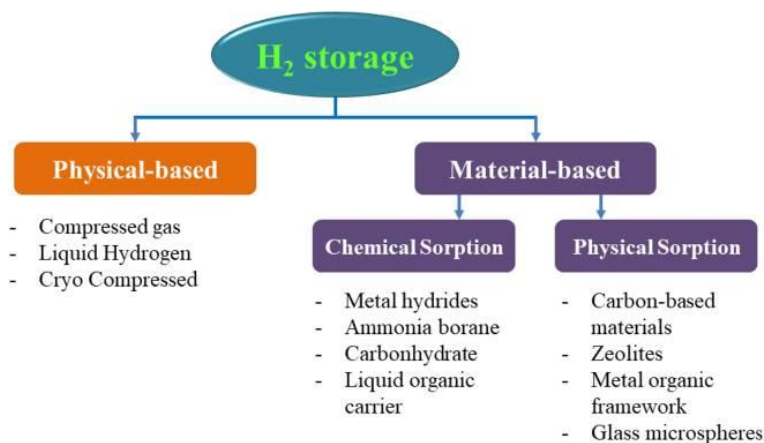
Ova reakcija odvija se u dvije polu-reakcije: reduksijska polu-reakcija, gdje se vodik proizvodi na katodi, i oksidacijska polu-reakcija, gdje se kisik proizvodi na anodi. Učinkovitost razdvajanja vode ovisi o

izvoru energije koji se koristi za pokretanje procesa i dizajnu sustava elektrolize. Energija potrebna za cijepanje vode je približno 1,23 V pod standardnim uvjetima. Međutim, praktični sustavi elektrolize obično zahtijevaju više napone zbog neučinkovitosti procesa. Krajnji cilj ove tehnike je razviti elektrolitički sustav koji stvara vodik i kisik koristeći morsku vodu kao elektrolit. Jedna od najvećih prednosti ove tehnike je da se može dobiti vodikov produkt čistoće do 95%.

Kako bi cijepanje vode postalo istinski održiv i ekološki prihvatljiv proces, za pogon elektrolize koriste se obnovljivi izvori energije. Obnovljivi izvori energije poput sunca, vjetra i hidroenergije nude čistu i gotovo neiscrpu opskrbu energijom. Kada su integrirani s razdvajanjem vode, ovi izvori omogućuju proizvodnju vodika bez emisije stakleničkih plinova.

3. Skladištenje i transport vodika

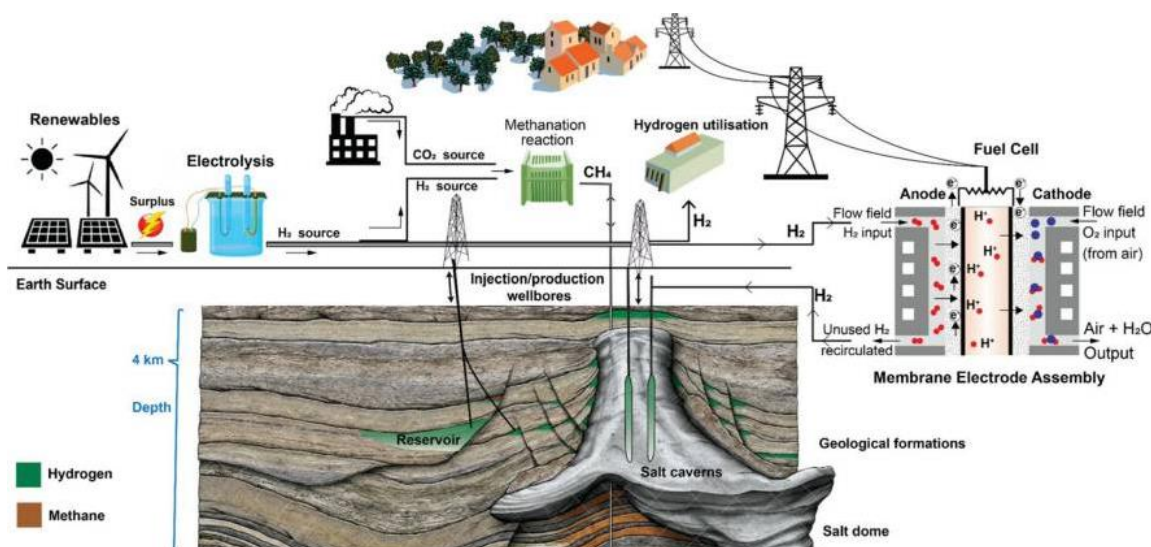
Skladištenje vodika je proces koji osigurava učinkovito i sigurno transportiranje ili kasnije korištenje. Skladištenje vodika može se podijeliti u dvije vrste: stacionarno skladištenje i mobilno skladištenje. Glavne primjene tehnika stacionarnog skladištenja su stacionarna proizvodnja energije i skladištenje na mjestu proizvodnje ili upotrebe. Primjena mobilnih uređaja koristi se za premještanje vodika na mjesto za upotrebu ili skladištenje ili za korištenje vodika u vozilima. Skladištenje vodika možemo podijeliti na fizičku pohranu i pohranu pomoću materijala.



Slika 9. Metode skladištenja vodika

3.1. Spremišta komprimiranog plinovitog vodika

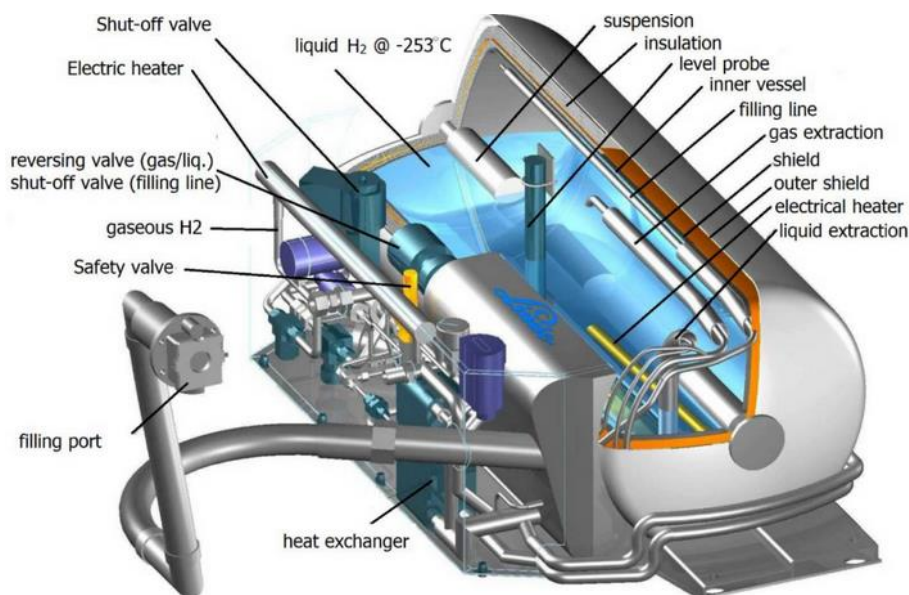
Vodikovo gorivo skladišti se kao plin raznim tehnikama. Za potrebe transporta koristi se stlačeni plin u posebnim spremnicima. Čelik s karbonskim pokrovom ili lagani kompoziti mogu se koristiti za izradu spremnika. Najpopularnija tehnika skladištenja vodika uključuje njegovo komprimiranje na tlak veći od 300 bara. Cryo komprimirani plin alternativa je tehnologiji komprimiranog plina, koja koristi i temperaturu i tlak za povećanje volumetrijske gustoće energije u sustavu za pohranu. Štoviše, s velikim razvojem tehnologije, plinoviti vodik također se skladišti pod zemljom u dubokim geološkim formacijama, uključujući rudnike soli, špilje čvrstih stijena, pa čak i iscrpljena naftna i plinska polja. Prednost ove tehnologije što omogućava izvora vodika unatoč vremenskim i klimatskim promjenama, što je ključno za skladištenje velikih količina goriva vodika. Predviđena potražnja za vodikom u budućnosti će premašiti kapacitet skladištenja trenutno instalirane površinske infrastrukture, kao što su cjevovodi ili spremnici. Vodik se može proizvoditi izvan vremena najveće potražnje i sigurno skladištiti pod zemljom dok ne bude potreban, osiguravajući dugoročnu energetska sigurnost i stabilnost opskrbe.



Slika 10. Prikaz proizvodnje, skladištenja i upotrebe vodika

3.1. Spremišta tekućeg vodika

Plinoviti vodik može se ukapljivati na ekstremno niskim temperaturama ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri 1 baru) tako da se može skladištiti u posebnim spremnicima za potrebe transporta na velike udaljenosti, primjerice s jednog kontinenta na drugi. Ukapljivanje plinovitog vodika zahtijeva veliku količinu energije za ukapljivanje na temperaturama ispod $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ i prethodno hlađenje u procesu ukapljivanja. Stoga su i spremnici tekućeg vodika posebno dizajnirani sa složenim sustavima za skladištenje i transport tekućeg vodika.



Slika 11. Konvencionalni spremnik tekućeg vodika, prikaz svih njegovih dijelovima, uključujući vakuumsku super izolaciju

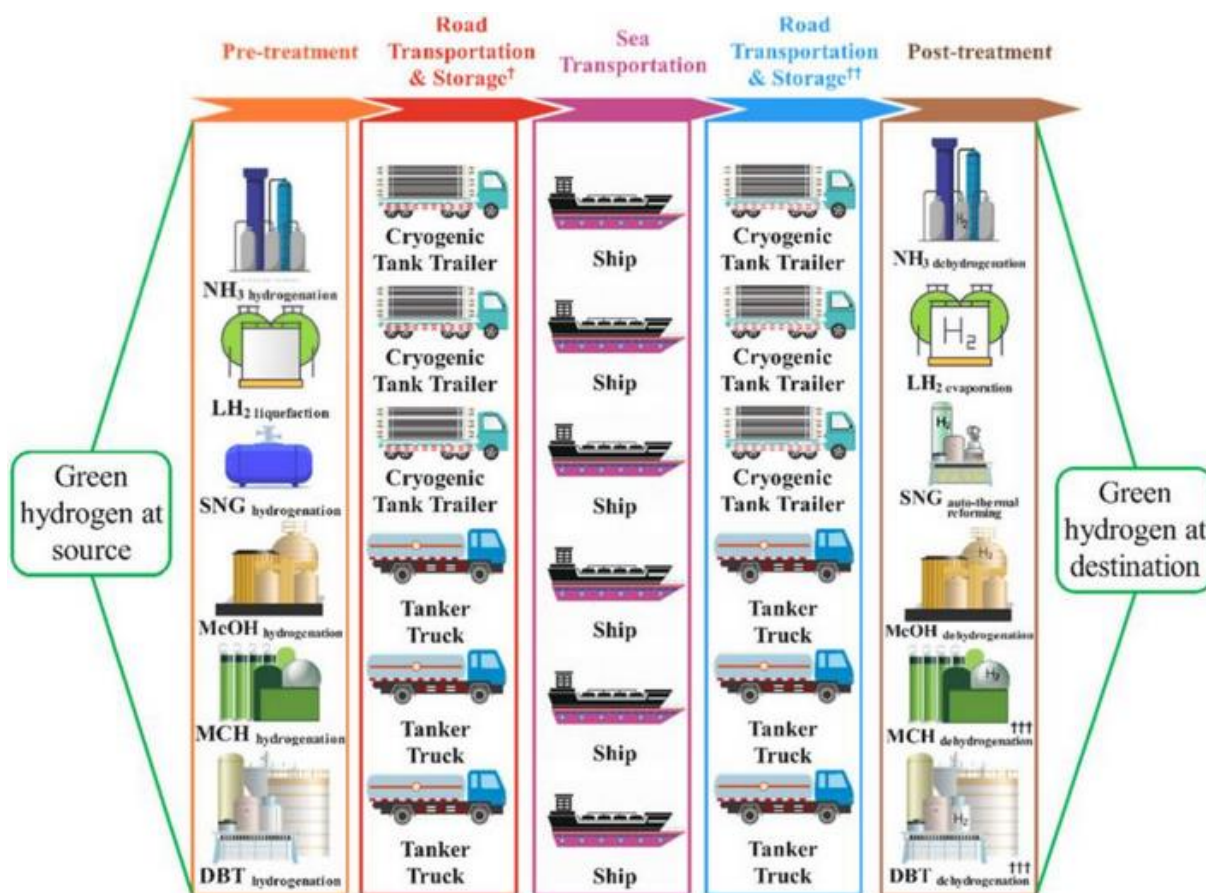
Skladište tekućeg vodika također se suočava s velikim problemom isparavanja tekućine zbog porasta temperature u spremniku zbog više vanjske temperature. Ovaj fenomen isparavanja tretira se kao izgubljeni vodik po danu, također poznat kao boil rate. Kako bi se smanjio toplinski utjecaj vanjskog okruženja, fiksna skladišta tekućeg vodika koriste sferne spremnike s vrlo velikim volumenima, na tisuće kubičnih metara. Pri prijevozu tekućeg vodika cestom, vodoravni cjevasti spremnici koriste se za uravnoteženje tekućine iznutra, dok će sferni spremnici imati prioritet za prijevoz na vodi na ogromnim brodovima. Spremnici za skladištenje vodika imaju dvije stjenke, a između njih je izolacija. Zbog značajne temperaturne razlike između vanjske temperature okoline i tekućeg vodika, unutarnja posuda je izolirana

višeslojnom izolacijom, koja se naziva i vakuumaska super izolacija. Ova izolacija je izrađena od naizmjeničnih slojeva metalne folije i materijala za podstavu. Zbog energije potrebne za ukapljivanje, tekući vodik ima visoke operativne troškove, ali ovisno o volumenu vodika i udaljenosti isporuke, također ima niže kapitalne troškove.

4. Transport vodika

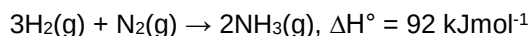
Tri su primarne metode transporta vodika: brodski prijevoz, cjevovodi i cestovni prijevoz. U slučaju potrebe male količine vodika idealan je komprimirani vodik u spremnicima pod tlakom koji se prevoze kamionima, posebno na kratkim udaljenostima. Međutim, niska gustoća volumena plinovitog vodika čini transport velikih razmjera izazovnim. Kako bi se to prevladalo, vodik se često pretvara u tekući oblik veće gustoće za transport na velike udaljenosti.

Tekući vodik, tekući organski nosači vodika i amonijak uobičajene su metode za izvoz, ali zahtijevaju energetske intenzivne procese poput hlađenja, tlaka i kemijske pretvorbe. Prijevoz vodika u velikim količinama na velike udaljenosti obično se obavlja morem. Tekući vodik predstavlja izazove zbog isparavanja i kontrole temperature, što dovodi do upotrebe amonijaka i nosača tekućeg vodika kao alternativa kojima se lakše upravlja.



Slika 12. Prikaz dostavnih puteva od mjesta proizvodnje do mjesta upotrebe vodika

Amonijak je omiljen zbog svoje visoke gustoće vodika, utvrđenih proizvodnih metoda i lake katalitičke razgradnje, s Haber-Bosch metodom koja se obično koristi za industrijsku proizvodnju (nema emisija CO₂):



Amonijak (NH₃) nudi značajne prednosti kao nosač vodika, budući da ima veću gustoću energije u usporedbi s ukapljenim i komprimiranim vodikom pri znatno nižem tlaku. Međutim, predstavlja izazove zbog svoje toksičnosti i zaostalog amonijaka nakon raspada vodika. Zemlje rade na razvoju zelene

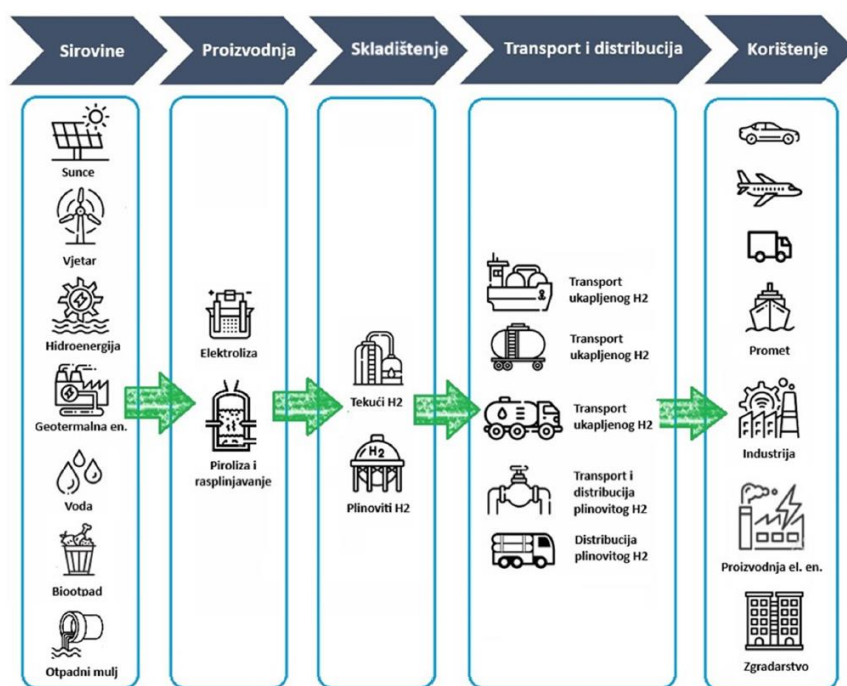
sinteze amonijaka koristeći obnovljive izvore energije poput sunca, vjetra i hidroelektrane. Ovaj zeleni amonijak može se koristiti za proizvodnju vodika na benzinskim postajama i igrat će ključnu ulogu u izgradnji održivog gospodarstva vodika.

Druga alternativna metoda za transport vodika uključuje tekuće-organske nosače vodika, koji koriste nezasićene organske tekućine poput toluena ili metilcikloheksana. Ovi nosači mogu apsorbirati i otpuštati vodik kroz kemijske reakcije te su održiviji, sigurniji i lakši za rukovanje od drugih sustava. Tekuće-organski nosači mogu se globalno koristiti i za fiksne i za mobilne aplikacije.

Očekuje se da će se vodikovo gorivo sve više koristiti u raznim industrijama, uključujući transport i tešku industriju, potaknuto sve većim zahtjevima za energijom. Kako se logistika vodika bude širila, metode transporta nastaviti će se poboljšavati, a napredak u skladištenju i transportu vodika, u plinovitom i tekućem obliku, vjerojatno će značajno napredovati u nadolazećim desetljećima.

5. Vodik u RH

Sukladno Strategiji Europske unije za vodik i politikama EU, Hrvatska je 2022. godine donijela Nacionalnu strategiju za vodik do 2050. godine, kojom je postavljen okvir za proizvodnju i uporabu vodika na nacionalnoj razini. Iako su trenutačno najrasprostranjenije i najisplativije metode proizvodnje vodika iz fosilnih goriva, Hrvatska se usmjerava na obnovljive izvore za proizvodnju vodika kao alternativu fosilnim gorivima.



Slika 13. Prikaz vrijednosnog lanca vodika

Iskorištavanjem svog jedinstvenog zemljopisnog položaja i postojeće infrastrukture, Republika Hrvatska ima ambiciju uspostaviti snažnu vodikovu ekonomiju koja će značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova, poboljšati energetske sigurnost i potaknuti gospodarski razvoj.

Grad Zagreb	Panonska Hrvatska	Sjeverna Hrvatska	Jadranska Hrvatska
Proizvodnja Uz elektrolizatore, usredotočiti se više na proizvodnju iz otpada, uključujući otpadni mulj.	Proizvodnja Povećati proizvodnje obnovljivog vodika pomoću sunčanih elektrana.	Proizvodnja Iskoristiti male hidroelektrane i sunčane elektrane za lokalnu proizvodnju vodika.	Proizvodnja Povećati proizvodnju obnovljivog vodika pomoću sunčane i energije vjetra, kako na kopnu tako i na moru.
Distribucija i skladištenje Prilagoditi postojeću plinsku distribucijsku mrežu ili njezine dijelove za vodik.	Distribucija i skladištenje Nadograditi postojeću plinsku infrastrukturu, sustav prijenosa, distribucije i skladištenja plina za vodik.	Distribucija i skladištenje Istražiti prenamjenu iscrpljenih naftnih i plinskih ležišta za skladištenje vodika.	Razviti infrastrukturu za uvoz vodika putem pomorskih ruta. Fokusirati se više na proizvodnju vodika iz otpada.
Korištenje Promicati korištenje vodika u javnom prijevozu, sustavu distribucije toplinske energije i plinskim mrežama. Izgradnja punionica vodika.	Istražiti mogućnost skladištenja vodika u slanim akviferima i iscrpljenim naftnim i plinskim ležištima. Korištenje Promicati korištenje vodika u javnom prijevozu, sustavu distribucije toplinske energije, plinskim mrežama i industriji. Izgradnja punionica vodika.	Korištenje Promicati korištenje vodika u javnom prijevozu, plinskim mrežama i industriji. Izgradnja punionica vodika.	Distribucija i skladištenje Istražiti mogućnost skladištenja vodika u slanom akviferu. Korištenje Promicati korištenje vodika u javnom prijevozu, i cestovnom i pomorskom. Izgradnja punionica vodika na cestama i u pomorskim lukama.

Slika 14. Regionalni ciljevi i strategije za uspostavu vodikove ekonomije u Hrvatskoj

Zemljopisni položaj Republike Hrvatske na raskrižju srednje, istočne i jugoistočne Europe pruža stratešku prednost za proizvodnju, transport i distribuciju vodika. Razvedena obala i pristup velikih brodova lukama, osobito u Riječkom zaljevu, čine je važnim čvorištem za uvoz i izvoz vodika. Također, povezivanje Republike Hrvatske s europskom mrežom prirodnog plina olakšava integraciju vodikove infrastrukture, čime se povećava energetska sigurnost i pridonosi diverzifikaciji izvora energije.

Razvoj infrastrukture još je jedan izazovan cilj, koji uključuje prilagodbu i proširenje postojeće infrastrukture prirodnog plina za skladištenje i distribuciju vodika kako bi se osigurao nesmetan prijelaz na vodik. Osim toga, razvit će se sveobuhvatna mreža punionica vodika na glavnim prometnim koridorima i urbanim područjima, kao što su Zagreb, Rijeka i Split. Ova će infrastruktura podržati razvoj javnog prijevoza na vodikov pogon (autobusi i vlakovi) i privatnih vozila, posebice vozila srednje i velike nosivosti. Potencijal za korištenje vodika u hrvatskom pomorskom sektoru, uključujući trajekte, male brodove i čamce, jedinstvena je prilika za dekarbonizaciju sektora komercijalnog brodarstva i unapređenje zelenog turizma. Vodik u zrakoplovstvu ima dugoročniju perspektivu, te se smatra kao najbolja opcija za smanjenje ugljičnog otiska zračnog prometa.

5.1. Vodik u prijevozu u RH

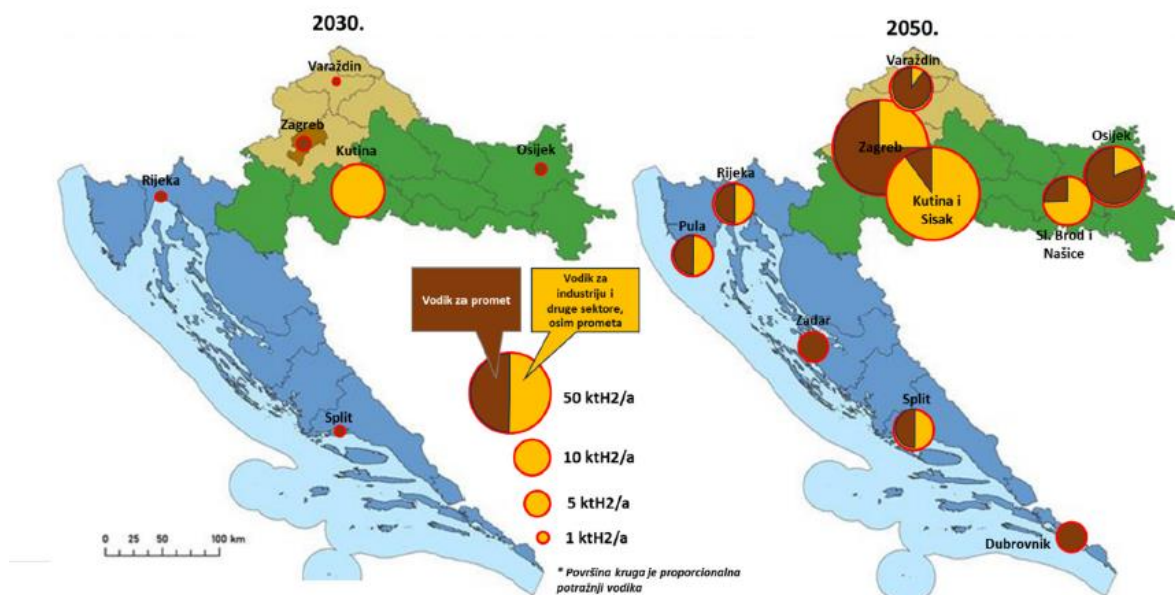
Vodik ima prednosti u odnosu na baterije za primjenu u prijevozu na veće udaljenosti gdje su ključni visoka gustoća energije i brzo punjenje. Osobito je koristan za kamionski prijevoz na duge relacije, pomorski prijevoz, zrakoplovstvo i velika industrijska vozila, gdje bi težina i veličina baterija potrebnih za pružanje sličnih performansi bila nepraktična. Vodik se također razmatra za autobuse i vlakove javnog prijevoza u regijama kojima nedostaje opsežna elektrifikacijska infrastruktura, nudeći čišću alternativu dizelskom gorivu uz osiguranje operativne učinkovitosti i fleksibilnosti. Očekuje se da će do 2050. godine vozila s pogonom na vodik činiti značajan dio nacionalnog voznog parka u Republici Hrvatskoj, a projekcije pokazuju da će do 40% autobusa i 10% kamiona biti pogonjeno vodikom.

Promet		Tehnologije dekarbonizacije	
	Cestovni	Automobili	Električna vozila na baterije (BEV)
		Dostavna vozila, kombiji	Električna vozila s višećim vodovima
		Kamionske prikolice	Motor s unutarnjim izgaranjem na biogoriva
		Gradski autobusi	Motor s unutarnjim izgaranjem na vodik (ICEH2)
	Željeznički	Gradjevinska vozila	Električno vozilo s vodikovim gorivnim člancima (FCEV)
		Specijalizirana vozila/Kamioni za odvoz smeća	Mlazni motor (vodik)
			Električno vozilo s gorivnim člancima s metanolom
			Motor s unutarnjim izgaranjem (e-goriva)
	Pomorski/riječni	Trajekti	Motor s unutarnjim izgaranjem (amonijak)
		Putnički brodovi/mali kruzeri	Gorivni članci s amonijakom
		Teretni brodovi	Mlazni motor (e-goriva)
		Tegljači	
	Zračni	Rekreacijska plovila/jahte	
		Zrakoplovi	

Slika 15. Tehnologije dekarbonizacije za sektor prometa (plavom bojom su označene tehnologije temeljene na vodik)

Pilot projekti igraju značajnu ulogu u demonstriranju izvedivosti i prednosti vodika. Važne su inicijative primjene autobusa na vodikove gorive ćelije u hrvatskim gradovima, upotunjene potrebom infrastrukturom za punjenje vodikom kao samoodrživi (pilot) projekti.

5.2. Proizvodnja vodika u RH



Slika 16. Očekivana proizvodnja vodika u Republici Hrvatskoj 2030. i 2050. godine

U Republici Hrvatskoj se vodik trenutno proizvodi i koristi pretežno u Rafineriji nafte Rijeka te za proizvodnju amonijaka u Petrokemiji Kutina. U Rafineriji nafte Rijeka, vodik se proizvodi parnim reformiranjem (SMR) prirodnog plina s godišnjim kapacitetom od 61.200 tona. Vodik se koristi u postupcima hidro obrade kao što su hidrodesulfurizacija i hidrokreiranje, koji su potrebni za ispunjavanje propisa o kvaliteti tekućih naftnih goriva. Modernizacijom rafinerije povećat će se kapacitet prerade sirove nafte do 4,3 milijuna tona sirove nafte godišnje što značajno povećava potražnju za vodikom.

Petrokemija Kutina, jedini je proizvođač mineralnih gnojiva u Republici Hrvatskoj, i također se koristi parno reformiranje u proizvodnji vodika. Vodik je nužan u sintezi amonijaka, koji se koristi za proizvodnju mineralnih gnojiva. Godišnji kapacitet proizvodnje vodika u Petrokemiji Kutina iznosi 80.000 tona, dok je godišnja proizvodnja amonijaka u postrojenju u 2021. godini iznosila 450.000 tona za što je bilo potrebno oko 51.000 tona vodika

Industrija	Maksimalni proizvodni kapacitet [kt/godina]	Potrošnja u 2021. [kt/godina]	Tehnologija
Rafinerija nafte Rijeka	61,2	20	SMR
Petrokemija Kutina	80	51	SMR
Ostale industrije	-	0,02	N/P
Ukupno	141,2	71,02	

Slika 17. Stvarna proizvodnja i potrošnja vodika u Republici Hrvatskoj u 2021. godini

Planirani scenarij za proizvodnju obnovljivog vodika glasi: Ukupna količina obnovljivog vodika, proizvedena i potrošena u Republici Hrvatskoj, za promet, industriju, stambeni i komercijalni sektor kao i za proizvodnju električne i toplinske energije miješanjem s prirodnim plinom iznosi 26,4 kt u 2030. godini, 97,1 kt u 2040. godini i 243,2 kt u 2050. godini. Implementacijom vodika smanjit će se nacionalna emisija CO₂-eq za 0,9% u 2030., 3,6% u 2040. i 9,8% u 2050. godini u usporedbi s emisijom u 2021. godini.

Republika Hrvatska ima veliki potencijal u solarnoj energiji i energiji vjetra za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora. Sirovina za elektrolizu je voda, što nije izazov za Republiku Hrvatsku koja je relativno bogata vodnim resursima.

5.3. Zaključak

Fokus korištenja vodika bit će na strateškoj implementaciji vodika u prometnom sektoru i u ključnim industrijama, kao i u sektorima proizvodnje električne energije i grijanja u srednjoročnoj i dugoročnoj perspektivi kako bi se osigurala održiva i otporna energetska budućnost.

Vodik će igrati važnu ulogu u proizvodnji električne energije i sektoru grijanja u budućnosti kako bi se ostvarilo smanjenje emisija stakleničkih plinova, povećanje energetske sigurnosti i integraciju obnovljivih izvora energije. Trenutno se aktivno istražuje upotreba vodika u proizvodnji električne energije, skladištenju energije i sustavima grijanja. Vodik tako može nadopuniti druge obnovljive izvore za potrebe grijanja, uključujući značajne geotermalne potencijale u Panonskom bazenu.

U Republici Hrvatskoj se trenutno provode ukupno 32 projekta vezana za vodik. Projekti se nalaze u različitim fazama zrelosti. Od velike je važnosti za budućnost je idući korak u kombiniranju samostalnih tehnoloških projekata s većim pilot projektima, koji se mogu dalje razvijati u samoodržive vodikove sustave kao što su vodikova čvorišta ili vodikove doline. Stoga se financijska sredstva moraju koristiti učinkovito kako bi se osigurao stalan rast vodikovog gospodarstva.

Zaključno, Republika Hrvatska ima dobre preduvjete za uspostavu proizvodnje i korištenja obnovljivog vodika. Provedba plana razvoja korištenja vodika, omogućila bi Republici Hrvatskoj ostvarenje klimatskih ciljeva uz jačanje nacionalnog energetskog sustava.

6. Zaključak

Gorivo iz vodika, proizvedeno iz obnovljivih izvora energije, još uvijek se razvija, ali ima značajan potencijal. Mnoge su zemlje pokrenule strategije za zeleni vodik, potpomognute velikim ulaganjima. Kako se troškovi solarne energije smanjuju, a tehnologija elektrolize napreduje, stvaraju se uvjeti za proizvodnju velikih razmjera. Pad cijena obnovljivih izvora energije, posebice energije vjetra i sunca, podupire rast industrije zelenog vodika. Kako se pritisci klimatskih promjena povećavaju, napor za postupnim ukidanjem fosilnih goriva ubrzali su strategije zelenog vodika. Vlade, energetske tvrtke i

proizvođači automobila podupiru čista goriva, pri čemu vodik igra ključnu ulogu u smanjenju emisije stakleničkih plinova.

S obzirom na važnost vodika za gospodarstvo s nultim neto emisijama, globalne strategije moraju se temeljiti na temeljitom istraživanju, pružajući smjernice za buduće politike. Jedno rješenje za veliki transport vodika je tekući vodik, ali ostaju izazovi u smanjenju troškova dostave, očuvanju vodika tijekom transporta i održavanju učinkovitosti isparavanja. Razvoj infrastrukture kompatibilne s vodikovim gorivom također je kritičan, iako će pretvorba postojeće infrastrukture fosilnih goriva potrajati i predstavljati značajne izazove. Zaključno, vodik je podvrgnut opsežnim istraživanjima kako bi se stvorio ekološki prihvatljiv izvor energije visoke tehnologije i očekuje se da će postati glavni izvor energije u budućnosti.

Republika Hrvatska je 2022. godine usvojila Strategiju za vodik do 2050. godine, usmjerenu na proizvodnju i korištenje obnovljivog vodika. Strategija koristi prednosti Hrvatske, poput geografskog položaja, potencijala za proizvodnju obnovljive energije i pristupa lukama, te ima za cilj smanjenje emisije CO₂ i razvoj vodikove ekonomije. Plan uključuje primjenu vodika u prometu, industriji, energetici i grijanju. U Hrvatskoj je već u tijeku 32 projekta vezana uz vodik, a važno je proširiti koordinaciju kroz Agenciju za ugljikovodike. Plan provedbe omogućit će ostvarenje klimatskih ciljeva i jačanje energetskog sustava.

7. Literatura

- [1] Phuoc-Anh Le, Vuong Dinh Trung, Phi Long Nguyen , Thi Viet Bac Phung, Jun Natsuki, Toshiaki Natsuki: The current status of hydrogen energy: an overview
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10519154/#cit3>
- [2] Owusu P. A. Sarkodie S. A. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation.
- [3] The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [4] Hydrogen production methods and its colours
<https://cicenergigune.com/en/blog/hydrogen-production-methods-colours>
- [5] https://www.youtube.com/results?search_query=steam+reforming+hydrogen
- [6] <https://www.youtube.com/watch?v=xAjHJ49VOUM>
- [7] Alessandra Di Nardo, Maria Portarapillo, Danilo Russo, Almerinda Di Benedetto, Hydrogen production via steam reforming of different fuels: thermodynamic comparison
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031992305961X>
- [8] Mostafa El-Shafie, Shinji Kambara, Yukio Hayakawa; Hydrogen Production Technologies Overview
<https://www.scrip.org/journal/paperinformation?paperid=90227>
- [9] Studija plana razvoja i primjene Hrvatske strategije za vodik do 2050. godine
https://www.azu.hr/media/bzinzir0/hr-h2-studija-plana-razvoja-sazetak-31_07_24_v2.pdf