

Transport vodika cjevovodima

Škarjak, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:166990>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Prije diplomski studij naftnog rudarstva

TRANSPORT VODIKA CJEVOVODIMA

Završni rad

Ana Škarjak

N4548

Zagreb, 2024.

TRANSPORT VODIKA CJEVOVODIMA

Ana Škarjak

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

Sažetak

Vodik se može transportirati cestovnim kamion-cisternama pod tlakom ili u kriogenim spremnicima. Takav način transporta prihvatljiv je za slučaj manjih količina, dok je veće količine vodika isplativije transportirati cjevovodima. U svijetu danas postoji nekoliko većih i važnijih cjevovoda za transport vodika, ali oni su u pravilu namijenjeni opskrbi velikih potrošača kao što su kemijska postrojenja i rafinerije, dok je za njegovu širu primjenu potrebno značajno unaprijediti postojeću infrastrukturu i cjevovode kojima se transportira prirodni plin. Rizici koji se pritom javljaju su lako istjecanje vodika iz transportnog sustava zbog male gustoće i krtošć čelika koju uzrokuje zbog prodora u rešetku metala. Određena usuglašavanja zakonske regulative o transportu vodika na razini EU već postoje i za očekivati je da će u dogledno vrijeme postojati detaljna pravila koja će omogućiti pojavu sve većeg broja projekata koji će uključivati korištenje i transport vodika.

Ključne riječi: vodik, transport, cjevovod, spremnik

Završni rad sadrži: 26 stranica, 1 tablicu, 8 slika i 24 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentori: Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNf-a

Pomagao pri izradi/komentor: Dr. sc. Katarina Žbulj

Ocjenjivači: Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNf-a
Dr. sc. Karolina Novak Mavar, izv. prof. RGNf-a
Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNf-a

SADRŽAJ

| | |
|---|------------|
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA | III |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA | IV |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PROIZVODNJA VODIKA | 3 |
| 3. NAČINI TRANSPORTA VODIKA | 5 |
| 3.1. Cestovni transport | 5 |
| 3.1.1. Spremnici stlačenog plina | 5 |
| 3.1.2. Kriogeni spremnici | 6 |
| 3.2. Transport cjevovodima | 6 |
| 4. DIJELOVI TRANSPORTNOG SUSTAVA | 8 |
| 4.1. Cjevovod | 8 |
| 4.2. Kompresorska stanica | 9 |
| 4.3. Mjerna stanica | 11 |
| 4.4. Stanica za izjednačavanje tlaka | 12 |
| 4.5. Ventili | 12 |
| 4.6. Stanice za čišćenje cjevovoda | 13 |
| 4.7. SCADA sustav | 13 |
| 4.8. Prilazne ceste | 14 |
| 5. OŠTEĆENJA I PROPUŠTANJE CJEVOVODA | 15 |
| 6. SKLADIŠTENJE VODIKA | 17 |
| 7. PRIMJER TRANSPORTA VODIKA CJEVOVODIMA | 20 |
| 7.1. Njemačka | 21 |
| 8. ZAKLJUČAK | 24 |
| 9. POPIS LITERATURE | 25 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2-1. Dobivanje vodika parnim reformingom..... | 3 |
| Slika 3-1. Kamionska poluprikolica sa spremnikom stlačenog plina | 5 |
| Slika 3-2. Kamion s kriogenim spremnikom | 6 |
| Slika 4-1. Shema kompresorske stanice | 10 |
| Slika 4-2. Shema mjerne stanice | 12 |
| Slika 5-1. Shema istjecanja vodika kroz spojeve cijevi | 15 |
| Slika 6-1. Tipovi spremnika za pohranu vodika | 18 |
| Slika 7-1. Trase potencijalne europske mreže cjevovoda za transport vodika | 21 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 7-1. Duljine cjevovoda za prijenos vodika u svijetu | 20 |
|---|----|

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------|------------------------|-------------|
| T | $^{\circ}\text{C}$ | temperatura |
| ρ | kg/m^3 | gustoća |
| V | Nm^3 | volumen |
| m | kg | masa |
| E | MJ, kWh | energija |
| p | MPa | tlak |
| P | kW | snaga |

1. UVOD

Fosilna goriva su dugi niz godina bila primarni izvor energije zbog svoje visoke gustoće energije, lakoće skladištenja i relativne pristupačnosti. Gustoćom energije smatra se količina energije koja se može pohraniti ili prenijeti u određenoj količini materijala ili prostora, odnosno to je mjera koliko energije je sadržano u jedinici volumena ili mase tvari. Međutim, kako njihova eksploatacija ima uglavnom negativne utjecaje na okoliš, kao što su, emisije stakleničkih plinova te onečišćenje zraka i vode nastoji se smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima pa se sve više istražuju i razvijaju alternativni izvori energije poput obnovljivih izvora energije, kao i tehnologije za smanjenje emisija ugljika. S tim ciljevima pojavio se pojam energetske tranzicije koja za cilj ima da se do 2030. godine povećanje temperature zadrži na 1,5 °C što se može postići smanjivanjem emisija stakleničkih plinova i potrošnje energije (Hrvatska energetska tranzicija, 2023). Energetska tranzicija i postavljeni klimatski ciljevi nameću potrebu za unaprjeđenjem tehnologija za dekarbonizaciju koja zahtijeva niske emisije ugljika kao i veću elektrifikaciju. Da bi se postigli ciljevi Pariškog sporazuma iz 2015. godine, DNV predviđa da će vodik do 2050. godine morati zadovoljiti oko 15% svjetske potražnje za energijom (Monsma i dr., 2023). To će zahtijevati značajno proširenje infrastrukture, pri čemu će se mnogo toga prenamijeniti iz infrastrukture za prirodni plin. U slučaju da se ne ostvare ciljevi definirani energetske tranzicijom, procijenjeno je da bi se emisije ugljikovog dioksida povećale za oko dvije trećine do 2040., odnosno na približno 60 milijardi tona CO₂ godišnje. Međutim, za postizanje povećanja temperature od svega 1,5 °C, potrebno je trenutne emisije od 36 milijardi tona CO₂ godišnje prepoloviti do 2040. godine, a zatim i dalje smanjiti. Udio fosilnih goriva u proizvodnji energije mogao bi se do 2040. smanjiti na 60%, za razliku od današnjih 85% (Copenhagen Economics, 2017).

S ciljem većeg korištenja vodika u industriji najrazvijenije zemlje svijeta odobravaju velika ulaganja i subvencije razvoj tehnologija proizvodnje, prijenosa i skladištenja vodika. Unatoč tome, korištenje vodika ima i negativne strane. Budući da se radi o vrlo maloj molekuli, njezino istjecanje u atmosferu izaziva nove probleme kao što su stvaranje eksplozivnih spojeva zbog vodikove reaktivnosti te oštećenje ozonskog omotača. Zato je važno da se ovaj alternativni put dekarbonizacije pažljivo istraži prije nego što se njime krenu rješavati klimatski problemi (Hamburg i Ocko, 2022).

Vodik je najlakši element u prirodi, nije toksičan ni korozivan. Pri standardnim uvjetima (tlak od 1,01325 bar i temperatura od 0°C) to je dvoatomni plin čija gustoća iznosi 0,08988 kg/m³. Teško ga je otkriti jer je bez boje, mirisa i okusa. Velike je brzine gorenja, što znači

da ima i veliki eksplozivni potencijal te je njegovo gorenje teško kontrolirati. Gorenje vodika oslobađa velike količine energije u obliku svjetlosti i topline, a jedini produkt njegova gorenja je voda, dok gorenje ugljikovodika može rezultirati nastankom i emisijom nepotpuno sagorjelih produkata kao što su ugljični monoksid ili čađa, što ih čini većim zagađivačima od vodika.

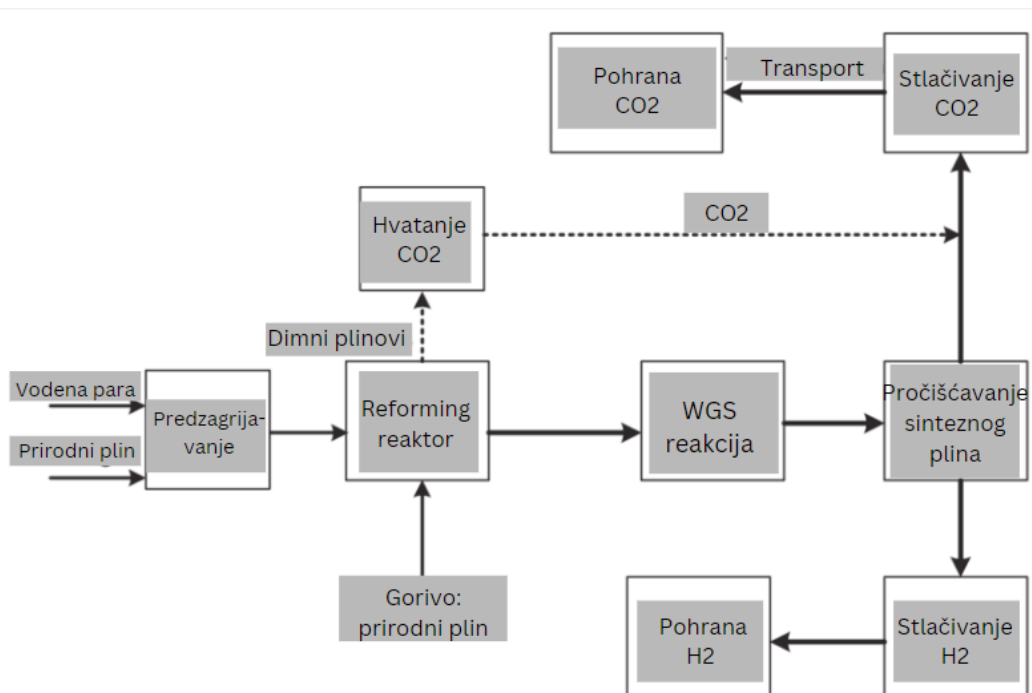
Vodik nalazi primjenu u industrijskom sektoru prvenstveno u rafinerijskim i petrokemijskim postrojenjima dok se prometni sektor priprema za početak primjene. Može se koristiti za skladištenje električne energije jer ima visoku energetska gustoću i lako se prenosi. Također se njime koristeći gorivne članke proizvodi čista električna energija jer se kao nusprodukt javljaju samo voda i toplina. U podsektoru grijanja i hlađenja može se koristiti kao alternativa fosilnim gorivima, čemu će uvelike pridonijeti miješanje s prirodnim plinom u transportnoj i distribucijskoj mreži. Vodik se može transportirati cestovno ili cjevovodima. Pri cestovnom transportu prevozi se u spremnicima stlačenog plina ili u kriogenim spremnicima u kojima se nalazi u tekućem stanju. Cjevovodi za transport vodika razlikuju se od cjevovoda za transport prirodnog plina, budući da se i svojstva tih dvaju plinova uvelike razlikuju (Copenhagen Economics, 2017).

2. PROIZVODNJA VODIKA

Vodik je ključni element u tranziciji prema čistim i održivijim energetske sustavima, a njegova proizvodnja igra ključnu ulogu u ostvarenju ovog cilja. Postoji nekoliko metoda proizvodnje vodika, od kojih svaka ima svoje prednosti i nedostatke. U nastavku će biti prikazani različiti načini proizvodnje vodika te navedene neke njihove prednosti i nedostaci.

1. Parni reforming prirodnog plina (engl. *Steam Methane Reforming - SMR*)

Parni reforming prirodnog plina (Slika 2-1.) trenutno je najčešći način proizvodnje vodika u industriji. Ovaj postupak podrazumijeva reakciju prirodnog plina ili čistog metana s vodenom parom pod visokim tlakom i temperaturom uz prisustvo katalizatora, što rezultira proizvodnjom vodika i ugljikovog dioksida. Prednosti ovog procesa uključuju visoku energetske učinkovitost i veću komercijalnu dostupnost. Međutim, jedan od glavnih nedostataka je emisija ugljičnog dioksida kao nusprodukta, što negativno utječe na klimatske promjene. Uz to, ovaj je postupak ovisan o dostupnosti prirodnog plina koji je fosilno gorivo (Ustolin i dr., 2020).



Slika 2-1. Dobivanje vodika parnim reformingom (Olufemi Oni i Anaya, 2022)

2. Elektroliza vode

Elektroliza vode je proces u kojem se voda razdvaja na vodik i kisik pomoću električne energije. Ova metoda omogućava čistu i održivu proizvodnju vodika, posebno kada se koristi električna energija iz obnovljivih izvora kao što su Sunce ili vjetar. Elektroliza vode

omogućava decentraliziranu proizvodnju vodika, točnije njome je moguće proizvoditi vodik na manjim lokalnim postrojenjima ili na individualnoj razini gdje će se onda i koristiti. Takav način pogodniji je nego proizvodnja u velikim centraliziranim postrojenjima za koju je onda potreban i odgovarajući način transporta. Decentraliziranom proizvodnjom smanjuju se gubici energije i troškovi koji se javljaju tijekom transporta na velike udaljenosti. Međutim, visoki troškovi električne energije, pogotovo ako se ne koristi obnovljiva energija, i potreba za učinkovitim elektrokatalizatorima predstavljaju izazove ove metode (Ustolin i dr., 2020).

3. Termodinamički procesi

Termodinamički procesi koriste toplinu i kemijske reakcije za proizvodnju vodika. Ovi procesi mogu uključivati različite tehnologije poput plazmatske razgradnje (ionizirani plin visoke temperature reagira s organskim materijalom u kojem se nalazi te ga razgrađuje na elementarne sastavnice, uključujući vodik), parni reforming biomase (pri vrlo visokim temperaturama uz prisustvo vodene pare razgrađuje se organski materijal poput drva, otpada od usjeva ili stajskog gnoja na vodik i ugljikov monoksid) ili termolize vode (proces u kojem se voda razlaže na vodik i kisik pod utjecajem visokih temperatura). Prednosti ove metode uključuju raznovrsne izvore topline koji se mogu koristiti, uključujući obnovljive izvore poput sunčeve energije. Kod ovog procesa kao i kod elektrolize vode, postoji potencijal za decentraliziranu proizvodnju vodika. Međutim, visoki troškovi i složenost tehnologije te ovisnost o dostupnosti i stabilnosti izvora topline predstavljaju izazove ovog pristupa (Ustolin i dr., 2020).

4. Fotokemijska proizvodnja vodika

Fotokemijska proizvodnja vodika koristi svjetlosnu energiju, obično sunčevu svjetlost, kako bi potaknula kemijske reakcije koje razgrađuju vodu na vodik i kisik. Ova tehnologija koristi se za čistu i održivu proizvodnju vodika. Međutim, izazovi u dizajnu učinkovitih fotokatalitičkih materijala te ovisnost o vremenskim uvjetima i dostupnosti sunčeve svjetlosti predstavljaju ograničenja ovog pristupa (Ustolin i dr., 2020).

5. Biološka proizvodnja vodika

Biološka proizvodnja vodika koristi mikroorganizme poput algi i bakterija za proizvodnju vodika putem bioloških procesa. Ova metoda ima potencijal za održivu proizvodnju vodika, ali se suočava s izazovima u energetskej učinkovitosti i potrebi za dodatnim istraživanjem i razvojem tehnologije (Ustolin i dr., 2020).

3. NAČINI TRANSPORTA VODIKA

Transport vodika može se odvijati na dva načina: cjevovodima i kamionima sa spremnicima stlačenog plina ili kriogenim spremnicima. Na odabir odgovarajućeg načina transporta utječu geografski, tehnički i tržišni čimbenici, primjerice udaljenost na koju je potrebno transportirati vodik te količina transportiranog vodika.

3.1. Cestovni transport

3.1.1. Spremnici stlačenog plina

Spremnici stlačenog plina (Slika 3-1.) su vodoravni spremnici cilindričnog oblika koji se prevoze na kamionima s poluprikolicom. Trenutno važeća zakonska regulativa i standardi propisuju maksimalni tlak od 160 bar (oko 2400 psi) kojim spremnik smije djelovati na poluprikolicu, iako postoje i poluprikolice koje mogu podnijeti tlak od 400 bar (oko 6000 psi). Količina vodika koja se na ovaj način odjednom može transportirati iznosi oko 300 kg, ali bi se s povećanjem dozvoljenog tlaka na poluprikolice povećala i količina plina. Da bi se postigli željeni tlakovi, koristi se kompresor koji se nalazi u središnjem postrojenju za proizvodnju vodika. Glavni faktori koji određuju ukupne troškove dostave vodika su troškovi održavanja kamiona i poluprikolica, udaljenost vožnje, troškovi radne snage (vozača) i troškovi za potrebno gorivo. Prijevoz poluprikolicama rezultira relativno niskim troškovima transporta malih količina vodika pa je zato pogodan za tržišta koja imaju male zahtjeve za isporukom vodika (Ogden i Yang, 2006).



Slika 3-1. Kamionska poluprikolica sa spremnikom stlačenog plina (Center for Domestic Preparedness, 2022)

3.1.2. Kriogeni spremnici

Vodik se može ukapljiti kako bi se povećala njegova gustoća i smanjio volumen te ga je tada moguće prevoziti u kriogenim spremnicima (Slika 3-2.). Na taj način moguća je isporuka umjerene količine vodika na srednje do velike udaljenosti. Iako su energetske zahtjevi i kapitalni troškovi veći u slučaju ukapljivanja, nego kod stlačivanja, kamioni s kriogenim spremnicima mogu prevesti otprilike deset puta veću količinu vodika nego kamioni sa spremnicima stlačenog plina. Time se smanjuje broj kamiona i putovanja potrebnih za opskrbu mreže stanica kao i potreba za gorivom za kamionski prijevoz. Kamioni za prijevoz tekućeg vodika sastoje se od kamionske kabine i velikog spremnika postavljenog na prikolicu. Kamion posjećuje jednu stanicu za vodik te tamo istovari sav teret, umjesto višestrukih zaustavljanja i ispuštanja malih količina na svakoj zasebnoj stanici. Iako su prikolice s cisternama za tekući vodik skuplje od poluprikolica za spremnike stlačenog plina, ukupni trošak kod prijevoza tekućeg vodika po jedinici isporučenog vodika je niži pa je to isplativiji način transporta (Ogden i Yang, 2006).



Slika 3-2. Kamion s kriogenim spremnikom (ESG News, 2022)

3.2. Transport cjevovodima

Korištenje cjevovoda jedini je način kontinuiranog transporta velikih količina vodika. Promjer cjevovoda određuje se jednadžbom za turbulentni protok koja povezuje ulazni i izlazni tlak, duljinu, promjer i maseni protok. Cjevovod obično povezuje objekt u kojem se vodik proizvodi s objektom u kojem se upotrebljava. Iako se vodik smatra fluidom sličnim

prirodnom plinu, na cjevovodu za prijenos vodika potrebno je provesti određene izmjene, primijeniti posebne mjere opreza te ispuniti infrastrukturne i materijalne zahtjeve koji se razlikuju od onih potrebnih za prijenos prirodnog plina. Neke od studija provedenih na cjevovodima ukazuju na to da je neke postojeće cjevovode prirodnog plina moguće prenamijeniti u cjevovode vodika u količini dovoljnoj da se pokrene razvoj industrije vodika. Međutim, potrebno je dodatno ispitivanje kako bi se odredilo trebaju li se radni uvjeti cjevovodnog sustava prilagoditi određenoj vrsti čelika. U slučaju regulacijskih ventila, potrebno je odrediti prikladne membrane i brtve, a u slučaju sigurnosnih zapornih ventila, trebaju li kontrolne i regulatorne funkcije biti prilagođene svojstvima protoka vodika.

Cjevovodi za transport vodika najčešće su manje duljine kako bi se smanjili troškovi potrebni za održavanje. Ukupni kapitalni trošak ne odnosi se samo na cijevi za izgradnju cjevovoda, već i na troškove instalacija potrebne prateće infrastrukture, ostvarivanje prava na polaganje cjevovoda te razne troškove koji ovise o lokaciji. Troškovi instaliranja po jedinici duljine ovise također i o promjeru cjevovoda i to tako da je kod cjevovoda malih promjera ovisnost troškova o promjeru zanemariva, dok kod većih promjera ta ovisnost raste. Uspoređujući troškove različitih načina transporta vodika, zaključeno je da je prijenos cjevovodima najisplativija opcija za gusto naseljena područja s velikom potražnjom vodika (Ogden i Yang, 2006).

4. DIJELOVI TRANSPORTNOG SUSTAVA

4.1. Cjevovod

Projektne zahtjevi cjevovoda za vodik još su u razvoju, iako ih je diljem svijeta postavljeno već nekoliko stotina kilometara. Oni su postavljeni na relativno kratkim relacijama, najčešće tako da spajaju samo najbliže proizvodne pogone i krajnje korisnike pa su to ponekad relacije od samo nekoliko stotina metara. Rade s maksimalnim tlakovima znatno manjim od 68,95 bar, koji bi vjerojatno bili potrebni za prijenos vodika cjevovodom na dulje udaljenosti. Bez obzira na zapise o sigurnosti tih cjevovoda, potrebno je još dorađivati sigurnosne granice tlakova i udaljenosti kao i standarde za transport velikih količina vodika na velike udaljenosti. Trenutno nije moguće u potpunosti odrediti detalje dizajna cjevovoda za prijenos vodika, ali na temelju saznanja o cjevovodima za prirodni plin, moguće je predložiti neke projektne parametre koji bi se mogli primijeniti na cjevovode za prijenos vodika.

Pri određenom tlaku, gustoća energije vodika otprilike je jednaka jednoj trećini gustoće energije prirodnog plina. Međutim, za jednaki promjer cijevi pod istim tlakom, vodik protječe tri puta brže u odnosu na prirodni plin. Prema tome, ukoliko bi kompresori za vodik mogli biti jednake jačine kao kompresori za prirodni plin, moglo bi se očekivati da će se promjer cjevovoda za vodik približiti promjeru cjevovoda za prirodni plin, ali će stvarni promjer biti projektiran ovisno o potrebi za vodikom. Pri prijedlogu prenamjene cjevovoda za prirodni plin u cjevovode za vodik, postavljaju se pitanja vezana uz snagu kompresora te mogu li spojnice, brtve i drugi materijali dizajnirani za prijenos prirodnog plina izdržati difuziju vodika bez propuštanja.

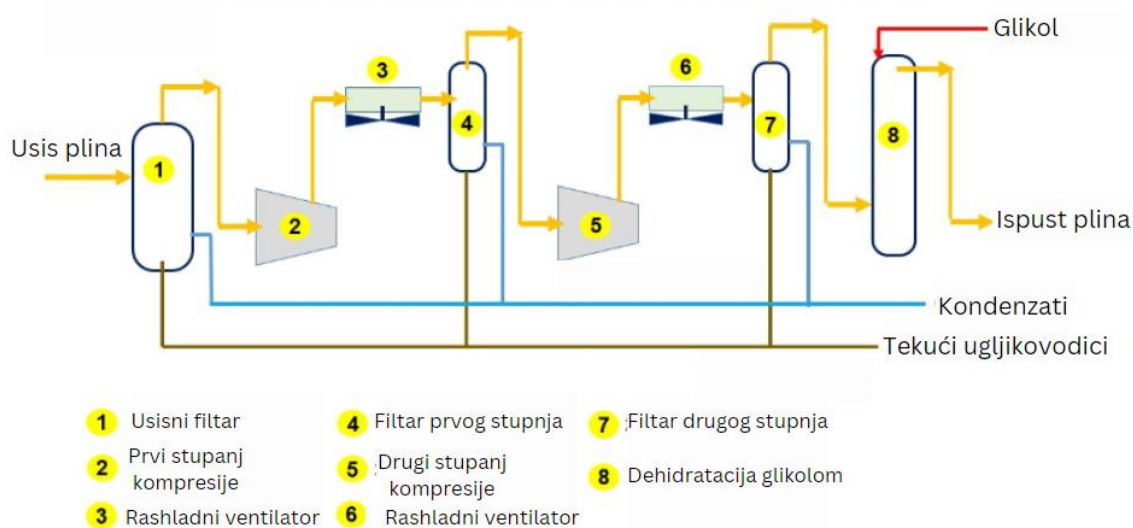
Cjevovodi za vodik najčešće su izrađeni od ugljičnog ili nehrđajućeg čelika. Korišteni su i sivi, duktilni i čelik od lijevanog željeza i nikla, ali njih se ne smatra prikladnima za prijenos vodika pod visokim tlakom. Čelici velike čvrstoće (iznad 689,5 bar) osjetljiviji su na vodikovu krtost pa se za izradu cjevovoda koriste deblji slojevi čelika manje čvrstoće koji se spajaju zavarivanjem. Jedno od pitanja koje treba riješiti prije nego što se mogu ekonomski izgraditi cjevovodi za vodik je moguća vodikova krhkost, koja obično nastaje kod čelika veće čvrstoće. Vodikova krtost predstavlja jednu od najvećih opasnosti za metal pri radu s vodikom, čineći ga lomljivim i skraćujući mu životni vijek. Dodatna pitanja poput gubitka čvrstoće materijala, žilavosti loma, velikih brzina rasta pukotina od zamora, subkritičnog i trajnog pukotinskog pucanja, osjetljivosti na koroziju naprezanjem, te pukotina induciranih vodikom u varovima i spojevima također moraju biti riješena prije široke primjene cjevovoda za transport vodika (Parfomak, 2021).

4.2. Kompresorska stanica

Kompresorska stanica (Slika 4-1.) nužna je komponenta svakog transportnog sustava koji se odvija cjevovodima jer opskrbljuje sustav energijom potrebnom za nastavak protoka plina. Kompresori na stanici nazivne su snage nekoliko tisuća kilovata, a rad većine kompresorskih stanica je u potpunosti automatiziran. Kompresori mogu biti pogonjeni prirodnim plinom ili električnom energijom ukoliko cjevovod za vodik dijeli koridor s cjevovodom za prirodni plin ili s dalekovodom za dovod električne energije, ali se za njihov pogon može koristiti i vodik. Korištena opcija pogona bira se prema dostupnosti izvora energije i ekonomskoj isplativosti svakog od njih. Razmak između kompresorskih stanica određuje se prema operativnim i ekonomskim čimbenicima, ali pretpostavlja se da bi trebao biti jednak ili veći od 64 km do 160 km koliko su uobičajene udaljenosti za cjevovod prirodnog plina (AONG website, 2018).

Glavni dijelovi kompresorske stanice obično uključuju:

- Kompresori: Glavni uređaji za kompresiju plina ili tekućine. Mogu biti centrifugalni, aksijalni ili klipni, ovisno o primjeni i potrebama.
- Motori ili pogonski motori: Uređaji koji pokreću kompresore. To mogu biti električni motori, dizelski motori ili motori s unutarnjim sagorijevanjem, ovisno o primjeni i dostupnosti energije.
- Rashladni sustav: Sustav koji hladi komprimirani plin ili tekućinu kako bi se smanjila temperatura i povećala učinkovitost kompresora.
- Filtri i separatori: Sustavi koji uklanjaju nečistoće, ulje ili vodu iz komprimiranog fluida.
- Kontrolni sustavi: Sustavi za nadzor i upravljanje radom kompresorske stanice, uključujući sustave za upravljanje tlakom, brzinom, temperaturom i sigurnosne sustave.
- Cjevovodi i ventili: Mreža cijevi i ventila koja distribuira ulazne i izlazne tokove plina ili tekućine u i iz kompresorske stanice.
- Blokovi za regulaciju tlaka: Ventili i regulatori tlaka koji kontroliraju tlak plina ili tekućine u različitim dijelovima sustava.
- Sigurnosne i zaštitne naprave: Uređaji za zaštitu od preopterećenja, prekida napajanja, prekomjernog tlaka ili temperature i drugih opasnosti.



Slika 4-1. Shema kompresorske stanice (AONG website, 2018)

Budući da se vodik sastoji od vrlo malih molekula, teško ga je komprimirati. Za njegovo komprimiranje koriste se kompresori pozitivnog pomaka koji moraju imati posebne brtve za postizanje visokih tlakova potrebnih za prijenos vodika na velike udaljenosti. Pri povišenom tlaku i temperaturi može doći do prodiranja vodika u ugljični čelik, pri čemu dolazi do dekarbonizacije pa se zbog svojih svojstva, za izradu kompresora za komprimiranje vodika, predlažu legirani čelici s povećanim udjelom kroma i molibdena. Višestupanjski klipni kompresori koji mogu proizvesti tlakove od 48,26 bar do 68,95 bar smatraju se najnaprednijima, ali imaju visoke troškove održavanja zbog potrošnih komponenti kao što su ventili i klipni prstenovi. Kompresori za rad s vodikom trebali bi biti nepodmazani kako bi se smanjila mogućnost onečišćenja vodika uljem.

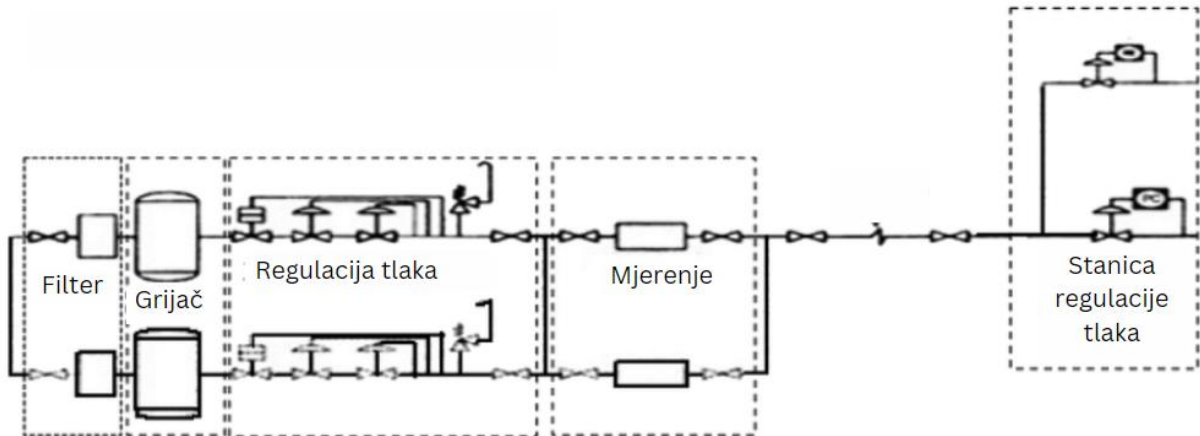
Pri odabiru opreme, veća je vjerojatnost da će se posegnuti za klipnim, umjesto za centrifugalnim kompresorom jer se zbog specifične težine vodika ograničava učinkovitost centrifugalnih kompresora. Centrifugalni kompresori rutinski se koriste za pripremu prirodnog plina za prijenos cjevovodima i zadovoljavanje drugih potreba koje uključuju visoki protok i umjerene omjere tlaka. Ako se vodik transportira putem cjevovoda, potrebni su slični kompresori dizajnirani za prijenos vodika. Zbog niske molekularne mase vodika, kompresori za vodik trebaju postići brzine koje su otprilike tri puta veće od onih koje se koriste za prirodni plin. Ovi zahtjevi za visokom brzinom i čistoćom predstavljaju izazove u dizajnu brtvi, onečišćenju, vibracijama, odabiru materijala i dinamici rotora. Nadalje, zbog svoje male specifične težine, vodik ima tendenciju vraćanja u ulaz, smanjujući time

centrifugalnu učinkovitost kompresora. Centrifugalni kompresori dizajnirani za rad s vodikom su u prototipskoj fazi razvoja. Primjer tvrtke koja proizvodi kompresore odgovarajućeg opisa je *Hydro-Pac*, čiji kompresori za vodik rade s visokim tlakom koristeći klipove bez ulja, promjenjive pogonske sustave brzine i cilindre hlađene vodom (Witkowski i dr., 2017).

4.3. Mjerna stanica

Mjerna stanica (Slika 4-2.) na cjevovodu je ključni dio infrastrukture za transport tekućina ili plinova kroz cjevovodni sustav. Iako detalji cjevovoda za prijenos vodika još uvijek nisu razvijeni, vjerojatno je da bi mjerna mjesta bila postavljena duž cjevovoda na određenim strateškim lokacijama (AONG website, 2018). Nekoliko važnih funkcija mjerne stanice su:

- Mjerenje protoka: Glavna uloga mjernih stanica je mjerenje protoka tekućina ili plinova koji prolaze kroz cjevovod. Ovo mjerenje je ključno za praćenje količine prenesenog materijala i osiguravanje da se transport odvija prema specifikacijama i zahtjevima krajnjeg kupca.
- Regulacija tlaka: Mjerne stanice često imaju sustave za regulaciju tlaka kako bi se osigurala stabilna i sigurna distribucija tekućina ili plinova kroz cjevovodni sustav. Ovo je posebno važno u slučajevima gdje se materijali transportiraju pod visokim tlakom.
- Kontrola kvalitete: Neke mjere stanica mogu imati sustave za kontrolu kvalitete materijala koji prolaze kroz cjevovod. To može uključivati testiranje sastava, temperature ili drugih karakteristika tekućine ili plina kako bi se osigurala usklađenost s propisima ili standardima kvalitete.
- Održavanje i sigurnost: Mjerne stanice obično imaju sustave za nadzor i održavanje opreme te sigurnosne mehanizme za zaštitu od propuštanja, požara ili drugih opasnosti. Redovito održavanje i inspekcije su ključni za osiguranje sigurnog i pouzdanog rada cjevovodnog sustava.



Slika 4-2. Shema mjerne stanice (BahooToroody i dr., 2018)

4.4. Stanica za izjednačavanje tlaka

Bilo da se velike količine vodika koriste kao sirovina ili gorivo za industriju ili kao gorivo za transport, kod ulaska plina u distribucijski sustav potrebno je smanjiti tlak s razine tlaka u glavnom cjevovodu na razinu tlaka distribucijskog sustava. Održavanje tlaka važno je zbog zaštite opreme od prekomjernog opterećenja te sigurnosti čitavog sustava. U distribucijskom sustavu koristili bi se regulatori tlaka kako bi se održao željeni tlak i omogućila kontrola protoka. Budući da je vodik plin bez mirisa, ukoliko bude potrebna odorizacija, kao u slučaju prirodnog plina, ta operacija obavljala bi se na stanicama za izjednačavanje tlaka (Haamavaran Energy Pars, 2022).

4.5. Ventili

Uzdruž cjevovoda nalazi se velik broj ventila koji su najčešće otvoreni i dozvoljavaju nesmetani protok plina, ali se mogu koristiti i za zaustavljanje protoka kroz određenu dionicu cjevovoda. Zbog male veličine molekula vodika, provode se dodatna istraživanja kako bi se dizajnirali optimalni i učinkoviti ventili za vodik. Pretpostavlja se da će ventili za vodik biti znatno skuplji od ventila za prirodni plin zbog potrebe za većom izdržljivošću pa će se u proizvodnji možda morati posegnuti za skupljim materijalima (Witkowski i dr., 2017).

4.6. Stanice za čišćenje cjevovoda

Stanica za ubacivanje čistača i stanica za prihvatanje čistača glavni su objekti potrebni za operaciju čišćenja cjevovoda koji se u sklopu tih stanica nalaze iznad površine zemlje. Čistači se ubacuju kako bi očistili cjevovod od hrđe, kamenca ili drugih primjesa te se kroz cjevovod kreću tjerani strujom fluida. Postoje i pametne verzije čistača koje istovremeno snimaju i prate stanje cjevovoda što omogućava pravilno održavanje i pravovremene popravke cjevovoda (Dexon Technology, 2023).

4.7. SCADA sustav

SCADA predstavlja kraticu za engleski naziv *Supervisory control and data acquisition*, a time se označava sustav za automatski nadzor, kontrolu i prikupljanje podataka o cjevovodima (SCADA International, 2023). Osnovne funkcije SCADA sustava su:

- Nadzor i prikupljanje podataka: omogućavanje prikupljanje podataka preko senzora, instrumenata i drugih uređaja koji su raspoređeni diljem industrijskog postrojenja. Ovi podaci mogu uključivati parametre kao što su temperatura, tlak, protok, razina, i mnogi drugi.
- Kontrola procesa: omogućavanje operaterima nadgledanje i kontrolu procesa putem grafičkog korisničkog sučelja. To može uključivati podešavanje parametara, upravljanje ventilima, prekidačima ili motorima te izdavanje naredbi za pokretanje ili zaustavljanje rada opreme.
- Alarmi i upozorenja: generiranje alarma i upozorenja kada se dogode određeni događaji ili kada se parametri procesa približe granicama sigurnosti ili optimalnosti. Operateri mogu odmah reagirati na ove alarme kako bi spriječili eventualne probleme ili kvarove.
- Arhiviranje i analiza podataka: arhiviranje podataka o procesu za kasniju analizu i praćenje trendova. Ovo omogućuje optimizaciju procesa, otkrivanje potencijalnih problema i poboljšanje učinkovitosti postrojenja.
- Daljinski pristup: Mnogi SCADA sustavi podržavaju daljinski pristup putem interneta, omogućujući operaterima da nadgledaju i kontroliraju procese čak i s udaljenih lokacija (SCADA International, 2023).

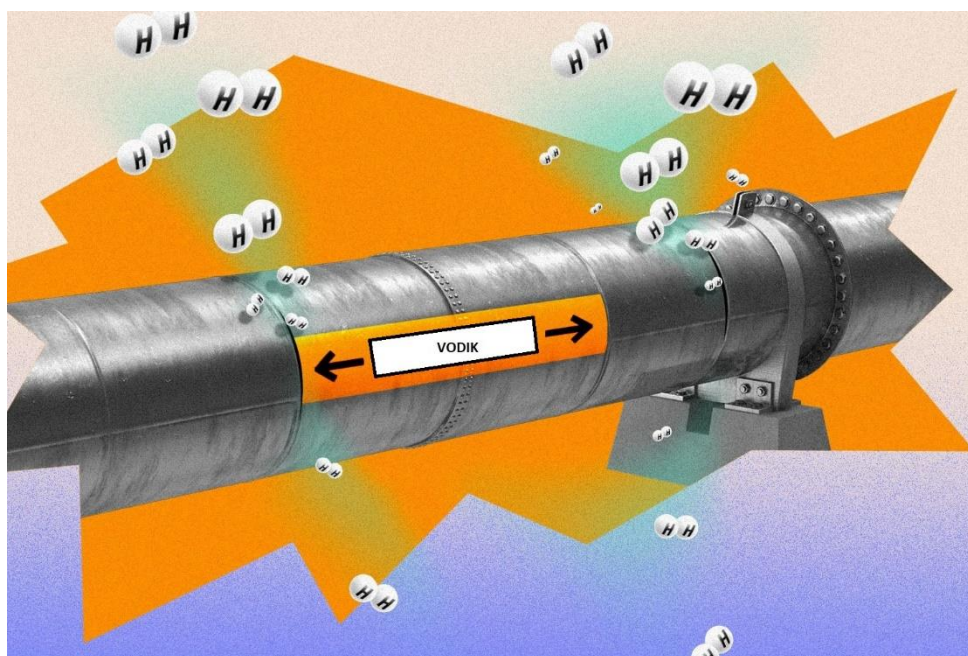
4.8. Prilazne ceste

Prilazne ceste potrebne su za izgradnju, rad i aktivnosti održavanja cjevovoda za vodik. Ove ceste bile bi izgrađene na isti način kao i za cjevovode za prirodni plin. Ukoliko bi cjevovod vodika dijelio trasu s cjevovodom prirodnom plina ili dalekovodima električne energije, prilazne ceste bi bile zajedničke za oba objekta (Gillette i Kolpa, 2007).

5. OŠTEĆENJA I PROPUŠTANJE CJEVOVODA

Do oštećenja cjevovoda za prijenos vodika najčešće dolazi zbog krtosti materijala cjevovoda zbog djelovanja vodika. Pri većem tlaku i temperaturi (koji vladaju u cjevovodu), vodik prodire u kristalnu rešetku metala te smanjuje njegovu žilavost i povećava vjerojatnost nastanka loma. Vjerojatnost i ozbiljnost oštećenja cjevovoda zbog krtosti ovise o materijalu cijevi, radnom tlaku i temperaturi, oscilacijama tlaka unutar cjevovoda i koncentraciji vodika ako se cjevovodom transportira smjesa vodika i prirodnog plina. Ukoliko dođe do puknuća ili oštećenja cjevovoda ili su pak komponente cjevovoda poput ventila i brtvi neispravne, dolazi do propuštanja cjevovoda i ispuštanja vodika.

Budući da je vodik najmanji element, veće su mogućnosti njegovog istjecanja kroz spojeve cijevi (Slika 5-1.) nego za slučaj prijenosa prirodnog plina. Brzina difuzije vodika je četiri puta veća od one prirodnog plina pa je potrebno ugrađivati sigurnosne ventile i brtve od kvalitetnijih materijala kako bi se smanjili rizici oštećenja. Istjecanje vodika ovisi i o materijalu cjevovoda. Lijevano željezo i vlaknasti cement, koji se ionako jako rijetko koriste, skloniji su propuštanju. Danas se u većini distribucijskih mreža koriste polietilenske cijevi. Istraživanja su pokazala da godišnji gubitak volumena zbog propuštanja iznosi 0,0005-0,001% ukupnog transportiranog volumena (Gondal, 2016).



Slika 5-1. Shema istjecanja vodika kroz spojeve cijevi (Tech Brew, 2022)

Dodatno, kompresori postavljeni duž prijenosne linije još su jedan faktor koji treba uzeti u obzir. Kompresori mogu biti ili klipni ili centrifugalni. Dakle, ako se vodik želi transportirati u mreži visokog tlaka, volumen vodika koji treba transportirati mora biti trostruko veći od volumena prirodnog plina. Rotacijske brzine kompresora morale bi se višestruko povećati kako bi se podudarale s brzinom protoka. Povećane brzine rotacije ograničene su čvrstoćom materijala kompresora, stoga se može zaključiti da kompresori instalirani u postojećoj infrastrukturi nisu dovoljni za rukovanje istom količinom vodika kao što je slučaj za prirodni plin. Također treba napomenuti da isto ne vrijedi za distribucijsku infrastrukturu budući da se tamo ne koriste stanice za kompresiju (Gondal, 2016).

Još jedno karakteristično ponašanje vodika očituje se kada mu se smanji tlak. Kada je izložen smanjenju tlaka, prirodnom plinu se temperatura smanji za oko 0,5 °C sa svakim barom smanjenja tlaka. S druge strane, temperatura vodika poveća se za 0,35 °C pri povećanju tlaka za jedan bar. Povećanje temperature vodika može utjecati na materijale i integritet cjevovoda koji se koristi za transport na više načina, od kojih su neki: deformacija materijala, slabljenje materijala i korozija, što sve na kraju može rezultirati propuštanjem cjevovoda (Gondal, 2016).

6. SKLADIŠTENJE VODIKA





Problem kod skladištenja vodika je njegova izrazito mala gustoća. Ukoliko se skladišti pri temperaturi od 20 °C i atmosferskom tlaku od 1,01325 bar, vodik zahtijeva veći volumen skladištenja nego druga goriva. Najčešće rješenje pohrane vodika je komprimiranje na 700 bara i skladištenje u metalne ili kompozitne spremnike. Postoje četiri kategorizirana tipa spremnika (Slika 6-1.) koji se razlikuju prema vrsti materijala od kojeg su izrađeni i maksimalnom dopuštenom tlaku skladištenja (Ustolin i dr., 2020).

Spremnici za vodik Tipa I izrađuju se isključivo od metala i sastoje se samo od metalne obloge s opcionalnim završnim čepom. Nema vanjskog omotača, a konstrukcija i proizvodnja ovog tipa spremnika su prilično jednostavne pa su ti spremnici stoga i relativno jeftini. Takav spremnik se također naziva „tipom I“ spremnika za vodik i „tipom I“ cilindra za vodik (Hyfindr, 2023).

Spremnici za vodik „tip II“ sastoje se od metalne unutarnje obloge (obično aluminijske) oko koje je dodan vanjski omotač od kompozitnih materijala od staklenih vlakana umetnutih u matricu od plastike ili smole (engl. *Glass Reinforced Fiber Plastic* – GRFP) kako bi se osigurao zaštitni omotač unutarnje metalne obloge. To omogućuje veće tlakove u spremniku za vodik s relativno tankom oblogom, što je prednost u usporedbi sa spremnikom u kojem bi unutarnja obloga morala biti veće debljine da bi izdržala isti tlak. Vanjski omotač izrađen je od sintetičkog materijala. Takav spremnik naziva se također „tipom II“ spremnika za vodik ili „tipom II“ cilindra za vodik (Hyfindr, 2023).

Kod spremnika za vodik „tipa III“, unutarnja metalna obloga stanjuje se na razinu na kojoj ona više ne podnosi tlak opterećenja, već se tlak podržava drugim slojevima omotanom u potpunosti oko unutarnje obloge. Vanjski omotač stoga preuzima zadržavanje težine sadržaja spremnika i fizičku potporu. Vanjski slojevi oko metala napravljeni su od kompozitnih materijala kao što su ugljična vlakna i polimeri (engl. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* - CFRP). Vlakna pružaju čvrstoću i krutost, dok smola pruža otpornost na udarce, otpornost na habanje, te omogućuje oblikovanje materijala u željeni oblik. Kada se ova dva materijala kombiniraju, stvara se kompozitni materijal koji često ima bolje mehaničke karakteristike od svakog materijala pojedinačno. Primjeri kompozitnih materijala uključuju stakloplastiku, koja kombinira staklena vlakna i poliestersku smolu, ili ugljična vlakna koja se kombiniraju s epoksidnom smolom kako bi se stvorili vrlo jaki i lagani materijali. Takav spremnik se također naziva „tipom III“ spremnika za vodik, „tipom III“ cilindra za vodik ili „tipom III“ cilindra za vodik (Hyfindr, 2023).

Spremnici za vodik „tipa IV“ imaju polimernu unutarnju oblogu napravljenu od kompozitnih materijala i obloženi su vanjskim omotačem sastavljenim od ugljičnih vlakana i drugih međusobno povezanih termoplastičnih polimera. U usporedbi s „tipom I“ spremnika, težina im je 70% manja. Stoga je ovaj tip spremnika posebno privlačan za primjene kada je vodik potrebno skladištiti pod visokim tlakovima (kao npr. 700 bara) uz malu težinu sustava. To vrijedi primjerice za mnoge primjene u aeronautici. „Tip IV“ spremnika za vodik naziva se i „tipom IV“ spremnika za vodik i „tipom IV“ cilindra za vodik (Hyfindr, 2023).

| | Tip I | Tip II | Tip III | Tip IV |
|-----------|---|--|--|--|
| Materijal |  <p>Metalna unutarnja i vanjska strana</p> |  <p>Metal s unutarnje strane, sloj kompozita (GRFP) s vanjske strane (djelomično)</p> |  <p>Metal s unutarnje strane, sloj polimera (CRFP) s vanjske strane (u potpunosti)</p> |  <p>Plastika s unutarnje strane, sloj polimera (CRFP) s vanjske strane (u potpunosti)</p> |

Slika 6-1. Tipovi spremnika za pohranu vodika (Hyfindr, 2023)

Drugi način pohrane je ukapljivanje vodika i skladištenje u posebnim kriogenim spremnicima. Ukapljeni vodik gustoće je $70,9 \text{ kg/m}^3$ pri temperaturi od $-252,75 \text{ }^\circ\text{C}$ ($20,4 \text{ K}$) i atmosferskom tlaku. Budući da je temperatura vrenja vodika otprilike $-252,87 \text{ }^\circ\text{C}$, vrlo lako može doći do njegovog isparavanja pri skladištenju u tekućem stanju. Zbog toga se obično pohranjuje u posudama dvostrukih stijenki sastavljenim od dva metalna spremnika odvojena ili vakuumskim omotačem ispunjenim toplinski izolacijskim materijalom, npr. perlitnim prahom, ili višeslojnom izolacijom. Najveći nedostatak skladištenja ukapljenog vodika je nastanak otparka (engl. *Boil-off gas* - BOG). Pri normalnim uvjetima, vodik se sastoji od izomera 75% orto-vodika i 25% para-vodika, a do isparavanja dolazi zbog većeg udjela orto-vodika. Zato se procesom ukapljivanja vodik pretvara u 100% para-vodik koji smanjuje pojavu otparka.

Maksimalna gustoća vodika postignuta krio-komprimiranim načinom skladištenja iznosi 80 kg/m^3 , a postiže se pri tlaku od 300 bar i temperaturi $-235,15 \text{ }^\circ\text{C}$ (38 K). Na taj se način smanjuje pojava otparka budući da spremnici mogu podnijeti tlak do 350 bar i mogu se napuniti tekućim ili komprimiranim vodikom. Troškovi ove metode veći su nego kod pohrane tekućeg vodika (Ustolin i dr., 2020).

Kod skladištenja vodika ne smiju se zanemariti sigurnosni aspekti. U Norveškoj je u lipnju 2019. godine došlo do ispuštanja vodika iz spremnika na stanici za punjenje vodikova goriva, što je dovelo do eksplozije i požara. Slično tome, u Kaliforniji je u lipnju 2019. godine, vodik istekao iz cisterne nakon punjena u kemijskoj tvornici pri čemu je također došlo do eksplozije i požara (Siemens Energy, 2021).

7. PRIMJER TRANSPORTA VODIKA CJEVOVODIMA

Iako su cjevovodi vodika najčešće izrađeni na kratkim relacijama za potrebe korištenja tvrtke koja ga i proizvodi ili ostalih krajnjih korisnika, u svijetu postoji i nekoliko cjevovoda koje prenose vodik na dulje relacije. Tablica 7-1. donosi kratki pregled najvažnijih i najduljih od njih (Parfomak, 2021).

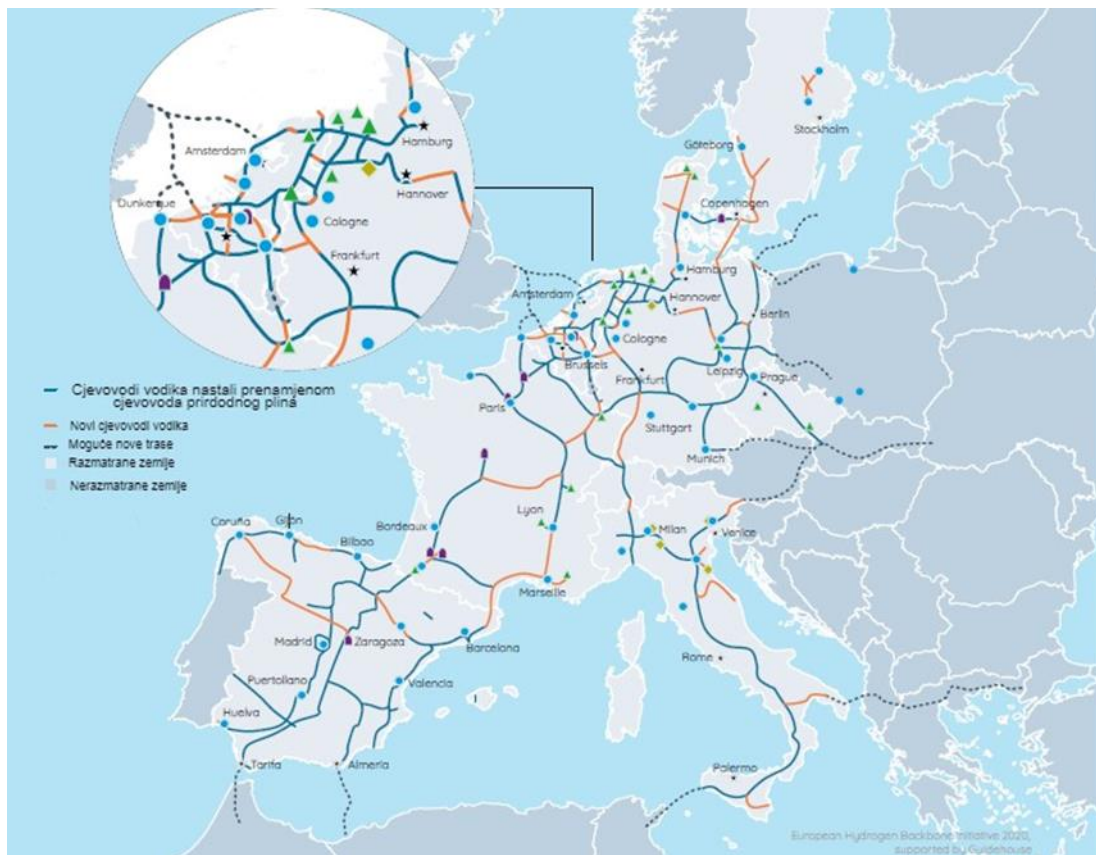
Tablica 7-1. Duljine cjevovoda za prijenos vodika u svijetu (Parfomak, 2021)

| Država | Duljina cjevovoda (km) |
|-----------|------------------------|
| SAD | 2575 |
| Francuska | 550 |
| Njemačka | 220 |
| Belgija | 80 |
| Engleska | 16 |

Trenutno najduži cjevovod za prijenos vodika u Europi nalazi se u Francuskoj, duljine je preko 550 kilometara, unutarnjeg promjera 100 mm, te godišnje transportira $200\ 106\ \text{m}^3$ vodika. Njemačka ima jedan od najduljih cjevovoda za vodik koji spaja Düsseldorf i Recklinghausen. Duljine je 220 km, a unutarnjeg promjera od 100 do 300 mm. Radni tlak mu je 20 bara te se njime već 60 godina transportira vodik. U Belgiji se nalazi cjevovod unutarnjeg promjera 150 mm, duljine 80 km i radnog tlaka 100 bara. Nešto kraći cjevovod nalazi se u Engleskoj, duljine je 16 km i radnog tlaka 5 MPa (Parfomak, 2021). U Sjedinjenim Američkim Državama trenutno je u funkciji 2575 km cjevovoda kojima se transportira vodik. Ti cjevovodi su uglavnom u vlasništvu tvrtki koji su trgovci vodikom te se nalaze na područjima gdje su koncentrirana postrojenja koja koriste vodik, kao što su rafinerije nafte i kemijska postrojenja, kojih najviše ima u regiji obale Meksičkog zaljeva (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2023).

7.1. Njemačka

Kao inicijativa suradnje europskih operatora prijenosa prirodnog plina, osnovan je ENTSOG (engl. *The European Network of Transmission System Operators for Gas*) Trećim energetske paktom 2009. godine. Cilj Trećeg energetske pakta bio je razvoj konkurentnih tržišta i osiguranje opskrbe, kako u interesu europskih potrošača, tako i radi olakšavanja suradnje operatora prijenosa plina. Jedna od zadaća ENTSOG-a je izrada desetogodišnjih planova razvoja mreže cjevovoda te su tako izradili kartu potencijalne europske mreže cjevovoda za prijenos vodika koju se namjerava ostvariti do 2040. godine (Slika 7-1.) (ENTSOG, 2021). U središnjem dijelu te mreže je Njemačka koja danas ima dobro razvijenu mrežu plinovoda duljine oko 40 000 km transportnih plinovoda i 470 000 km distribucijskih. Njemačka također raspolaže i velikim skladišnim volumenom u podzemnim skladištima prirodnog plina (ukupni radni volumen 24,3 milijarde m³), a većina tih skladišta su kaverne u solnim domama ili slojevima soli koje su idealni tip skladišta za skladištenje vodika (Siemens Energy, 2021).



Slika 7-1. Trase potencijalne europske mreže cjevovoda za transport vodika (ENTSOG, 2021)

Sve to ukazuje da njemačka plinska infrastruktura zadovoljava sve preduvjete za prijelaz iz transportnog sustava prirodnog plina u transportni sustav vodika. Postojeće trase plinovoda važan su dio transportnog sustava i nude mogućnost izgradnje pogona za proizvodnju vodika u određenom vremenu uz relativno mala ulaganja. Postojeći kompresori, mjerni uređaji, i spojni elementi mogu se lako zamijeniti za transport vodika, što je svakako jeftinija opcija nego izgradnja potpuno novih transportnih sustava jer se na taj način štedi vrijeme i izbjegava i trošak dobivanja potrebnih odobrenja i dozvola. U najboljem slučaju izgradnja novih cjevovoda trajala bi od 5 do 7 godina od početnog planiranja do puštanja u rad. Međutim, postojeće trase plinovoda i njihovo pravo prolaska već je prihvaćeno od strane stanovništva pa je taj trošak izbjegnuto (Siemens Energy, 2021).

Carbon Limits i Dat Norske Veritas (DNV) (2021) izradili su studiju o realnom potencijalu i mogućnostima prenamjene postojeće kopnene i odobalne infrastrukture plinovoda prirodnog plina u plinovode za transport vodika. Skoro 90% odobalnih cjevovoda izrađeno je od API 5L čelika kvalitete X65. Prosječni maksimalni operativni tlak je oko 150 bara za odobalne naftovode i 160 bara za plinovode. Veličine promjera za odobalne naftovode kreću se od 0,3048 m do 0,9144 m, a za plinovodi su uglavnom promjera većih od 0,6096 m. Kopneni cjevovodi koji su bili uključeni u studiju izrađeni su od čelika kojima se kvalitete kreću u rasponu od X52 do X80, ali ih je 45% izrađeno od čelika kvalitete X60. Za razliku od odobalnih, kopneni cjevovodi imaju manji maksimalni operativni tlak koji se kreće od 40 bara do 100 bara. Promatranim kopnenim cjevovodima promjeri se kreću od 0,3048 m do 0,9144 m. Od oko 58 000 km cjevovoda koji su promatrani i analizirani u navedenom projektu (oko 41 700 km na kopnu i 16 300 na moru), te za koje su raspoloživi podaci, početna analiza pokazala je da se tehnički većina odobalnih cjevovoda može prenamijeniti za transport vodika. Na kopnu, gotovo 70% ukupne dužine cjevovoda može se prenamijeniti uzimajući u obzir trenutno stanje napretka tehnologije. Preostala dužina cjevovoda ima potencijala za ponovnu upotrebu, ali bi zahtijevala više testiranja i/ili ažuriranje normi kako bi prenamjena bila moguća. Cjevovodi koji bi se mogli prenamijeniti izrađeni od kvalitete čelika X60, X65 i više jer su otporniji na pukotine uzrokovane prijenosom vodika. S ekonomskog stajališta, prenamjena cjevovoda uvelike je isplativija nego ponovna izgradnja. Također je moguće primijetiti razliku između slučajeva na moru i na kopnu, gdje su uštede po kilometru veće za slučajeve na moru (1,6-2,6 milijuna eura po kilometru) nego za slučajeve na kopnu (0,9-1,7 milijuna eura po kilometru).

Budući da gustoća energije vodika nije znatno manja od gustoće energije prirodnog plina, prijelaz s prirodnog plina na vodik imao bi mali utjecaj na kapacitet cjevovoda za transport. Gornja ogrjevna vrijednost prirodnog plina iznosi oko 11 kWh/m³, a vodika oko 3,5 kWh/m³ tako da je pri istom tlaku potreban tri puta veći volumen vodika da bi sadržaj energije ostao konstantan. Kada se uspoređuje protok energije dvaju plinova kroz cjevovod, važni su ne samo volumen, već i parametri gustoće, brzine protoka i tlaka. Budući da vodik ima devet puta manju gustoću i trostruko veći protok od prirodnog plina, gotovo trostruko više vodika može se transportirati kroz cjevovod pri istom tlaku i tijekom istog vremena. Tada je gustoća energije samo neznatno smanjena (Siemens Energy, 2021).

Da bi vodik ušao u transportni sustav, mora ga se komprimirati na radni tlak mreže. Zato kompresorske stanice duž cjevovoda osiguravaju održavanje tlaka unatoč gubitku protoka. Kako bi se omogućilo optimalno iskorištavanje cjevovoda, potrebno je više kompresora veće snage nego kod transporta prirodnog plina. Za projekte kojima se planira transport male i srednje količine vodika, kao kompresori se mogu koristiti već razvijeni i isprobani kompresori, ali kod dugoročnih operacija kojima se planira nacionalni prijelaz na vodik potrebno je trenutno korištene koncepte turbokompresora optimizirati za vodik. Zbog intenzivnog razvoja interesa za industrijom vodika, očekuje se da će se do 2030. godine isključivo vodik koristiti i kao pogonsko gorivo za kompresore ili da će se u skladu s potrebom kompresori podešavati. Kompresori pogonjeni plinskim turbinama moraju se prilagoditi sastavu mješavine koja se transportira, a služi kao pogonsko gorivo za turbine. Međutim, ako su kompresori pogonjeni elektromotorima na njima nije potrebno obavljati velike izmjene. Najvažnije je prilagoditi brzinu rada i provjeriti sigurnost u radu s vodikom. Pretpostavlja se da će se razvoj turbokompresora dogoditi već kroz nekoliko godina (Siemens Energy, 2021).

8. ZAKLJUČAK

Strategija za prelazak s fosilnih goriva na manje štetne alternative još se razvija diljem svijeta, a korištenje vodika kao goriva i industrijske sirovine važan je korak te strategije. Za daljnji razvoj industrije vodika potrebno je raspolagati mrežom cjevovoda kakva postoji i za prirodni plin. Takva mreža može se uspostaviti kombinacijom izgradnje novih cjevovoda dizajniranih za transport vodika i prenamjene već postojećih cjevovoda za transport prirodnog plina, budući da su cjevovodi ekonomski najisplativiji način transporta za veće količine na veće udaljenosti. Uz problem infrastrukture, potrebno je razviti i tehnologije za rješavanje propuštanja cjevovoda i krtosti materijala od kojih su izrađeni te uređaje za omogućavanje transporta vodika pod visokim tlakom. Kao jedan od izazova javlja se i učinkovita kompresija vodika koja je još u razvoju. Osim tehnološkog razvoja za učinkovitu proizvodnju vodika u industrijskim razmjerima, potrebni su i primjereni uvjeti za tržište vodika. Budući da vodik do sada nije bio dovoljno razmatran u zakonodavnoj regulativi država EU vezanim uz proizvodnju i korištenje energije, nalazi se u tom smislu u nepovoljnom položaju u usporedbi s ostalim izvorima energije. Primjerice, u Njemačkoj se, da bi se postigla ekonomska ravnopravnost energenata, zahtijevaju između ostalog, sljedeće prilagodbe: stvaranje zakonskih mogućnosti za prenamjenu infrastrukture prirodnog plina u infrastrukturu za rad s vodikom, omogućavanje rada mreže čistog vodika, uređivanje propisa za transport i skladištenje neovisno o načinu proizvodnje i reguliranje ulaska vodika u mrežu prirodnog plina. Sve češće ukazivanje na loše strane korištenja ugljikovodika predstavlja priliku za promicanje tehnologije vodika, ali postavlja i pitanje isplativosti i učinkovitosti jer je vjerojatno da se količina energije koja se dobiva od ugljikovodika ne može dobiti iz vodika.

9. POPIS LITERATURE

1. BahooToroody, A., Mahdi Abaei, M., BahooToroody, F., De Carlo, F., Abbassi, R., Khalaj, S. 2019. *A condition monitoring based signal filtering approach for dynamic time dependent safety assessment of natural gas distribution process*. Process Safety and Environmental Protection, 123, str. 335–343.
2. Carbon Limits i DNV. 2021. *Re-Stream – Study on the reuse of oil and gas infrastructure for hydrogen and CCS in Europe*. Studija.
3. Copenhagen Economics. 2017. *The future of fossil fuels: How to steer fossil fuel use in a transition to a low-carbon energy system*. Izveštaj. Energy Transitions Comission.
4. Gillette, J.L., Kolpa, R.L. 2007. *Overview of Interstate Hydrogen Pipeline Systems*. Izveštaj. Lemont. Nacionalni laboratorij Argonne.
5. Gondal, I.A. 2016. *Hydrogen transportation by pipelines*. Studija. Rawalpindi, Pakistan. Nacionalno sveučilište znanosti i tehnologije.
6. Hamburg, S.P., Ocko, I.B. 2022. *Climate consequences of hydrogen emissions*. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(14), str. 9349–9368.
7. Monsma, V., Ilson, T., Hussain, A. 2023. *Repurposing Pipelines for Hydrogen Transportation*. Pipeline & Gas Journal, 250(6)
8. Ogden, J., Yang, C. 2006. *Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode*. Studija. Davis. Sveučilište u Kaliforniji.
9. Olufemi Oni, A., Anaya, Y.K. 2022. *Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions*. Studija. Kanada. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta.
10. Parfomak, P.W., 2021. *Pipeline Transportation of Hydrogen: Regulation, Research, and Policy*. Studija. SAD. Kongresna istraživačka služba.
11. Siemens energy. 2021. *Hydrogen infrastructure – the pillar of energy transition*. Studija. Erlangen, Njemačka. Siemens Energy Global.
12. Ustolin, F., Paltrinieri, N., Berto, F. 2020. *Loss of integrity of hydrogen technologies: A critical review*. Izveštaj. Trondheim. Norveško sveučilište znanosti i tehnologije.
13. Witkowski, A., Rusin, A., Majkut, M., Stolecka, K. 2017. *Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects*. Analiza. Energy.

Web izvori:

14. AONG website. 2018. *Natural Gas Compressor station components*.
URL: <https://www.arab-oil-naturalgas.com/natural-gas-compressor-station-components/> (24.4.2024.)
15. Center for Domestic Preparedness. 2022. *High-Pressure Tanks*.
URL: <https://cdp.dhs.gov/shared/se/courses/default/AWR-358%20dL%20040921/groups/74.html> (24.4.2024.)
16. Dexon Technology. 2023. *Pipeline services - Pipeline Pigging*.
URL: <https://www.dexon-technology.com/pipeline-services/intelligent-pigging/pipeline-pigging/> (23.4.2024)
17. ENTSOG. 2021. *ENTSOG*.
URL: <https://www.entsog.eu/> (23.4.2024.)
18. ESG News. 2022. *Chart Industries Releases Third Annual Sustainability Report and ESG Metrics*.
URL: <https://esgnews.com/chart-industries-releases-third-annual-sustainability-report-and-esg-metrics/> (24.4.2024.)
19. Haamavaran Energy Pars. 2022. *City Gates Stations Natural Gas*.
URL: <http://www.hep-co.com/city-gates-stations-natural-gas/> (23.4.2024.)
20. Hrvatska energetska tranzicija. 2023. *Smjernice za hrvatsku energetska tranziciju*.
URL: <https://het.hr/smjernice-za-hrvatsku-energetska-tranziciju/> (17.4.2023.)
21. Hyfindr. 2023. *Hydrogen Tank – Type I-IV*.
URL: <https://hyfindr.com/en/hydrogen-knowledge/hydrogen-tank> (16.4.2024.)
22. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. 2023. *Hydrogen pipelines*.
URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines> (16.4.2024.)
23. SCADA International. 2023. *What is SCADA?*
URL: <https://scada-international.com/what-is-scada/> (23.4.2024.)
24. Tech Brew. 2022. *Clean hydrogen has a leak problem—and the tech to monitor it is nascent*.
URL: <https://www.emergingtechbrew.com/stories/2022/09/08/clean-hydrogen-has-a-leak-problem-and-the-tech-to-monitor-it-is-nascent> (23.4.2024.)

IZJAVA

Izjavlujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

Ana Škarjalk



KLASA: 602-01/24-01/64
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 9. 5. 2024.

Ana Škarjak, studentica

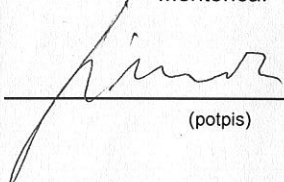
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/64, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 30.04.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

Transport vodika cjevovodima

Za mentoricu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof. dr. sc. Katarina Simon nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu Dr. sc. Katarina Žbulj.

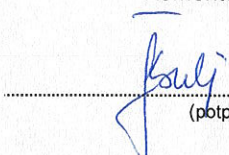
Mentorica:


(potpis)

Prof. dr. sc. Katarina Simon

(titula, ime i prezime)

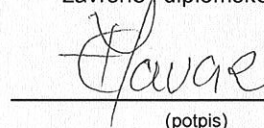
Komentorica:


(potpis)

Dr. sc. Katarina Žbulj

(titula, ime i prezime)

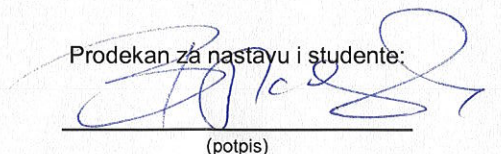
Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)