

Analiza troškova proizvodnje vodika iz različitih izvora

Badrov, Valentina

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:169:795410>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**ANALIZA TROŠKOVA PROIZVODNJE VODIKA IZ RAZLIČITIH
IZVORA**

Završni rad

Valentina Badrov

N4415

Zagreb, 2022.

ANALIZA TROŠKOVA PROIZVODNJE VODIKA IZ RAZLIČITIH IZVORA

VALENTINA BADROV

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

Sažetak

Vodik se smatra ključnim sredstvom za postizanje ugljične neutralnosti te poticanje cirkularne ekonomije. U završnom radu opisane su glavne četiri boje vodika i njihove pripadajuće metode proizvodnje. Analizirani su troškovi proizvodnje za svaku pojedinu metodu i promjena troškova ovisno o uporabi različite tehnologije pri proizvodnji. Osim glavnih metoda proizvodnje, analizirano je i vodikovo tržište te potencijal njegova razvoja.

Ključne riječi: vodik, sivi vodik, plavi vodik, tirkizni vodik, zeleni vodik, kapitalni trošak, operativni trošak, ugljična neutralnost

Završni rad sadrži: 30 stranica, 11 slika, 14 tablica i 30 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica, RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica, RGNF
Dr.sc. Luka Perković, izvanredni profesor, RGNF
Dr. sc. Sonja Koščak -Kolin, docentica RGNF

Datum obrane: 17.2.2022. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SADRŽAJ

| | |
|---|------------|
| I. POPIS SLIKA | I |
| II. POPIS TABLICA | II |
| III. POPIS KORIŠTENIH KRATICA | III |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. SIVI VODIK | 2 |
| 2.1. METODA PARNOG REFORMIRANJA METANA | 2 |
| 2.1.1. <i>Troškovi proizvodnje vodika metodom parnog reformiranja</i> | 3 |
| 2.2. METODA UPLINJAVANJA UGLJENA (engl. <i>Coal Gasification - CG</i>) | 4 |
| 2.2.1. <i>Troškovi proizvodnje vodika metodom uplinjavanja ugljena</i> | 5 |
| 3. PLAVI VODIK | 7 |
| 3.1. EMISIJE PLAVOG VODIKA | 7 |
| 3.2. TROŠKOVI PROIZVODNJE VODIKA METODOM PARNOG REFORMIRANJA UZ SKLADIŠTENJE CO ₂ | 9 |
| 4. TIRKIZNI VODIK | 11 |
| 4.1. PROCES PIROLIZE | 11 |
| 5.2. TROŠKOVI PROIZVODNJE VODIKA METODOM PIROLIZE | 14 |
| 5. ZELENI VODIK | 15 |
| 5.1. PROCES ELEKTROLIZE | 15 |
| 5.2. TROŠKOVI PROIZVODNJE ZELENOG VODIKA | 17 |
| 6. VODIK KAO ENERAGENT BUDUĆNOSTI UNUTAR EUROPSKOG ZELENOG PLANA | 20 |
| 7. ZAKLJUČAK | 27 |
| 8. LITERATURA | 28 |

I. POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 2-1. Izvori svjetske proizvodnje vodika..... | 2 |
| Slika 2-2. Prikaz klasičnog uplinjavanja ugljena | 5 |
| Slika 3-1. Emisije stakleničkih plinova izražene kao ekvivalent CO ₂ | 8 |
| Slika 4-1. Prikaz procesa pirolize..... | 12 |
| Slika 5-1. Prikaz procesa elektrolize | 16 |
| Slika 6-1. Prikaz rješenja uporabom zelenog vodika kroz cijeli vrijednosni lanac | 21 |
| Slika 6-2. Prikaz predviđenog rasta potrošnje vodika i goriva na bazi vodika u industrijskom sektoru u skladu sa NZE | 22 |
| Slika 6-3. Prikaz predviđenog rasta potrošnje vodika i goriva na bazi vodika u transportnom sektoru u skladu sa NZE | 23 |
| Slika 6-4. Prikaz cijene koštanja proizvodnje vodika za različite izvore za 2019.godinu . | 24 |
| Slika 6-5. Prikaz cijene koštanja proizvodnje vodika za različite izvore za 2050.godinu .. | 25 |
| Slika 6-6. Usporedba cijene vodika i fosilnih goriva..... | 26 |

II. POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 2-1. Cijena vodika proizvedenog metodom parnog reformiranja metana | 4 |
| Tablica 2-2. Cijena vodika proizvedenog metodom uplinjavanja ugljena | 5 |
| Tablica 2-3. Gray Tomlinsova usporedba tehnologija proizvodnje vodika iz ugljena..... | 6 |
| Tablica 3-1. Usporedba utrošenog metana te emisija stakleničkih plinova kod parnog reformiranja metana za sivi i plavi vodik | 8 |
| Tablica 3-2. Usporedba emisija stakleničkih plinovima pri različitoj uspješnosti skladištenja CO ₂ | 9 |
| Tablica 3-3. Troškovi skladištenja CO ₂ | 9 |
| Tablica 3-4. Troškovi transporta CO ₂ | 9 |
| Tablica 3-5. Cijena vodika proizvedenog metodom parnog reformiranja i uplinjavanja ugljena sa skladištenjem ugljika. | 10 |
| Tablica 4-1. Usporedba energije potrebne za proizvodnju tirkiznog i zelenog vodika | 13 |
| Tablica 4-2. Cijena vodika proizvedenog metodom pirolize..... | 14 |
| Tablica 5-1. Prikaz kapitalnih troškova za dvije različite tehnologije elektrolize | 18 |
| Tablica 5-2. Prikaz operativnih troškova za dvije različite tehnologije elektrolize | 18 |
| Tablica 5-3. Primjeri različite cijene vodika ovisno o ključnim faktorima rada vjetroelektrana. | 18 |
| Tablica 5-4. Konačni troškovi proizvodnje vodika za vjetroelektrane i solarne elektrane. 19 | |

III. POPIS KORIŠTENIH KRATICA

NZE - Scenarij neto nulte emisije (engl. *Net-zero Emissions Scenario*)

CO₂ - ugljikov dioksid

H₂-vodik

SMR - Parno reformiranje metana (engl. *Steam Methane Reforming*)

WGSR - Reakcija pomicanja vode i plina (engl. *Water Gas Shift Reaction*)

PSA - Tlačno-izmjenična adsorpcija (engl. *Pressure Swing Adsorption*)

CG - Uplinjavanje ugljena (engl. *Coal Gasification*)

CCS - Hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture and Storage*)

EU - Europska unija (engl. *European Union*)

ETS – Sustav trgovanja emisijama (engl. *Emissions Trading System*)

NASA – Nacionalna aeronautička i svemirska administracija (engl. *National Aeronautics and Space Administration*)

OPEX - operativni troškovi (engl. *Operating Expenses*)

CAPEX - kapitalni troškovi (engl. *Capital Expenses*)

SNG - sintetički prirodni plin (engl. *Sintetic Natural Gas*)

1. UVOD

Vodik čini 75% sve mase u svemiru, gradi gotovo sva živa bića te je kao takav neiscrpan i idealan energent. Još je davne 1874. godine francuski romanopisac, Jules Verne, prepoznao potencijal vodika i kisika kao neograničene izvore energije i topline (Schierenbeck, 2020) Tijekom prve polovice 20. stoljeća vodik se uglavnom koristio kao plin za punjenje cepelina, no zbog eksplozije njemačkog cepelina Hindenburga 1937. godine dovedeno je u pitanje sigurnost transporta na vodik.

Kasnije, u drugoj polovici 20. stoljeća NASA upotrebljava vodik kao raketno gorivo kod Apollo-a 11 te su dizajnirani prvi automobili na vodik i tako je vraćena budućnost vodikovoj ekonomiji. Danas, smatra se jednim od bitnijih energenata budućnosti te ključan element pri energetske tranziciji u cilju smanjenja emisija stakleničkih plinova (Hydrogen Council, 2017)

Prema Međunarodnoj energetskej agenciji (2021) potražnja za vodikom u 2020. godini iznosila je 90 Mt, od kojih se više od 50% koristilo u rafinerijama, a ostatak uglavnom u kemijskej industriji.

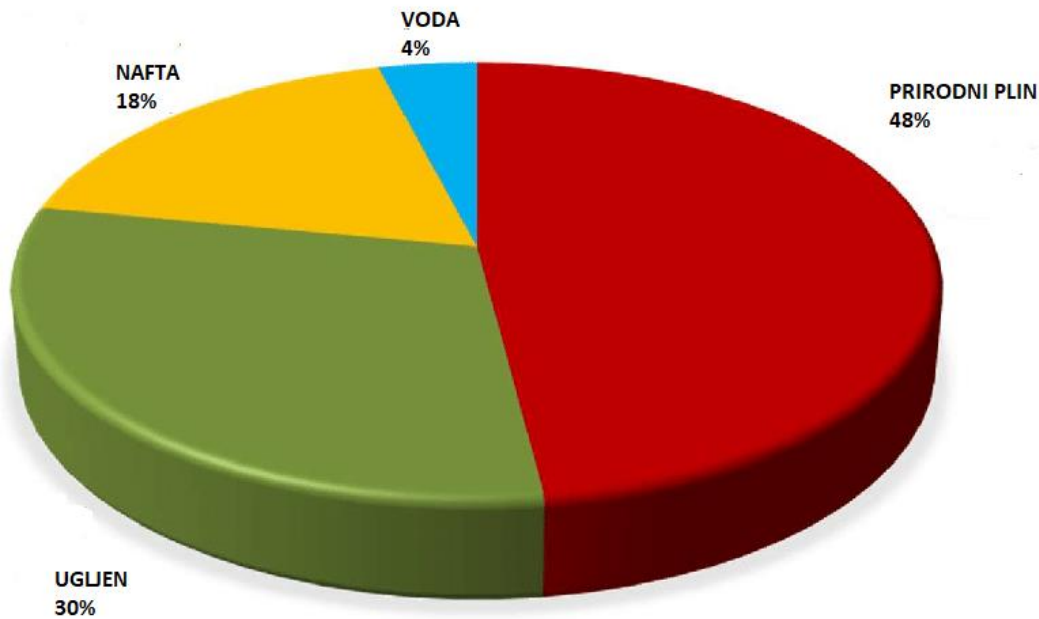
Prema Službi Europskog parlamenta za istraživanja (2021) ovisno o načinu proizvodnje te emisijama stakleničkih plinova pri pridobivanju, vodik se dijeli u 4 osnovne skupine:

- Sivi vodik
- Plavi vodik
- Tirkizni vodik
- Zeleni vodik

Svi budući planovi za vodik uglavnom se temelje na zelenom vodiku zato što ne ostavlja gotovo nikakav otisak na zemljinu atmosferu. U ovom radu biti će analizirano prethodno navedene vrste vodika sa naglaskom na njihov trošak pri proizvodnji, te kratak osvrt na planove sa vodikom unutar scenarija neto nulte emisije (engl. *Net-zero Emissions Scenario* - *NZE*).

2. SIVI VODIK

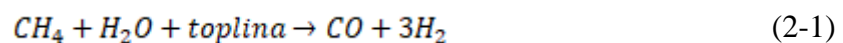
Trenutačno najrasprostranjenija metoda proizvodnje vodika je iz fosilnih goriva. Tzv. sivi vodik čini 96% ukupne proizvodnje vodika što je vidljivo na slici 2-1. Cilj Europske unije je da proizvodnju vodika iz fosilnih goriva do 2050. godine svede na nulu. Prema Službi Europskog parlamenta za usluge istraživanja, pri proizvodnji jednog kilograma vodika iz fosilnih goriva, u atmosferu se emitira oko 9,3 kg CO₂.



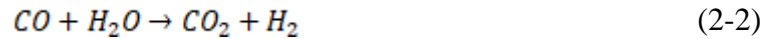
Slika 2-1. Izvori svjetske proizvodnje vodika (Jimenez-Calvo, 2019)

2.1. METODA PARNOG REFORMIRANJA METANA

Gotovo 50% ukupne proizvodnje vodika iz fosilnih goriva otpada na metodu parnog reformiranja, tj. dobivanje vodika iz prirodnog plina. Metoda parnog reformiranja (engl. *Steam Methane Reforming - SMR*) endoterman je proces gdje se prirodnom plinu, nakon uklanjanja nečistoća, dovodi vodena para pod temperaturama u rasponu od 700-1000 °C. Uz pomoć heterogenih katalizatora, formira se ugljikov monoksid i vodik (Kayfeci et al., 2019)



Kako bi se povećala proizvodnju vodika koristimo drugi katalizator (engl. *Water gas shift reaction* - *WGSR*). Djeluje na principu da prethodno proizveden ugljikov monoksid reagira s vodenom parom i nastaju ugljikov dioksid i vodik.



Završni postupak je pročišćenje finalnog proizvoda (engl. *Pressure swing adsorption* - *PSA*) uz koji se postiže čistoća vodika čak i do 99,9995%. Dolazi do odvajanja vodika i ostalih plinovitih tvari tako da se sve komponente osim vodika vežu za površinu adsorbera i ponovno koriste za stvaranje potrebne topline za ponavljanje procesa.

2.1.1. Troškovi proizvodnje vodika metodom parnog reformiranja

Trošak proizvodnje vodika (cijena/kilogramu) računa se prema izrazu 2-3. Ukupni trošak proizvodnje računa se kao suma kapitalnih troškova, operativnih troškova, cijene sirovine i utrošene energije (Kothari et al., 2006).

$$C_H = C/H \cdot t + My/H + C_F + E \quad (2-3)$$

- gdje su:

$C/H \cdot t$ - kapitalni trošak

My/H - operativni trošak

C_f - cijena sirovina

E - utrošena energija

Troškovi proizvodnje ovom metodom su najniži, te je zato ova metoda najrasprostranjenija. Relativno jeftina sirovina i jednostavna mogućnost transporta sirovine kroz već razgranatu mrežu razlozi su jeftine cijene sivog vodika. Općenito je cijena vodika uglavnom određena cijenom sirovine, te ovisno o dostupnosti i cijena vodika proizvedenog istom metodom razlikuje se ovisno o lokaciji. Tako primjerice, cijena proizvodnje parnim

reformiranjem u zemljama s obiljem prirodnog plina kao što su Rusija ili pak Sjeverna Amerika je uglavnom oko 1 USD/kg H₂, dok su troškovi proizvodnje u Europi dosežu 2 USD/kg H₂ (KPMG, 2020).

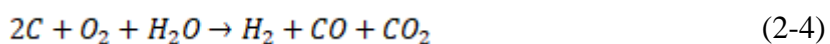
Tablica 2-1. Cijena vodika proizvedenog metodom parnog reformiranja metana (Kayfeci et al., 2019)

| Proces | Izvor energije | Sirovina | Kapitalni trošak (M\$) | Cijena vodika (\$/kg) | Efikasnost sustava (%) |
|---------------------------|---------------------------|---------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Parno reformiranje metana | Standardna fosilna goriva | Prirodni plin | 180,7 | 2,08 | 70-85 |

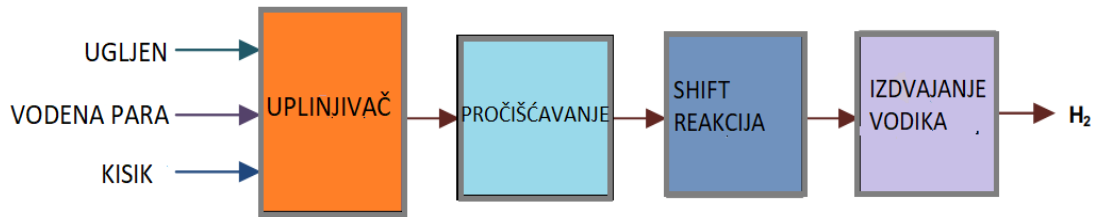
Metoda parnog reformiranja podrazumijeva emitiranje proizvedenog ugljikovog dioksida u atmosferu, a kasnije će biti prikazano kako se mijenja cijena ako skladišti ugljikov dioksid što je i jedina razlika između plavog i sivog vodika.

2.2. METODA UPLINJAVANJA UGLJENA (engl. *Coal Gasification - CG*)

Vodik proizveden iz ugljena može se nazvati i smeđim vodikom te se tako i naziva primjerice u Kini, no Europa i Sjeverna Amerika ovu metodu najčešće svrstavaju pod sivi vodik. Navedena metoda je najstarije poznat način pridobivanja vodika te čini 18% ukupne proizvodnje vodika (Kayfeci et al., 2019). Ugljen se zagrijava na oko 900 °C, prelazi u plin te se miješanjem sa kisikom i parom dobije sintetski plin (izraz 2-4).



Kako bi se proizvelo još više vodika, dodatno se iskorištava ugljikov monoksid procesom opisanim u izrazu 2-2. Zbog potrebe iznimno visokih temperatura, te velike količine emitiranog ugljikovog dioksida ova metoda se nastoji što prije izbaciti iz uporabe.



Slika 2-2. Prikaz klasičnog uplinjavanja ugljena (Kayfeci et al., 2019)

2.2.1. Troškovi proizvodnje vodika metodom uplinjavanja ugljena

Ugljen je isplativ samo tamo gdje je prirodni plin nedostupan ili je pak preskup (Velazquez Abad et al., 2017). Cijena proizvodnje uvelike ovisi o veličini postrojenja, njegovoj lokaciji te cilju krajnjeg procesa. Primjerice, postrojenja u Kini mogu biti i do 40% jeftinija od onih u Europi ili Sjevernoj Americi. Također, proizvedena mješavina plina može se dodatno obraditi u sintetski prirodan plin (engl. *Sintetic Natural Gas - SNG*) prikladan za transport plinovodima i to bi povisilo ukupne troškove čak do 40% (IEA ETSAP, 2010). Iako je cijena vodika nastalog uplinjavanjem ugljena niža u odnosu na prethodnu metodu kapitalni troškovi su znatno veći.

Tablica 2-2. Cijena vodika proizvedenog metodom uplinjavanja ugljena (Kayfeci et al., 2019)

| Proces | Izvor energije | Sirovina | Kapitalni trošak (M\$) | Cijena vodika (\$/kg) | Efikasnost sustava (%) |
|----------------------|---------------------------|----------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Uplinjavanje ugljena | Standardna fosilna goriva | Ugljen | 435,9 | 1,34 | 50-80 |

U tablici 2-3. prikazano je Gray i Tomlinsonovo istraživanje koje prikazuje 4 slučaja primjene različitih tehnologija uplinjavanja ugljena te pripadajuće maloprodajne cijene vodika.

Tablica 2-3. Gray Tomlinsova usporedba tehnologija proizvodnje vodika iz ugljena
(Bartels et al., 2010)

| | Slučaj 1 | Slučaj 2 | Slučaj 3 | Slučaj 4 |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Uplinjivač | Texaco | E-gas | E-gas | E-gas |
| Metoda odvajanja | PSA | Membrana | PSA | Membrana |
| Proizveden vodik kg/dan | 281100 | 373300 | 352000 | 354400 |
| Utrošeni ugljen tona/dan | 3000 | 3000 | 6000 | 6000 |
| Kapitalni trošak M\$ | 562 | 573 | 1399 | 1375 |
| Maloprodajna cijena vodika \$/kg | 1,25 | 0,9 | 0,43 | 0,37 |

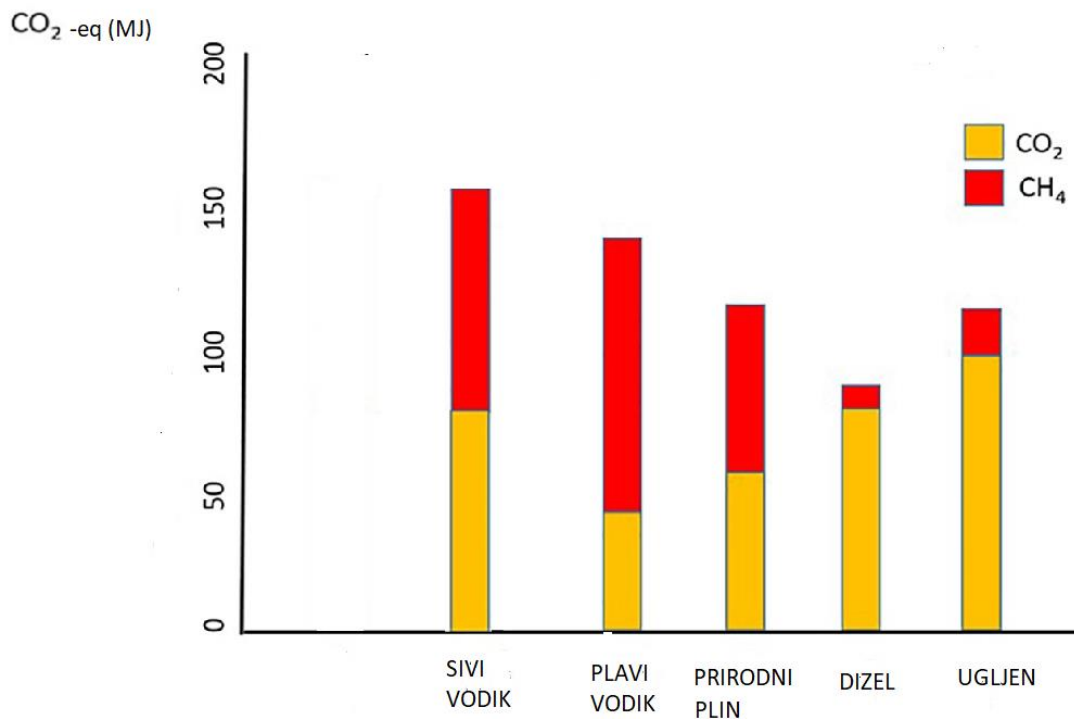
Slučaj 1 odnosi se na konvencionalniju tehnologiju u odnosu na ostale slučajeve, no ugljikov dioksid stvoren u procesu se skladišti te je zato cijena veća u odnosu na ostale slučajeve. Slučajevi 3 i 4 daju najmanje cijene vodika, no kapitalni troškovi su najveći zato što koriste suvremeniju tehnologiju.

3. PLAVI VODIK

Navedena vrsta vodika proizvodi se identičnim metodama kao i sivi vodik, no razlika je što se koristi skladištenje proizvedenog ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture and Storage - CCS*). Plavi vodik naizgled se čini povoljnim za europski zeleni plan, no za skladištenje CO₂ je potrebno mnogo energije i najčešće se odvija izgaranjem fosilnih goriva te se emitira dodatna količina stakleničkih plinova. Proizvodnja plavog vodika uglavnom je usmjerena na metodu parnog reformiranja.

3.1. EMISIJE PLAVOG VODIKA

Metan ima veliki utjecaj na globalno zatopljenje, čak 25% gledajući kroz prošla desetljeća. Emisije metana trebale bi se reducirati za nekih 45% do 2030. godine (Howarth i Jacobson, 2021). Na slici 3-1. prikazano je kako su emisije stakleničkih plinova kod plavog vodika čak za 20% posto veće nego kod izgaranja prirodnog plina i ugljena i čak 60 % no kod izgaranja dizela. Emisije ugljikovog dioksida samo su za 12% manje nego kod sivog vodika. Trenutno na komercijalnoj proizvodnji plavog vodika rade samo Shell i Air Products te njihova uspješnost skladištenja ugljikovog dioksida varira između 53-90% (Howarth i Jacobson, 2021).



Slika 3-1. Emisije stakleničkih plinova izražene kao ekvivalent CO₂ (Howarth i Jacobson, 2021)

Tablica 3-1. Usporedba utrošenog metana te emisija stakleničkih plinova kod parnog reformiranja metana za sivi i plavi vodik (Howarth i Jacobson, 2021)

| | SIVI VODIK | PLAVI VODIK |
|--|------------|-------------|
| PARNO REFORMIRANJE CH ₄ | | |
| UTROŠEN CH ₄ (MJ) | 14,0 | 14,0 |
| PROIZVEDEN CO ₂ (MJ) | 38,5 | 38,5 |
| FUGITIVNE EMISIJE CH ₄ (MJ) | 0,49 | 0,49 |
| FUGITIVNE EMISIJE CH ₄ (CO ₂ -eq/MJ) | 42,1 | 42,1 |
| DIREKTNE EMISIJE CO ₂ (MJ) | 38,5 | 5,8 |
| STOPA SKLADIŠTENJA CO ₂ | 0% | 85% |

Stopa fugitivne emisije metana je 3,5%

Ukupne emisije ugljikovog dioksida pri proizvodnji plavog vodika suma su emisija energije potrebne za toplinu i tlak za proces parnog reformiranja, za pogon opreme,

skladištenje ugljikovog dioksida te indirektno emisije pri transportu i proizvodnji prirodnog plina.

Tablica 3-2. Usporedba emisija stakleničkih plinovima pri različitoj uspješnosti skladištenja CO₂ (Howarth i Jacobson, 2021)

| | Ukupni CO ₂ | Ukupni fugektivni CH ₄ | Ukupne emisije |
|------------|------------------------|-----------------------------------|----------------|
| Efikasnost | | | |
| 85% | 51,7 | 86,9 | 139 |
| 90% | 50,2 | 86,9 | 137 |
| 78,8% | 53,5 | 85,7 | 139 |

3.2. TROŠKOVI PROIZVODNJE VODIKA METODOM PARNOG REFORMIRANJA UZ SKLADIŠTENJE CO₂

Skladištenje ugljikovog dioksida znatno povećava troškove proizvodnje vodika, te se kapitalni troškovi mogu se povećati čak i za 50%. Ukupni troškovi skladištenja CO₂ dijele se na troškove skladištenja i troškove transporta.

Tablica 3-3. Troškovi skladištenja CO₂ (Schmelz et al., 2020)

| Vrsta postrojenja | Trošak (2018\$/tona) |
|-------------------|----------------------|
| Ugljen | 47 |
| Prirodni plin | 76 |

Tablica 3-4. Troškovi transporta CO₂ (Schmelz et al., 2020)

| Lokacija | Kapacitet cjevovoda | Maksimalni Trošak (2018\$/tona/250km) | Minimalni Trošak (2018\$/tona/250km) |
|----------|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| kopno | 3 Mt | 7,4 | 4,4 |
| | 30 Mt | 2,3 | 1,3 |
| podmorje | 3 Mt | 15,3 | 7,4 |
| | 30 Mt | 2,5 | 2,0 |

Cijena plavog vodika, kao i sivog, najviše ovisi o cijeni prirodnog plina, tj. 40% cijene proizvodnje ovisi o prirodnom plinu. U zemljama sa većom cijenom prirodnog plina, ukupni troškovi se mogu povećati i za 60%, kapitalni čak i za 25%, a operativni do 15% (KPMG, 2020). Izgrađena plinovodna infrastruktura, te blizina geoloških formacija za skladištenje ugljikovog dioksida uvelike će doprinijeti jeftinijem vodik.

Tablica 3-5. Cijena vodika proizvedenog metodom parnog reformiranja i uplinjavanja ugljena sa skladištenjem ugljika (Kayfeci et al., 2019)

| Proces | Izvor energije | Sirovina | Kapitalni trošak (M\$) | Cijena vodika (\$/kg) |
|----------------------------------|---------------------------|---------------|------------------------|-----------------------|
| Parno reformiranja metana sa CCS | Standardna fosilna goriva | Prirodni plin | 226,4 | 2,27 |
| Uplinjavanje ugljena sa CCS | Standardna fosilna goriva | Ugljen | 545,6 | 1,63 |

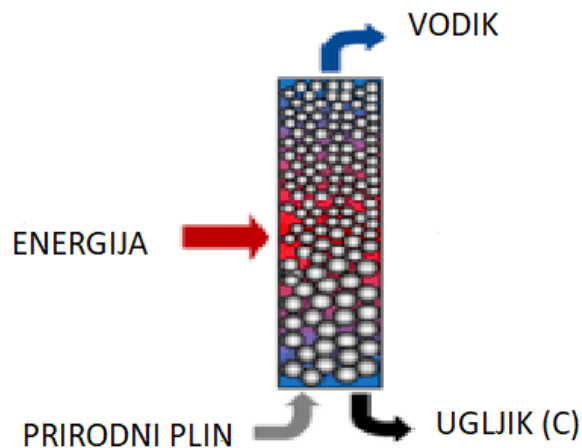
4. TIRKIZNI VODIK

Tzv. tirkizni vodik najmanje je poznata i istražena vrsta vodika. Prema emisiji stakleničkih plinova predstavlja postupni prijelaz iz plavog vodika u zeleni. Za razliku od plavog i sivog vodika ne bazira se na izgaranju fosilnih goriva, već se toplina dobiva iz električne energije. Ovisno o izvoru električne energije potrebne za proces proizvodnje, emisije ugljikovog dioksida su izrazito niske ili gotovo da ih nema. Glavni proces za proizvodnju ovog tipa vodika je piroliza koja se istražuje još od 1960. -ih godina, no zbog tehnoloških zahtijeva tek se odnedavno upotrebljava. Proizvodnja vodika ovom metodom u primjeni je u Sjevernoj Americi, Australiji, Rusiji i u nekim dijelovima Europe.

4.1. PROCES PIROLIZE

Piroliza se odnosi na razdvajanje složenih molekula organskog podrijetla u manje molekule, tj. u vodik i ugljik (izraz 4-1). Proces je endoterman i nepovratan, a odvija se uz pomoć katalizatora (najčešće su lijevani metali), a produkti pirolize su vodik i čvrsti ugljik. Ovisno o kvaliteti proizvedenog ugljika, on se dalje može upotrebljavati kao primjerice u proizvodnji guma za vozila i sl.





Slika 4-1. Prikaz procesa pirolize (BASF, 2021)

Najviše se prakticira metoda pirolize metana iz prirodnog plina. Metan se zagrije na do 2000 °C bez prisustva kisika i zraka i tako se minimalizira proizvodnja stakleničkih plinova, no nemoguće je u potpunosti eliminirati kisik. Smatra se kako je za proizvodnju 1 tone vodika navedenom metodom potrebno gotovo četiri tone metana, te 5,7 MWh topline i time bi se uz vodik proizvelo oko 3 tone ugljika (John, 2021). Energija potrebna za pirolizu može dolaziti od fosilnih goriva ili pak iz obnovljivih izvora. Kada bi energija dolazila iz obnovljivih izvora tirkizni vodik bio bi jednako povoljan za klimu kao zeleni vodik ili čak povoljniji jer je potrebno manje energije za proizvodnju vodika.

Tablica 4-1. Usporedba energije potrebne za proizvodnju tirkiznog i zelenog vodika (FSR, 2021)

| | PROCES | Potrebno energije kWh/ kg H ₂ |
|----------------|-------------|---|
| Tirkizni vodik | Piroliza | 10-20 |
| Zeleni vodik | Elektroliza | 60 |

Kod procesa pirolize glavna sirovina je prirodni plin te su veze između atoma vodika i ugljika slabije i potrebnije je manje energije za razdvajanje molekula, nego kod elektrolize gdje je glavna sirovina voda i veze su jače. Iako je potrebno manje energije, kompanije se više okreću elektrolizi kao primarnoj metodi proizvodnje vodika zbog nulte stope zagađenja. Gledajući cijeli proces, krenuvši s dobavom plina i transportom, piroliza ipak ima veća fugitivna zagađenja od vodika nastalog procesom elektrolize.

Dobivanje vodika procesom pirolize može kao sirovinu koristiti i biometan. Općenito se bioplin naveliko proizvodi na kontroliranim odlagalištima otpada. Dobiva se planiranim slaganjem otpada u slojeve i recirkuliranjem zraka koji nastaje njegovim raspadanjem. Proces je identičan proizvodnji vodika iz prirodnog plina dakle, organski otpad u uvjetima bez kisika (atmosfera dušika) i podtlaku bez ikakvog izgaranja uplini u sintetski plin. Omjer uložene energije i proizvedene je oko 1:4, dakle potrebno je oko 100 jedinica električne energije da bi se proizvelo 400 (Duić i Jakić 2021). Prema predsjedniku udruge za H₂, prof. Jakiću i prof. Duiću (2021), od 25 tona otpada možemo dobiti 2,5 MWh energije, tj od 32 tisuća tona otpada 29 000 vozila i oko 400-tinjak autobusa može 12 mjeseci voziti na vodik. Time bi se riješio i problem infektivnog otpada, no cijeli proces zahtijeva daljnje istraživanje i ulaganje. Proizvodnjom tirkiznog vodika svaka zemlja ima gotovo jednak pristup neograničenoj sirovini pomoću koje može sebe opskrbljivati potrebnom energijom.

5.2. TROŠKOVI PROIZVODNJE VODIKA METODOM PIROLIZE

Troškovi proizvodnje metodom pirolize ovise o mnogo čimbenika. Najbitnija je cijena sirovine, no osim troška prirodnog plina, proizveden vodik ovisi o kvaliteti obavljenog procesa. Kao što je i prethodno navedeno, razdvajanjem metana dobije se vodik i ugljik, a ovisno o konačnoj kvaliteti ugljika mijenjaju se i operativni troškovi. U početku su cijene emisijskih jedinica za ugljik niski (engl. *European Union Emissions Trading System-EU ETS*), te se povećava vrijednost pirolize kao procesa a i njenog konačnog produkta, no kasnije ponavljanjem procesa, povećavaju se cijene emisijskih jedinica i smanjuje se krajnja vrijednost proizvoda. Osim o prethodno navedenom, trošak uvelike ovisi i o izvoru energije, pošto obnovljivi izvori energije još nisu dovoljno kompetitivni, manji je trošak koristiti konvencionalnije izvore.

Kapitalni troškovi nekoliko su puta manji od troškova kod plavog vodika zato što nema potrebe za skladištenjem ugljikovog dioksida. Ako se uspoređuje sa zelenim vodikom, kapitalni troškovi bili bi manji nego kod zelenog vodika, a operativni veći. Najveći dio kapitalnog troška, čak 77% zauzima električni grijač, dok operativni troškovi ove metode ovise o učinku električne energije (Parkinson et al., 2017). Svaka veća potrebna temperatura zagrijavanja zahtijevaju više električne energije, a time se povećava i trošak finalnog proizvoda. Visoko temperaturna piroliza metana može u budućnosti postati ekonomski kompetitivna klasičnoj metodi parnog reformiranja.

Tablica 4-2. Cijena vodika proizvedenog metodom pirolize (Kayfeci et al., 2019)

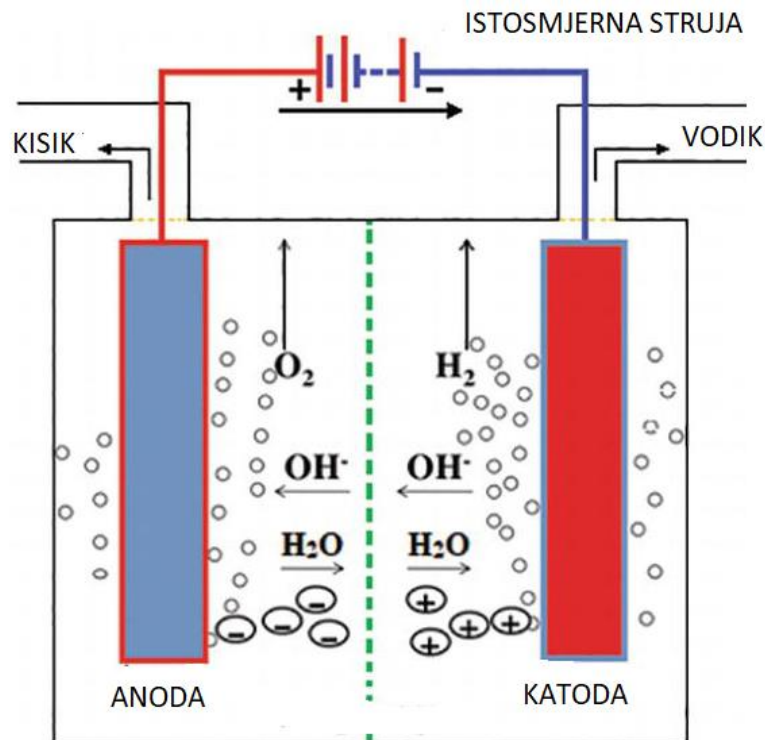
| Proces | Izvor energije | Sirovina | Kapitalni trošak (M\$) | Cijena vodika (\$/kg) |
|--------------------|-----------------|---------------|------------------------|-----------------------|
| Piroliza metana | Generirana para | Prirodni plin | - | 1,59-1,70 |
| Piroliza biometana | Generirana para | Biomasa | 53,4-3,1 | 1,25-2,20 |

5. ZELENI VODIK

Praksa razdvajanja vode na molekule vodika i kisika u uporabi je od 1890.-tih godina. Najveći dio planova vezanih za vodik odnosi se upravo na zeleni vodik. Najčišća je verzija energenta zato što se pri njegovoj proizvodnji ne emitiraju nikakvi staklenički plinovi, a osnovna sirovina za proizvodnju je voda. Uporabom zelenog vodika umjesto fosilnih goriva spriječilo bi se emitiranje 830 miliona tona CO₂ godišnje, a kada bi se prenamijenila postojeća postrojenja za sivi vodik, trebalo bih nam novih 3000 TWh energije iz obnovljivih izvora (Iberdola, 2021). Proces proizvodnje zelenog vodika temelji se na jednostavnom procesu elektrolize pokretanog energijom vjetra, sunca ili vode.

5.1. PROCES ELEKTROLIZE

Za navedeni proces potrebna je voda sa soli ili mineralima (najčešće se dodaje kuhinjska sol), elektrode te izvor energije. Molekule vode razlažu se pod djelovanjem istosmjernje struje dok katoda i anoda privlače ione različitih naboja. Elektrode su najčešće napravljene od platine kako bi se spriječila reakcija kisika sa metalima, a membrana postavljena između njih sprječava daljnje reakcije produkata elektrolize.



Slika 5-1. Prikaz procesa elektrolize (Naimi i Antar, 2018)

Jednadžba elektrolize prikazana je izrazom 5-1 (Holladay et al., 2008).



Na katodi se odvija redukcija i nastaje plinoviti vodik (Holladay et al., 2008.).



Na anodi se odvija oksidacija i nastaje kisik (Holladay et al., 2008).



Prednosti zelenog vodika (Iberdola, 2021):

- Nema emisija stakleničkih plinova
- Jednostavno skladištenje
- Mogućnost transporta sa prirodnim plinom (do 20% mješavina)

- Laka pretvorba u energiju

Negativne strane zelenog vodika (Iberdola, 2021):

- Velik trošak proizvodnje
- Velik utrošak energije pri proizvodnji

Najveći problem kod zelenog vodika je što proces elektrolize zahtijeva mnogo energije a puno manje je dobiveno energije iz procesa. Mora se postići jeftinija električna energija i veća efektivnost cjelokupnog procesa. Kada bi efikasnost sustava bila 100%, od uložениh 9 tona vode, uz potrebnu električnu energiju od 39,4 MWh, procesom elektrolize nastati će 8 tona kisika i 1 tona vodika (Cho, 2021).

Ako je za proizvodnju vodika elektrolizom sunce izvor energije, tada se proces elektrolize odvija pomoću fotonaponskih ćelija koje direktno pretvaraju sunčevo zračenje u struju. Uz sunce, izvor energije može biti voda te vjetar kod kojeg se proces elektrolize ostvaruje rotacijom turbine pokretane vjetrom. Kod vjetroelektrana poteškoće stvara mali kapacitet sustava što rezultira i manjom proizvodnjom, no, iz vjetra se mogu dobiti znatne količine energije.

5.2. TROŠKOVI PROIZVODNJE ZELENOG VODIKA

Troškovi proizvodnje vodika elektrolizom najviše ovise o cijeni elektrolizera te o cijeni energije potrebne za proces. Ako su kapitalni troškovi određeni cijenom elektrolizera, operativni se uglavnom odnose na energiju potrebnu za pokretanje elektrolizera te također uvelike utječu na krajnju cijenu proizvoda. Osim energije i elektrolizera, na cijenu zelenog vodika utječe i efikasnost sustava i radni vijek, a on se odnosi na vrijeme do kada sustav ne treba mijenjati.

U tablicama 5-1. i 5-2. prikazana su dva primjera koja se odnose na uporabe različite tehnologije pri proizvodnji zelenog vodika. U navedenim primjerima korišteni su različiti elektrolizeri i prikazani njihovi osnovni parametri te njihov utjecaj na kapitalne i operativne troškove proizvedenog vodika.

Tablica 5-1. Prikaz kapitalnih troškova za dvije različite tehnologije elektrolize
(Chrometzka et al., 2020)

| | Cijena elektrolizera | Stopa proizvodnje vodika (kg/h) | Radni vijek (h) | Proizveden vodik za vrijeme radnog vijeka (kg) | CAPEX (€/kg) |
|---------|----------------------|---------------------------------|-----------------|--|--------------|
| Model 1 | 9000 | 0,045 | 30000 | 1348 | 6,70 |
| Model 2 | 2500 | 0,045 | 40000 | 1798 | 1,40 |

Tablica 5-2. Prikaz operativnih troškova za dvije različite tehnologije elektrolize
(Chrometzka et al., 2020)

| | Potrošnja el.energije (za vrijeme radnog vijeka) | Cijena el.energije (EUR/kWh) | Potrošnja vode (za vrijeme radnog vijeka) | Cijena vode (EUR/L) | Čišćenje vode (EUR/L) | OPEX (€/kg) |
|---------|--|------------------------------|---|---------------------|-----------------------|-------------|
| Model 1 | 66000 | 0,05 | 12000 | 0,0015 | 0,0183 | 2,8 |
| Model 2 | 88000 | 0,05 | 16000 | 0,0015 | 0,0183 | 2,75 |

Kako je i prethodno navedeno, troškovi proizvodnje razlikuju se ovisno o tome radi li se o suncu ili vjetru kao izvoru energije. Kod vjetroelektrani brzina vjetra i lokacija određuju sposobnost generiranja energije . U tablici 5-3. dana su dva sustava za proizvodnju vodika pomoću vjetra i elektolize, a razlikuju se po položaju te brzinama vjetra. Navedene lokacije odnose se na savezne države Amerike, točnije na Pensilvaniju i Minesotu . U navedenoj tablici pretpostavljena je cijena elektrolizera od 300 \$ i razdoblje do 2030. godine.

Tablica 5-3. Primjeri različite cijene vodika ovisno o ključnim faktorima rada vjetroelektrana (Bartels et al., 2010)

| | Brzina vjetra (m/s) | Lokacija | Prepostavljena cijena vodika (\$/kg) |
|-----------|---------------------|----------------|--------------------------------------|
| Primjer 1 | 7,41 | WCROC | 2,70 |
| Primjer 2 | 8,5 | Gobbler's Knot | 2,27 |

U tablici 5-3. vidljivo je kako veće brzine vjetra doprinose manjem trošku proizvodnje vodika zato što se za ista ulaganja u sustav proizvodnje, tj. kapitalne troškove proizvede više električne energije potrebne za proces.

Tablica 5-4. Konačni troškovi proizvodnje vodika za vjetroelektrane i solarne elektrane (Bartels et al., 2010)

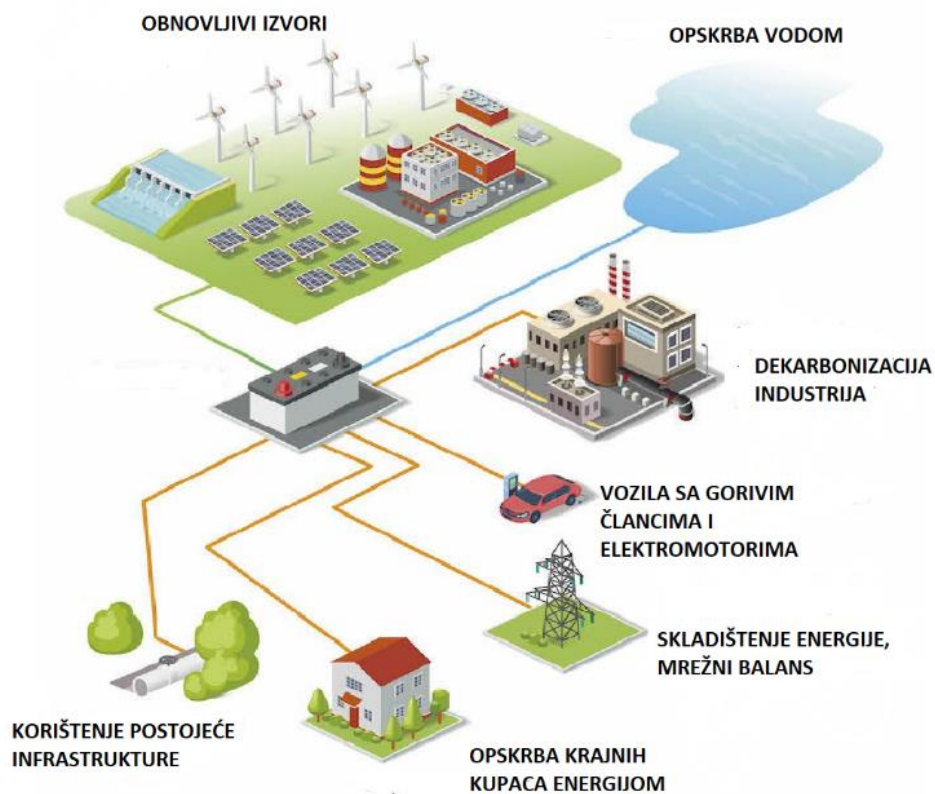
| Proces | Izvor energije | Sirovina | Kapitalni trošak (M\$) | Cijena vodika (\$/kg) |
|-------------|----------------|----------|------------------------|-----------------------|
| Elektroliza | solar | voda | 12-54,5 | 5,78-23,27 |
| Elektroliza | vjetar | voda | 504,8-499,6 | 5,89-6,03 |

Trenutno su troškovi proizvodnje elektrolizom preveliki, te ova vrsta vodika nije konkurentna drugim vrstama niti fosilnom gorivu. Proširenje proizvodnje i potrošnje zelenog vodika ohrabruje činjenica konstantnog pada cijene obnovljive energije. Prema Armstrong (2021) u razdoblju od 2010. do 2019. godine cijena solarne energije pala je sa 370 \$/MWh na 68 \$/MWh, energija iz vjetroelektrana sa 86 \$/MWh na 53 \$/MWh, dok je cijena ugljena pala samo za 2 dolara, točnije sa 111 \$/MWh na 109 \$/MWh.

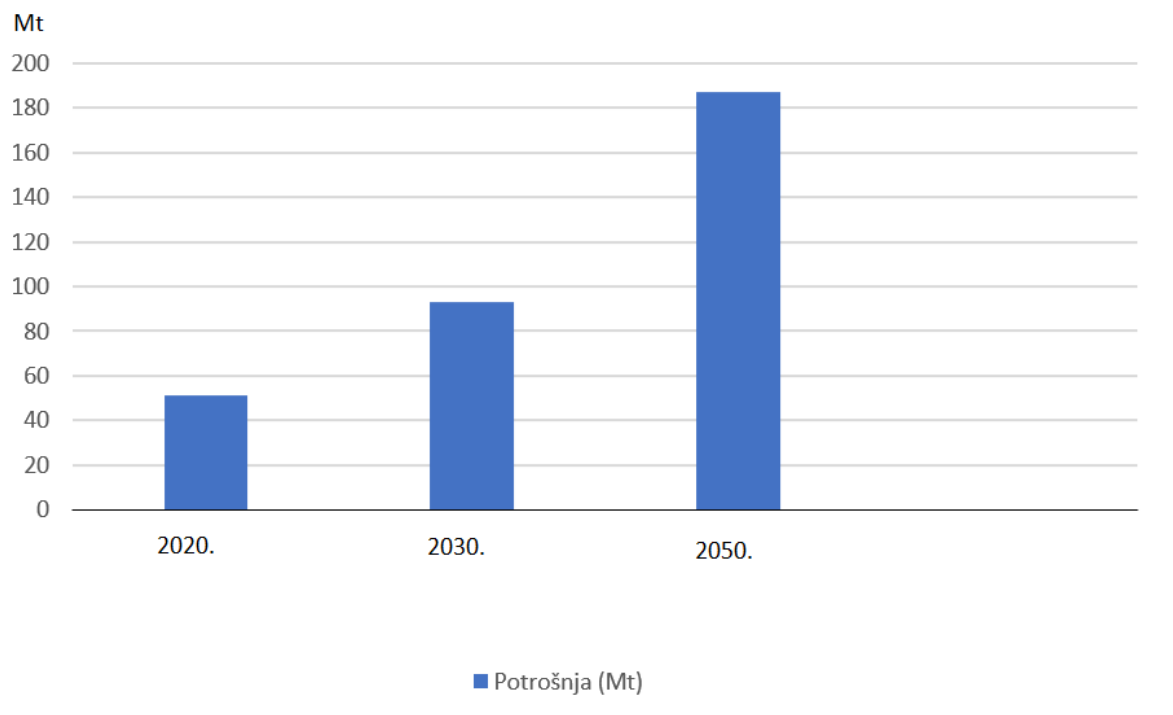
6. VODIK KAO ENERAGENT BUDUĆNOSTI UNUTAR EUROPSKOG ZELENOG PLANA

Sve je veća potreba za nosiocem energije od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje, posebice kod proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, te medijem koji će osigurati spremanje energije zbog sve većih opterećenja potrošnje. Smatra se kako će se potražnja za energijom na svjetskoj razini povisiti i do 30% (Iberdola, 2021). Prethodno navedene potrebe osnovna su svojstva najjednostavnijeg elementa, vodika.

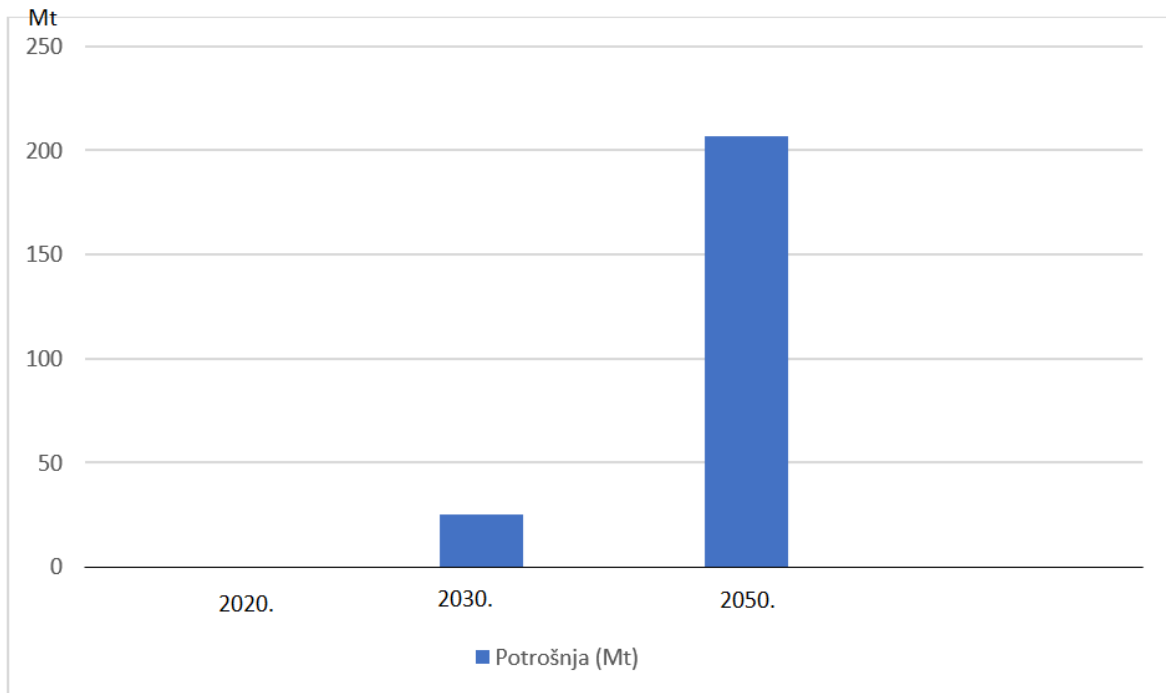
Obnovljivi izvori, prema Europskom zelenom planu (engl. *European Green Deal*) postupno će zamijeniti fosilna goriva. Kako je rad vjetroelektrana, solara i hidroelektrana ovisan o vremenskim prilikama, plan je da se pomoću njih proizvede vodik, koji će po potrebi služiti kao uskladištena energija i proizvoditi energiju kada vremenske prilike neće biti povoljne za proizvodnju energije. Sukladno prethodno navedenom, za buduće projekte razmatra se isključivo zeleni vodik. Zahvaljujući dostupnosti vode potrebne za elektrolizu plan je proizvodnja energenta na mjestu potrošnje. Osim kao spremnik energije, vodik bi se trebao koristiti i u industrijama gdje baterije neće biti efikasne i ekonomične, kao što su teške industrije i transport na velike udaljenosti.



Slika 6-1. Prikaz rješenja uporabom zelenog vodika kroz cijeli vrijednosni lanac (ENGIE, 2020)



Slika 6-2. Prikaz predviđenog rasta potrošnje vodika i goriva na bazi vodika u industrijskom sektoru (IEA, 2021)



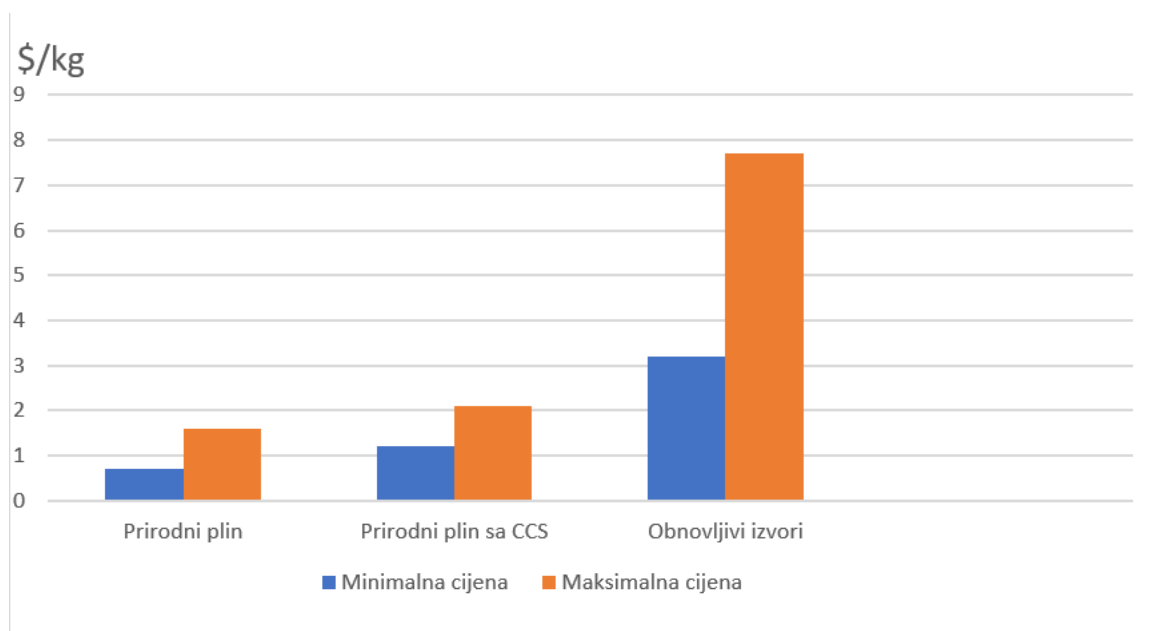
Slika 6-3. Prikaz predviđenog rasta potrošnje vodika i goriva na bazi vodika u transportnom sektoru (IEA, 2021)

Realizirani projekti, ali i oni u procesu realizacije, potvrđuju efikasnost tehnologije sa gorivim člancima, posebice u prometu. Čelije se mogu opisati kao vrsta baterija, one proizvode toplinu i električnu energiju. U ćelijama se odvija proces obrnute elektrolize te je krajnji produkt procesa pitka voda. Ako se uspoređuju ukupne emisije, sama proizvodnja baterija emitira stakleničke plinove, dok je vodik u potpunosti čist energent. Kada se koristi u vozilima, kombinacijom spremnika na vodik sa elektromotorom, eliminirano je mnogo problema kao što su buka, doseg vozila i utjecaj na atmosferu te se upravo ta tehnologija smatra najoptimalnijom za budućnost. Osim kod preookeanskih brodova, automobila i aviona vodik je već prisutan i u prometu na tračnicama.

Gotovo svaka država Europske unije razvija Strategiju za vodik, pa tako i Hrvatska. Zanimljivo je napomenuti kako Hrvatska ima kompaniju pod imenom Do King, koja proizvodi vozila na vodikove gorive članke, a djeluje u Africi. Prema prof. Ivici Jakiću i prof. Duiću (2021.) postoje planirani projekti koji se odnose na vukovarsko i zadarsko područje, a radi se o brodovima na vodik.

Još jedna od prednosti uporabe vodika je ta što se može koristiti postojeća infrastruktura fosilnih goriva za njegov transport. Ako u postojeću infrastrukturu pustimo mješavinu prirodnog plina i vodika (do 20%) potrošači gotovo neće primijetiti razliku (Domazet, 2021).

Razvoj vodikovog tržišta na uzlaznoj je putanji nakon dulje stagnacije. Poteškoće zbog kojih još nije dovoljno konkurentan je preveliki trošak pri proizvodnji, posebice zbog skupe energije te snažna i stabilna industrija fosilnih goriva.

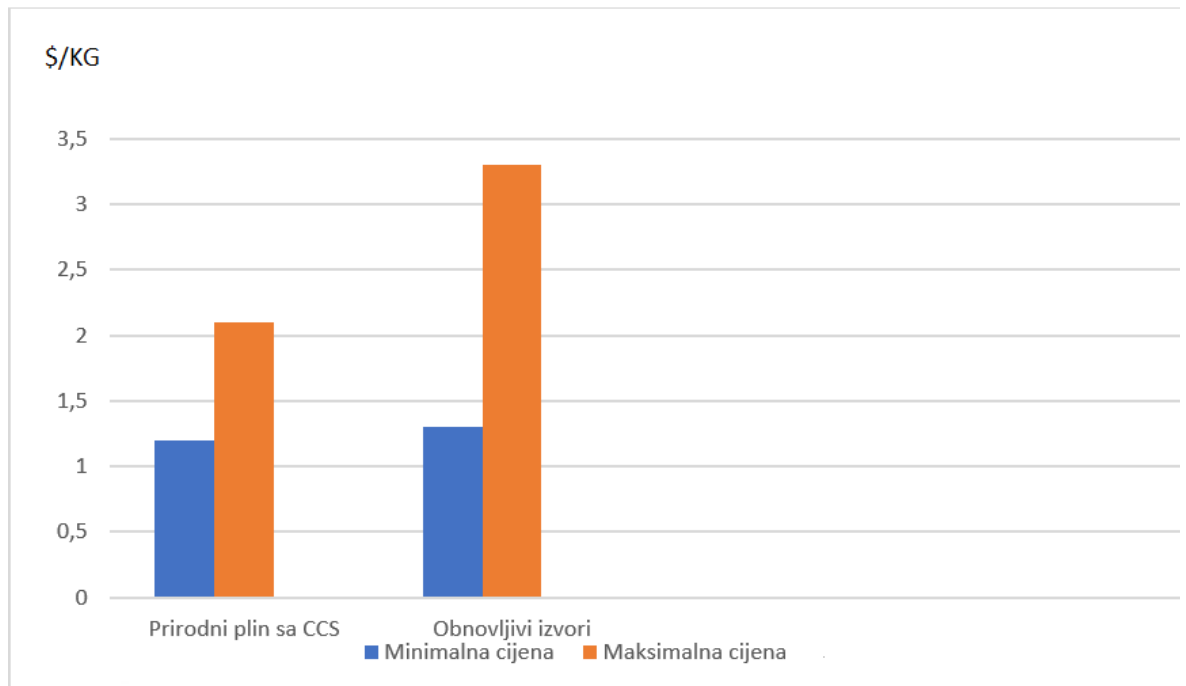


Slika 6-4. Prikaz cijene koštanja proizvodnje vodika za različite izvore za 2019. godinu (IEA, 2020)

Smatra se kako je 1 kg vodika energetski jednak 3,8l benzina, te da bi vodik bio konkurentan fosilnim gorivima kada bi cijena za kilogram bila dva puta veća od cijene fosilnih goriva (The Economist, 2021).

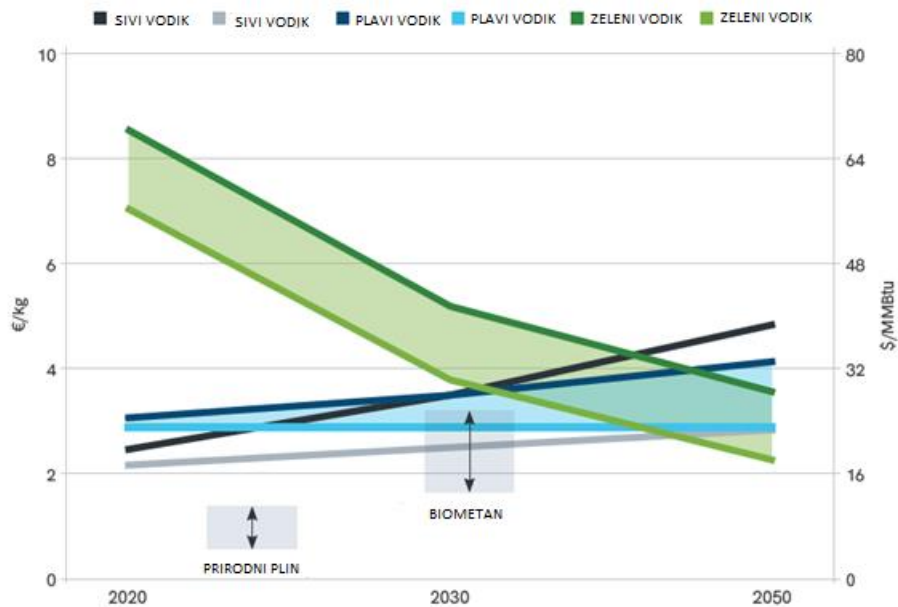
Zeleni vodik bi bio kompetitivan energent tek onda kada bi se dovoljno proširila zelena energetska mreža tj. kada bi postojao dovoljan višak te energije na tržištu. Kada bi se kombinirali elektricitet i vodik, tj. kada bi se energiju iz obnovljivih izvora raspodijelilo na potrebe transporta, određene industrije i grijanje, ostatak bi služio za proizvodnju vodika (Duić i Jakić 2021). U prethodno navedenom slučaju zeleni vodik bi bio jeftiniji nego trenutno najrasprostranjeniji - sivi vodik. Ako dođe do planirane dominacije obnovljivih

izvora u odnosu na ostale energente, zeleni vodik će postići cijene koje će biti dovoljno kompetitivne na tržištu. Na slici 6-5. je vidljivo kako bi se to odnosilo na cijenu proizvodnje između 1-2 USD/kg.



Slika 6-5. Prikaz cijene koštanja proizvodnje vodika za različite izvore za 2060. godinu (IEA, 2020)

Cijena troška uvjetovana je, kao što je prethodno navedeno, cijenom elektrolizera koja trenutno iznosi oko 800 \$/kW. Da se postigne cijena proizvodnje do 2050. godine od maksimalno 2 \$/kg, cijena elektrolizera trebala bi pasti na minimalno 300 \$/kW i cijena energije iz obnovljivih izvora pojeftiniti sa 65 \$/MWh na 20 \$/MWh (Bioenergy International, 2020).



Slika 6-6. Usporedba cijene vodika i fosilnih goriva (IGU, 2021)

Na slici 6-6. prikazane su procijenjene cijene vodika u odnosu na fosilne plinove za razdoblje do 2050. godine. Ovisno o promjenama na tržištu variraju cijene za isti plin te se kreću unutar granica za svaki pojedini tip plina. Kao što je i navedeno u prethodnom poglavlju i na slici je vidljivo kako je cijena zelenog vodika trenutno znatno veća u odnosu na ostale plinove prikazane na slici. Uzevši u obzir cilj smanjenja emisija stakleničkih plinova gotovo je sigurno da će cijena zelenog vodika znatno pasti. Predviđena cijena može se postići smanjenjem cijene elektrolizera, produljenjem radnog vijeka elektrolizera te povećanjem efikasnosti sustava. Cijena sivog vodika svakako će u budućnosti rasti zbog porasta cijene emisijskih jedinica na stakleničke plinove kojih se emitira mnogo kod proizvodnje sivog vodika. Zbog prethodno navedenog, pretpostavlja se kako će plavi vodik postati kompetentniji u odnosu na vodik proizveden reformiranjem metana bez skladištenja ugljikovog dioksida.

7. ZAKLJUČAK

Uspoređujući sve prethodno navedene troškove proizvodnje najviše korištena metoda, metoda parnog reformiranja zasigurno je jedna od najekonomičnijih metoda. Uz metodu parnog reformiranja kao najisplativiju, prati je metoda uplinjavanja ugljena sa gotovo dvostruko većim kapitalnim troškovima, ali i znatno jeftinije cijene sirovine. Osim sivog vodika, financijski prihvatljive su i metode tirkiznog vodika kao što je piroliza biomase. Iako kapitalni trošak ove metode podosta varira, sirovina je dostupna i gotovo besplatna i zbog toga je krajnja cijena vodika prihvatljiva.

Najveći troškovi proizvodnje su kod zelenog vodika, tj. sa solarnim elektranama i vjetroelektranama kao izvorima energije. Kao što je navedeno u 6. poglavlju, iako je sirovina jeftina, mnogo zelene energije potrebne za proces i skupi elektrolizeri glavni su razlozi prevelike cijene. Za budućnost zelenog vodika, najvažnije je da se obnovljiva energija probije na tržište, tj. njena uporaba globalizira što će automatski inicirati smanjenje cijene elektrolizera.

8. LITERATURA

1. BARTELS, J., PATE, M., OLSON N., 2010. An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources.
 2. HOLLADAY, J.D., KING, D.L., WANG Y., HU, J., 2009. An overview of hydrogen production technologies.
 3. HOWARTH, R., JACOBSON, M., 2021. How green is blue hydrogen?
 4. JIMENEZ-CALVO, P., 2019. Synthesis, characterization, and performance of g-C₃N₄ based materials decorated with Au nanoparticles for (photo) catalytic applications.
 5. KAYFEÇI, M., KEÇEBAŞ, A., BAYAT, M., 2019. *Solar Hydrogen production, Chapter 3 Hydrogen production.*
 6. KOTHARI, R., BUDDHI, D., SAWHNEY R.L., 2006. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods.
 7. NAIMI, Y., ANTAR A., 2018. *Advances in Hydrogen Generation Technologies.*
 8. PARKINSON, B., MATTHEWS, J., MCCONNAUGHTY T. B., UPHAM, D. C., MCFARLAND, E.W., 2017. Techno-Economic Analysis of Methane Pyrolysis in Molten Metals: Decarbonizing Natural Gas.
 9. SCHMELZ, W., HOCHMAN, G., MILLER K., 2020. Total cost of carbon capture and storage implemented at a regional scale: northeastern and midwestern United States.
 10. VELAZQUEZ ABAD, A., DODDS, P.E., 2017. Encyclopedia of Sustainable Technologies, Production of Hydrogen.
- web izvori:
11. ARMSTRONG, M., 2021. The price of solar power has fallen by over 80% since 2010. Here's why. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/11/renewable-energy-cost-fallen/> (8.1.2022)
 12. BASF, 2021. Methane Pyrolysis – a potential new process for hydrogen production without CO₂ emission.

URL: <https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2021-01/16%20OK%20-%20ARPA-E%20Meeting%20Bode%20Flick%20Methane%20Pyrolysis%20web.pdf> (4.1.2022.)

13. BIOENERGY INTERNATIONAL, 2020. Green hydrogen could become a cost-competitive climate solution. URL: <https://bioenergyinternational.com/opinion-commentary/green-hydrogen-could-become-a-cost-competitive-climate-solution-irena> (7.1.2022.)

14. CHO, R., 2021. Why we need green hydrogen. Columbia Climate School. URL: <https://news.climate.columbia.edu/2021/01/07/need-green-hydrogen/> (6.1.2022.)

15. CHROMETZKA, T., JACKSON, T., QUINN, A., POTISAT, T., 2020. H2 View Exclusive- Calculating the Cost of Green Hydrogen . URL: <https://www.enapter.com/newsroom/h2-view-exclusive-calculating-the-cost-of-green-hydrogen> (8.1.2022.)

16. DOMAZET, N., 2021. Sve smo bliži smjesi plina i vodika u distribuciji plina. URL: <http://www.energetika-net.com/vijesti/plin/sve-smo-blizi-smjesi-plina-i-vodika-u-distribuciji-plina-32253> (17.12.2021.)

17. DUIĆ, N., JAKIĆ, I., 2021. Vodik kao gorivo budućnosti. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=xYIZQRcezp4&t=377s> (17.12.2021.)

18. EUROPEAN PARLAMENTARY RESEARCH SERVICE, 2021. EU hydrogen policy: Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy. URL: <https://epthinktank.eu/2021/02/19/hydrogen-as-an-energy-carrier-for-a-climate-neutral-economy/> (14.12.2021.)

19. ENGIE, 2020. Hydrogen – speeding up the transition towards carbon neutrality. URL: <https://www.engie.com/en/activities/renewable-energies/green-hydrogen> (14.12.2021.)

20. FLORENCE SCHOOL OF REGULATION- FSR, 2021. Between Green and Blue: a debate on Turquoise Hydrogen. URL: <https://fsr.eui.eu/between-green-and-blue-a-debate-on-turquoise-hydrogen/> (4.1.2022.)

21. THE ECONOMIST, 2021. Hydrogen: Fuel of future? URL: <https://www.economist.com/films/2021/08/25/hydrogen-the-fuel-of-the-future> (14.12.2021.)

22. HYDROGEN COUNCIL, 2017. How hydrogen empowers the energy transition. URL: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf> (15.12.2021.)
23. IBERDOLA, 2021. Green hydrogen: an alternative that reduces emissions and cares for our planet. URL: <https://www.iberdrola.com/sustainability/green-hydrogen> (7.1.2022.)
24. IEA ETSAP, 2010. Syngas Production from Coal, URL: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/kallman1/docs/estap.pdf> (7.1.2022.)
25. IEA, 2020. Global average levelised cost of hydrogen production by energy source and technology, 2019 and 2050. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-levelised-cost-of-hydrogen-production-by-energy-source-and-technology-2019-and-2050> (15.12.2021.)
26. IEA, 2021. Global Hydrogen Review. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf> (14.12.2021.)
27. INTERNATIONAL GAS UNION - IGU, 2021. Global Renewable and Low-Carbon Gas Report. URL: <https://www.igu.org/resources/global-renewable-low-carbon-gas-report/> (9.1.2022.)
28. JOHN, J., 2021. C-Zero Raises \$11.5M to Scale Up ‘Turquoise Hydrogen’ Technology. URL: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/c-zero-raises-11.5m-to-scale-up-turquoise-hydrogen-technology> (4.1.2022.)
29. KPMG, 2020. The hydrogen trajectory. URL: <https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2020/11/the-hydrogen-trajectory.html> (3.1.2022.)
30. SCHIERENBECH, A., 2020. Hydrogen: Jules Verne's vision brought to life. URL: <https://debate.energy/en/a/121-andreas-schierenbeck-hydrogen-jules-vernes-vision-brought-to-life/> (17.12.2021.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad pod naslovom „Analiza troškova proizvodnje vodika iz različitih izvora“ izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

Valentina Badrov

Valentina Badrov



KLASA: 602-04/21-01/281
URBROJ: 251-70-12-21-2
U Zagrebu, 15.2.2022.

Valentina Badrov, studentica

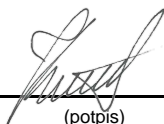
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/281, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 14.12.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

ANALIZA TROŠKOVA PROIZVODNJE VODIKA IZ RAZLIČITIH IZVORA

Za mentoricu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof.dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

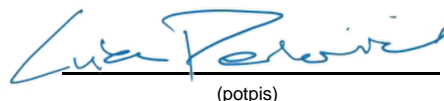
Mentorica:


(potpis)

Prof.dr.sc. Daria Karasalihović
Sedlar

(titula, ime i prezime)

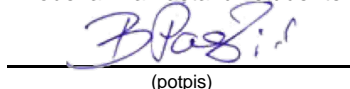
Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)