

# Optimiranje strukture energetskeg sustava za proizvodnju sintetskog plina korištenjem programa EnergyPLAN

---

Njirić, Marin

Master's thesis / Diplomski 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:717248>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**OPTIMIRANJE STRUKTURE ENERGETSKOG SUSTAVA ZA  
PROIZVODNJU SINTETSKOG PLINA KORIŠTENJEM  
PROGRAMA ENERGYPLAN**

Diplomski rad

Marin Njirić

N379

Zagreb, 2022.

OPTIMIRANJE STRUKTURE ENERGETSKOG SUSTAVA ZA PROIZVODNJU  
SINTETSKOG PLINA KORIŠTENJEM PROGRAMA ENERGYPLAN

Marin Njirić

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

Sažetak

Dekarbonizacija energetske sustava i uvođenje obnovljivih izvora energije nužni su za izbjegavanje posljedica klimatskih promjena i smanjenje emisija ugljikovog dioksida. Buduće energetske sustave sastavljene od većinom obnovljivih izvora energije, biti će potrebno optimizirati. U radu je prikazano moguće skladištenje viškova električne energije koristeći tehnologiju *Power-to-Gas*. Korištena su dva softvera, EnergyPLAN i Python za izradu scenarija u kojima se mijenjaju određeni parametri sustava. U njima su implementirane tehnologije za optimiziranje sustava koje uključuju tehnologiju elektrolize i metanacije. Na taj su se način viškovi električne energije skladištili u obliku kemijske energije vodika i metana. U ovom radu prikazano je moguće djelovanje za postizanje većeg udjela OIE u elektroenergetskim sustavima te optimiziranje troškova uz smanjenje emisija ugljikovog dioksida, smanjenje uvoza električne energije i plina.

Ključne riječi: EnergyPLAN, P2G, CO<sub>2</sub>, optimizacija, Python

Diplomski rad sadrži: 58 stranica, 8 tablica, 30 slika i 32 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf

Ocjenjivači: Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf-a

Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf-a

Dr.sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNf-a

Datum obrane: 16. prosinca 2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF THE ENERGY SYSTEM FOR THE  
PRODUCTION OF SYNTHETIC GAS USING THE ENERGYPLAN PROGRAM

Marin Njirić

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Decarbonization of the energy system and the introduction of renewable energy sources are necessary to avoid the consequences of climate change and to reduce carbon dioxide emissions. It will be necessary to optimize future energy systems composed of mostly renewable energy sources. This paper shows the possible storage of excess electricity using Power-to-Gas technology. Two software products, EnergyPLAN and Python, were used to create scenarios in which certain system parameters are changed. They have implemented technologies to optimize the system, including electrolysis and methanation technology. In this way, excess electricity was stored in the form of chemical energy of hydrogen and methane. This paper presents the possible action to achieve a higher share of RES in power systems and optimization of costs while reducing carbon dioxide emissions, reducing electricity and gas imports.

Keywords: EnergyPLAN, P2G, CO<sub>2</sub>, optimization, Python

Thesis contains: 58 pages, 8 tables, 30 figures and 32 references.

Original in: Croatian

Archived in: The library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Luka Perković, PhD

Reviewers: Associate Professor Luka Perković, PhD

Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD

Defence date: December 16, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum  
Engineering, University of Zagreb

# SADRŽAJ

|  |            |
|--|------------|
| <b>POPIS SLIKA .....</b>   | <b>I</b>   |
| <b>POPIS TABLICA.....</b>  | <b>III</b> |
| <b>POPIS KRATICA I JEDINICA .....</b>  | <b>IV</b>  |
| <b>1. UVOD.....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1. Formulacija problema .....  | 5          |
| <b>2. TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE .....</b>  | <b>6</b>   |
| 2.1. Obnovljivi vodik .....  | 6          |
| 2.2. Obnovljivi prirodni plin .....  | 7          |
| <b>3. ELEKTROLIZA VODE .....</b>   | <b>9</b>   |
| 3.1. Elektrolizatori .....   | 10         |
| 3.2. Metanacijski proces .....   | 13         |
| <b>4. METODA PRORAČUNA ENERGETSKIH TOKOVA U PROGRAMU<br/>ENERGYPLAN.....</b>         | <b>18</b>  |
| 4.1. <i>EnergyPLAN</i> .....   | 18         |
| 4.2. Opće karakteristike i primjene <i>EnergyPLAN-a</i> .....                        | 18         |
| <b>5. STANJE I PRILIKE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA U REPUBLICI<br/>HRVATSKOJ.....</b> | <b>21</b>  |
| <b>6. METODA.....</b>  | <b>28</b>  |
| 6.1. Satne distribucije.....   | 28         |
| 6.2. Izrada scenarija .....  | 29         |
| 6.2.1. <i>Kartica Demand - Electricity</i> .....                                     | 29         |
| 6.2.2. <i>Kartica Demand - Heating</i> .....   | 29         |
| 6.2.3. <i>Kartica Supply –Heat and Electricity</i> .....                             | 29         |
| 6.2.4. <i>Kartica Supply – Variable Renewable Electricity</i> .....                  | 30         |
| 6.2.5. <i>Kartica Supply – Liquid and Gas Fuels</i> .....                            | 30         |
| 6.2.6. <i>Kartica Balancing and Storage – Liquid and Gas Fuel</i> .....              | 31         |
| 6.2.7. <i>Ekonomski parametri</i> .....  | 31         |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.3. Korištenje <i>Python</i> -a za simulaciju .....              | 33        |
| <b>7. MODEL ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....</b>                   | <b>34</b> |
| 7.1. Analiza rezultata .....                                      | 35        |
| 7.2. Bazni scenarij.....  | 37        |
| 7.3. Scenarij sa 100% uvezenom energijom .....                    | 38        |
| 7.4. Scenarij s najmanjim troškom.....                            | 41        |
| 7.5. Scenarij s najmanjom izmjenom električne energije .....      | 43        |
| 7.6. Scenarij s najmanjom izmjenom plina.....                     | 45        |
| 7.7. Skupna analiza energetskih tokova za odabrane slučajeve..... | 48        |
| 7.8. Skupna analiza troškova za odabrane slučajeve .....          | 50        |
| <b>8. ZAKLJUČAK .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>LITERATURA .....</b>   | <b>55</b> |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1-1. Shema energetskeg sustava s visokim udjelom intermitentnih OIE.....   | 5  |
| Slika 2-1. Procesni lanac Power to go .....  | 6  |
| Slika 2-2. Korištenje obnovljive struje za obnovljivi vodik .....  | 7  |
| Slika 2-3. Korištenje obnovljivog vodika za obnovljivi plin.....   | 7  |
| Slika 3-1. Proces elektrolize .....  | 10 |
| Slika 3-2. PEM elektroliza.....  | 11 |
| Slika 3-3. (a) Tipični PEM elektrolizator, (b) svežanj PEM ćelija, (c) osnovni dijelovi PEM ćelije: 1 - Bipolarna ploča, 2 - anodni kolektor struje, 3 - Sklop membrana/elektroda (MEA), 4 - katodni kolektor struje ..... | 12 |
| Slika 3-4. Odnos stupnja pretvorbe, tlaka i temperature tijekom metanizacije .....   | 14 |
| Slika 3-5. Koncept skladištenja obnovljive energije u plinskom distribucijskom sustavu .   | 15 |
| Slika 3-6. <i>Sankey</i> dijagram tipičnog P2G procesa.....  | 15 |
| Slika 3-7. Prototip postrojenja za globalno recikliranje CO <sub>2</sub> , Sveučilište Tohoku, kasnije pilot postrojenje industrijskih razmjera .....  | 16 |
| Slika 3-8. Postrojenje Audi e-gas, Werlte, Njemačka .....  | 17 |
| Slika 4-1. Izgled glavnog sučelja programa <i>EnergyPLAN</i> .....   | 19 |
| Slika 5-1. Instalirani kapaciteti za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora u Republici Hrvatskoj .....   | 23 |
| Slika 5-2. Potencijal za fotonaponske elektrane u Hrvatskoj .....  | 25 |
| Slika 5-3. Srednja godišnja brzina vjetra u Hrvatskoj .....  | 26 |
| Slika 6-1. Unos podataka za korištene obnovljive izvore energije u <i>EnergyPLAN</i> -u.....   | 30 |
| Slika 6-2. Unos podataka za količinu proizvedenog SNG-a u <i>EnergyPLAN</i> -u.....  | 30 |
| Slika 7-1. Shema hipotetskog slučaja energetskeg sustava s visokim udjelom intermitentnih OIE .....  | 34 |
| Slika 7-2. Trošak pojedinog scenarija i njihove izmjene energije.....  | 36 |
| Slika 7-3. <i>Sankey</i> -ev dijagram za scenarij potpunog uvoza energije .....  | 40 |
| Slika 7-4. <i>Sankey</i> -ev dijagram za scenarij minimalnog troška optimizacije .....   | 42 |
| Slika 7-5. <i>Sankey</i> -ev dijagram za scenarij s minimalnom izmjenom električne energije ...  | 44 |
| Slika 7-6. <i>Sankey</i> -ev dijagram za scenarij s minimalnom izmjenom plina .....  | 46 |
| Slika 7-7. Satna proizvodnja vodika u elektrolizatoru .....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 7-8. Bilanca električne energije u scenarijima .....                  | 48 |
| Slika 7-9. Bilanca toplinske energije u scenarijima .....                   | 48 |
| Slika 7-10. Bilanca plina u scenarijima .....                               | 49 |
| Slika 7-11. Raspodjela godišnjih investicijskih troškova za scenarije ..... | 50 |
| Slika 7-12. Raspodjela svih godišnjih troškova za scenarije .....           | 51 |



## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 5-1. Podaci o proizvodnji i nabavi električne energije .....   | 21 |
| Tablica 5-2. Instalirani kapaciteti za proizvodnju toplinske i električne energije iz obnovljivih izvora energije u Hrvatskoj 2020. godine ..... | 22 |
| Tablica 6-1. Investicijski troškovi i vijek trajanja postrojenja .....   | 32 |
| Tablica 7-1. Ulazni podaci u <i>EnergyPLAN</i> -u .....  | 37 |
| Tablica 7-2. Iznosi parametara za scenarij potpunog uvoza energije .....   | 38 |
| Tablica 7-3. Iznosi parametara potrebni za scenarij najmanjeg troška .....   | 41 |
| Tablica 7-4. Iznosi parametara potrebni za scenarij s najmanjom izmjenom električne energije .....   | 43 |
| Tablica 7-5. Iznosi parametara potrebni za scenarij s najmanjom izmjenom plina .....   | 45 |

## POPIS KRATICA I JEDINICA

.txt – tekstualna datoteka

°C – celzijev stupanj

CCUS – *Carbon Capture, Utilisation and Storage*, hvatanje, korištenje i skladištenje ugljika

CHP – *Combined Heat and Power*, kogeneracijsko postrojenje

CO<sub>2</sub> – ugljikov dioksid

EU – Europska unija

GJ - gigadžul

GW – gigavat

GWh - gigavatsat

H<sub>2</sub> - vodik

IEA – *International Energy Agency*, Međunarodna energetska agencija

MtCO<sub>2</sub>/god – milijuna tona ugljikovog dioksida godišnje

MW – megavat

MWh - megavatsat

OIE – obnovljivi izvori energije

P2G – *Power to Gas*

SNG – sintetski prirodni plin (*Synthetic Natural Gas*)

tCO<sub>2</sub> – tona ugljikovog dioksida

TWh – teravatsat

## 1. UVOD

Trenutno se nalazimo u svjetskoj situaciji tranzicije s fosilnih goriva na alternativne izvore. Cijeli svijet, pogotovo Europa, shvatila je da je potrebno razvijati vlastite tehnologije kako bi bili održivi i klimatski neutralni. U tome pomaže vodik, koji proizveden iz obnovljivih izvora energija, može biti jedna od važnih komponenti buduće dekarbonizacije. Za iskorištavanje viškova, implementacijom *Power-to-Gas* tehnologija može se uravnotežiti intermitentnost vjetra i sunčeve energije. Naravno, razvijanje novih tehnologija korištenje alternativnih izvora velika je novčana investicija. Zato je potrebno poznavati odnosno izračunati troškove novih investicija i odabir najoptimalnije tehnologije za niskougljičnu tranziciju s obzirom na troškove i kapacitete. U tom izračunu okvirno nam pomaže *EnergyPLAN* kao programski simulator i *Python* kao interpreter za analizu.

Kako bi se globalno zagrijavanje ograničilo ispod 1,5 °C, emisije ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) trebale bi se smanjiti za 40% do 60% do 2030. godine i doseći nultu stopu do 2050. godine. Kako bi se postigao ovaj cilj, biti će neophodna instalacija velike količine intermitentnih obnovljivih izvora energije, uglavnom vjetra i sunca. Fosilni ugljik treba ukloniti iz svih energetske sektora uključujući grijanje, hlađenje i transport, dok se u isto vrijeme energetske sustav mora nositi s velikom varijabilnošću proizvodnje. Kemijsko skladištenje električne energije predloženo je kao ključna opcija u suočavanju s tim izazovom. *Power-to-Gas* (u daljnjem tekstu - P2G), proces koji se odnosi na proizvodnju vodika i metana korištenjem električne energije, predložen je kao opcija za skladištenje viškova energije. Sintetski metan i donekle vodik mogu zamijeniti prirodni plin u postojećim plinskim mrežama. Na temu uloge P2G tehnologije u nacionalnim i kontinentalnim energetske sustavima, posljednjih godina objavljen je velik broj studija. Iako je integracija obnovljive energije u urbane energetske sustave opširno proučavana, doprinos P2G sigurnosti opskrbe, emisijama ugljika i ekonomskoj pristupačnosti u urbanim energetske sustavima još nije u potpunosti razmotren. Analiza uloge P2G na razini grada zanimljiva je zbog njegove interakcije s drugim energetske vektorima. P2G proizvodi otpadnu toplinu i ima koristi od ekonomije razmjera. P2G treba CO<sub>2</sub> kao ulaznu sirovinu, koji trenutno u velikim količinama proizvode elektrane i toplane u gradovima kao i industrija. S druge strane, ako se CO<sub>2</sub> izdvaja iz okolnog zraka, centralni toplinski sustav može poslužiti kao pristupačan izvor topline za taj proces. Gradovi su također veliki potrošači električne energije i važno je uzeti u obzir i učinak mrežnih ograničenja na P2G. Šire plinske mreže obično se nalaze u gradovima, što omogućuje smanjenje emisija u

cijelom lokalnom energetsom sustavu distribucijom sintetičkog prirodnog plina (SNG) u plinsku mrežu (Ikäheimo et al, 2022).

Europska unija ima vrlo pozitivan stav za implementaciju vodika u energetske sektor. Europski zeleni plan za EU donesen je 2019. godine te predstavlja novu strategiju rasta EU-a s ciljem neto nultih emisija stakleničkih plinova do 2050. godine. U Zelenom planu se naglašava važnost regulatornog okvira za energetske infrastrukturu i poticanje uvođenja inovativnih tehnologija i infrastrukture, uključujući vodikove mreže. Prioritetna područja uključuju čisti vodik, gorive ćelije i druga alternativna goriva, skladištenje energije te hvatanje, skladištenje i upotrebu ugljika (European Commission, 2019). U srpnju 2020. godine prihvaćena je strategija za vodik za Europsku uniju kojoj je glavni cilj ubrzati razvoj niskougljičnog vodika (zelenog vodika). U strategiji za vodik naglašeno je da je vodik presudan za postizanje ugljične neutralnosti EU-a do 2050. godine. No, budući da vodik ima tek malen udio u energetske miks EU-a, morat će ga se početi rabiti u puno većoj mjeri. S obzirom na činjenicu da se vodik i dalje većinom proizvodi iz fosilnih goriva, trebat će provesti dekarbonizaciju postojeće proizvodnje vodika. Europska strategija za vodik podijeljena je u 3 faze kojom se predviđa postupnu putanju korištenja vodika. Plan EU je instalirati kapacitete za proizvodnju zelenog vodika, elektrolizatore koji će viškove električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energija (vjetar i sunce) pohranjivati u obliku vodika. U 1. fazi, od 2020. do 2024. godine, EU planira instalirati elektrolizatore snage 6 GW, koji će proizvoditi milijun tona vodika iz obnovljivih izvora godišnje. U 2. fazi, od 2025. do 2030. godine, EU treba instalirati elektrolizatore snage najmanje 40 GW, koji će proizvoditi do 10 milijuna tona vodika iz obnovljivih izvora. U 3. fazi, od 2030. do 2050. godine, usavršile bi se tehnologije proizvodnje vodika iz obnovljivih izvora čime bi se trebala široko primjenjivati u svim sektorima u kojima nema alternativa za dekarbonizaciju. Također je planiran i veliki rast proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora pa bi do 2050. godine oko 25% takve energije moglo biti korišteno za proizvodnju zelenog vodika. Kako bi se ostvarili ciljevi do 2030. godine, bit će potrebno uložiti između 24 i 42 milijarde EUR za elektrolizatore, 220 do 340 milijardi EUR za povećanje kapaciteta obnovljivih izvora energije, oko 65 milijardi EUR u sektor transporta, distribuciju i skladištenje vodika te dodatni novac u punionice vodika (Banovac i Pudić, 2021).

U Republici Hrvatskoj 25. ožujka 2022. godine donesena je Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine. Cilj osnivanja strategije za vodik jest izvršenje cilja Europske unije

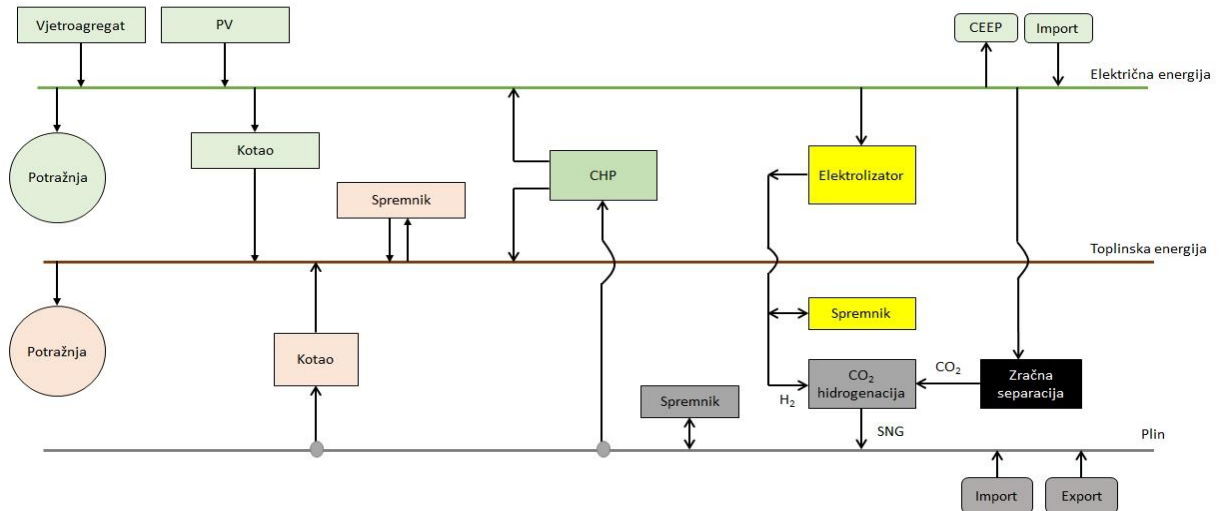
da Europa postane prvi CO<sub>2</sub> neutralni kontinent do 2050. Republika Hrvatska radi na vlastitoj dekarbonizaciji promičući proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora te inzistiranjem na povećanju energetske učinkovitosti u industriji i kućanstvu. Vodik će imati značajnu ulogu u više sektora. Očekuje se primjena zelenog vodika u sektorima grijanja i hlađenja gdje bi trebao zamijeniti fosilna goriva i prirodni plin. Također veliku ulogu bi trebao imati u sektoru prometa gdje bi također trebao zamijeniti fosilna goriva te osigurati sigurni promet i mobilnost kroz cestovni, željeznički, pomorski te zračni promet. U strategiji se navodi da je vodik kompatibilan s trenutnim obrascima potrošnje i omogućava povezivanje električnih i toplinskih sustava na fleksibilan način, ističući komplementarnost i sinergiju između električnih mreža i plinskih sustava. Tehnologije povezane s vodikom razvile su se diljem svijeta nevjerojatnom brzinom u posljednjem desetljeću. Sada postoje dokazi da je u određenim kontekstima proizvodnje i uporabe vodik već održivo i isplativo rješenje za dekarbonizaciju nekih od najtežih sektora u gospodarstvu, poput prometa ili toplinske energije u nizu gospodarskih grana. Potencijal za proizvodnju električne energije u Republici Hrvatskoj prvenstveno proizlazi iz potencijala za proizvodnju obnovljivih izvora energije. Strategija navodi da je u području zračnog i brodskog prometa moguće koristiti sintetska goriva (e-goriva) koja imaju potencijalno manje troškove logistike i veću gustoću energije u odnosu na komprimirani ili ukapljeni vodik te istovremeno koriste poznate tehnologije motora s unutrašnjim izgaranjem. Prema Hrvatskoj strategiji za vodik do 2050. godine (Narodne novine, br. 40/2022) važan preduvjet za njegovu primjenu u prometu je, uz nabavu vozila na vodikove gorive ćelije, istovremeni razvoj potrebne infrastrukture za punjenje i transport vodika. Pretpostavlja se da će do 2030. biti instalirano 70 MW elektrolizatora, a udio vodika u ukupnoj finalnoj potrošnji energije iznositi 0,2 %. Do 2050. godine predviđa se instalacija 2750 MW elektrolizatora, a udio vodika bi u ukupnoj finalnoj potrošnji energije trebao iznositi 11 %. Za ostvarenje navedenih ciljeva, potrebno je uložiti sveukupno 23,8 milijardi HRK. Ako Hrvatska uloži velike napore, u potencijalnom scenariju ubrzanog razvoja vodikove tehnologije, do 2030. se predviđa instalacija 1272,73 MW elektrolizatora, pri čemu bi udio vodika u ukupnoj finalnoj potrošnji energije iznosio 3,75 %. Do 2050. godine predviđa se instalacija 7328,65 MW elektrolizatora uz udio vodika u ukupnoj finalnoj potrošnji energije od 15 %. Za ostvarenje ovih ciljeva, potrebno je uložiti sveukupno 70,2 milijardi HRK.

U svemu tome, nove će revolucionarne tehnologije pomoći budućnosti industrije prirodnog plina i nafte u zadržavanju ugljikovog dioksida izvan atmosfere. *Power-to-Gas* naziv je za energetska proces i tehnologiju skladištenja koja omogućuje zadržavanje električne energije u rezervi u rasponu megavata. Postojeća mrežna infrastruktura može se iskoristiti povezivanjem postojeće električne mreže i mreže prirodnog plina. To omogućuje sezonski prilagođeno skladištenje značajnih količina energije i opskrbu CO<sub>2</sub> neutralnim gorivom u obliku plina iz obnovljivih izvora energije. U budućoj perspektivi plinski sustav neće biti suočen samo s jednom vrstom plina. U P2G procesu, jedna od dostupnih opcija je korištenje vodika izravno iz elektrolizatora. Druga opcija je nastavak procesa i proizvodnja metana. Osim ove dvije opcije, postoji nekoliko mogućnosti drugih metana na biološkoj bazi, kao i vodika iz prirodnog plina koji je klimatski neutralan pomoću *CCUS*-a odnosno hvatanja, skladištenja i korištenja ugljika.

*Power-to-Gas* predstavlja cjelovito sustavno rješenje problema viška energetskih rezervi na putu u novo doba obnovljive energije. Vodik - i metan u drugom dodatnom koraku – mogu nastati iz viška energije vjetra, sunca i ostalih obnovljivih izvora postupkom elektrolize. Proizvedeni vodik može se pohraniti u postojeću mrežu prirodnog plina za kasniju upotrebu. P2G, osim toga, ključni je element za spajanje električne i plinske infrastrukture, čime se olakšava integracija obnovljivih oblika energije u dobro uspostavljene i učinkovite sustave skladištenja i distribucije energije. Proizvodnja električne energije s niskim udjelom ugljika i korištenje plinova omogućuju povećanje udjela obnovljivih oblika energije u svim relevantnim sektorima, odnosno u električnoj energiji, industriji, grijanju i mobilnosti.

## 1.1. Formulacija problema

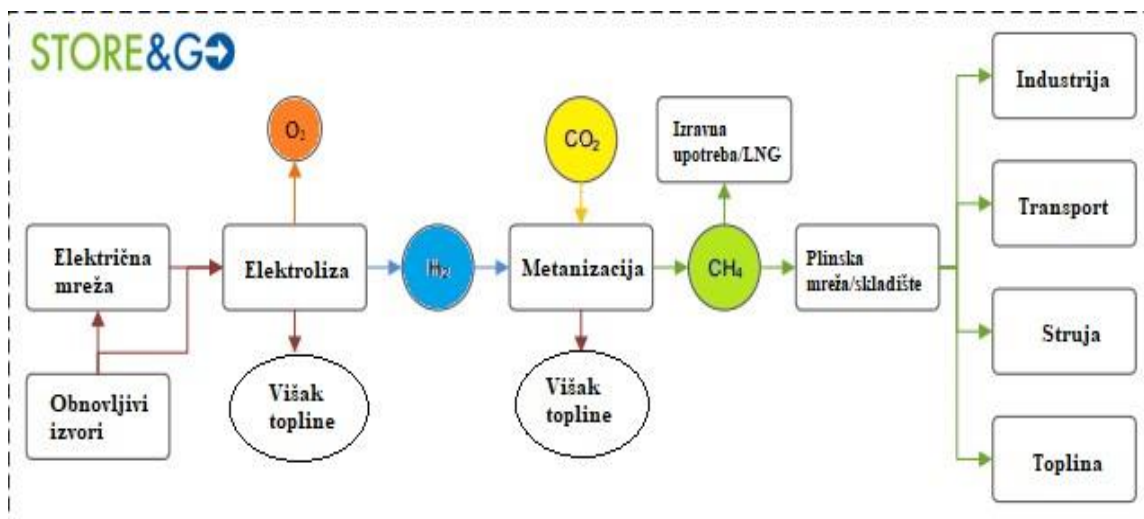
Pronaći trošak uravnoteženja hipotetskog energetskog sustava s visokim udjelom intermitentnih obnovljivih izvora energije uz korištenje *Power-to-Gas* (P2G) tehnologije proizvodnje sintetskog plina. Slika 1-1. je shema hipotetskog slučaja.



Slika 1-1. Shema energetskog sustava s visokim udjelom intermitentnih OIE

## 2. TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE

*Power-to-Gas* definira se kao korištenje električne energije iz pretežno obnovljivih izvora energije za proizvodnju vodika i sintezu u drugom koraku s ugljičnim dioksidom u metan. Slika 2-1. prikazuje procesni lanac P2G unutar projekta *STORE&GO*.

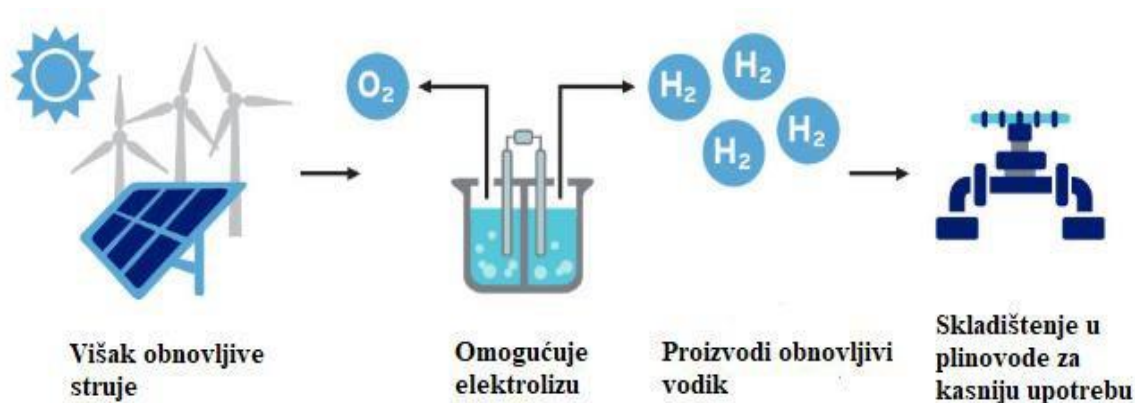


Slika 2-1. Procesni lanac Power to go (Rasmusson et al, 2020)

### 2.1. Obnovljivi vodik

Višak obnovljive električne energije koristi se za pretvaranje vode u obnovljivi vodik primjenom procesa elektrolize. Elektroliza dijeli vodu ( $H_2O$ ) na plin vodik ( $H_2$ ) i plin kisik ( $O_2$ ) u dijelu opreme koji se naziva elektrolizator koji sadrži "anodu" i "katodu" odvojene elektrolitom ili membranom. Kako struja teče kroz elektrolizator, voda oslobađa kisik i vodik. Kisik se obično ispušta u atmosferu, dok se vodik hvata te se može pomiješati s prirodnim plinom i pohraniti u sustav cjevovoda. Slika 2-2. prikazuje proces.



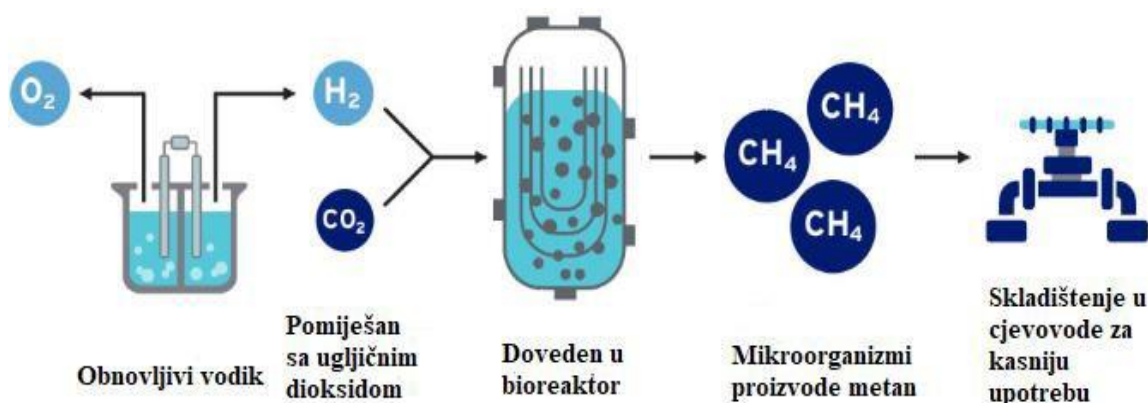


Slika 2-2. Korištenje obnovljive struje za obnovljivi vodik (SoCalGas, 2019)

## 2.2. Obnovljivi prirodni plin

Pretvaranje obnovljivog vodika u obnovljivi prirodni plin (metan) dodaje dodatni korak nakon procesa elektrolize koji se naziva metanacija. Kada se metanacija postigne biološkim procesom, naziva se biometanacija. U biometanaciji, obnovljivi vodik se kombinira s ugljičnim dioksidom ( $\text{CO}_2$ ) i dovodi u bioreaktor u kojem jednostanični mikroorganizmi gutaju vodik i ugljični dioksid i izbacuju metan ( $\text{CH}_4$ ) kako bi proizveli obnovljivi prirodni plin.

Rezultirajući obnovljivi prirodni plin se zatim može ubrizgati u sustav plinovoda i može se koristiti u svemu, od kućanskih aparata do industrijskih procesa, motora i elektrana. Na Slici 2-3. nalazi se primjer sa biometanacijom.



Slika 2-3. Korištenje obnovljivog vodika za obnovljivi plin (SoCalGas, 2019)

Za normalan rad P2G jedinici je potrebna određena količina energije koja se uzima iz električnog sustava na koji je spojena. Zahvaljujući upravljivosti elektrolizatora, P2G možesmanjiti snagu na minimum kako bi aktivno sudjelovao u radu sustava.

Tipično postrojenje sastoji se od:

- Elektrolizatora, koji omogućuje proizvodnju H<sub>2</sub>;
- Uređaja za proces metanacije;
- Izvor CO<sub>2</sub>, koji je neophodan za korak metanacije;
- Objekata za skladištenje, koji omogućuju sigurno skladištenje i pufiranje H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub>

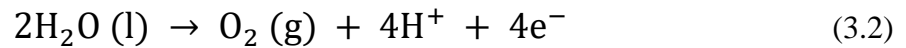
### 3. ELEKTROLIZA VODE

Elektroliza je proces u kojem se molekula vode razlaže na svoje osnovne komponente: kisik (O<sub>2</sub>) i vodik (H<sub>2</sub>) uz pomoć korištenja električne energije. Elektroliza se odvija uz pomoć istosmjernog napona što uzrokuje redoks reakcije: redukciju vodika na katodi te oksidaciju kisika na anodi što je prikazano na Slici 3-1.

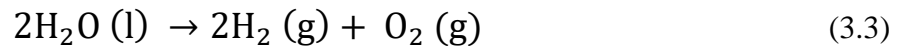
Reakcijom redukcije na katodi nastaje plinoviti vodik:



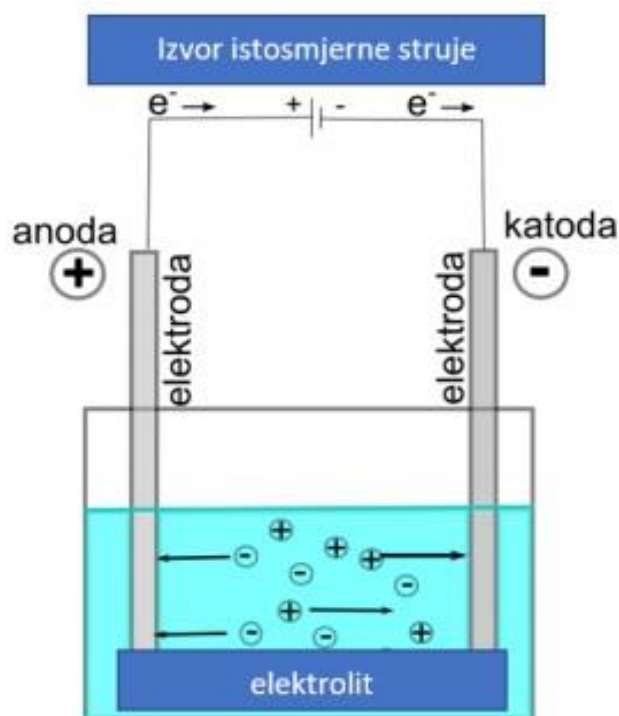
Reakcijom oksidacije na anodi nastaje plinoviti kisik:



Ukupna reakcija procesa elektrolize zapisuje se kao:



Zadnjim izrazom dobijemo da se 9 kg vode razlaže na 1 kg vodika i 8 kg kisika.



Slika 3-1. Proces elektrolize (Čevdek, n.d.)

### 3.1. Elektrolizatori

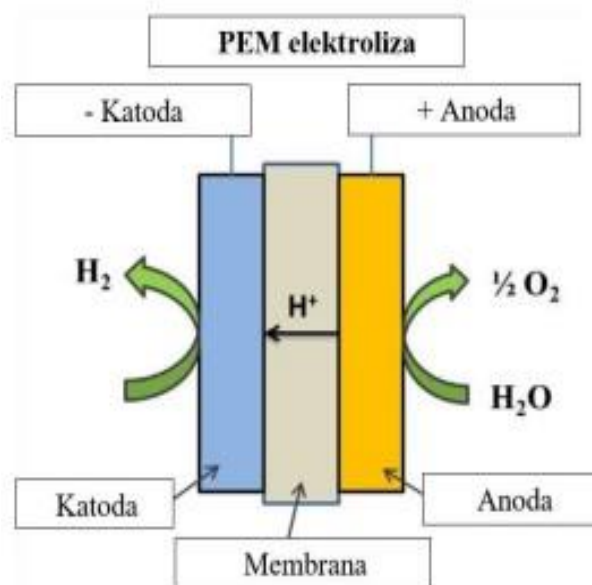
Danas postoje tri glavne tehnologije elektrolizatora: alkalna elektroliza, elektroliza s membranom za izmjenu protona (PEM – *protone exchange membrane*) i elektrolizator s krutim oksidom (SOEC – *solid oxide electrolysis cell*).

**Alkalna elektroliza** - Uvedena 1920-ih, ova tehnologija, koja koristi vodeni alkalni elektrolit, koristi se desetljećima, uglavnom za proizvodnju vodika u industriji gnojiva i klora. Iako ima učinkovitost pretvorbe koja se kreće između 65% i 70%, općenito ima najniže troškove ulaganja i smatra se robusnom. Izazovi su u dinamičkim načinima rada, jer učinkovitost i kvaliteta vodika mogu biti ozbiljno pogođeni u radu s djelomičnim opterećenjem. Također treba veća količina zemljišta za postrojenja u usporedbi s drugim opcijama (Patel, 2019).

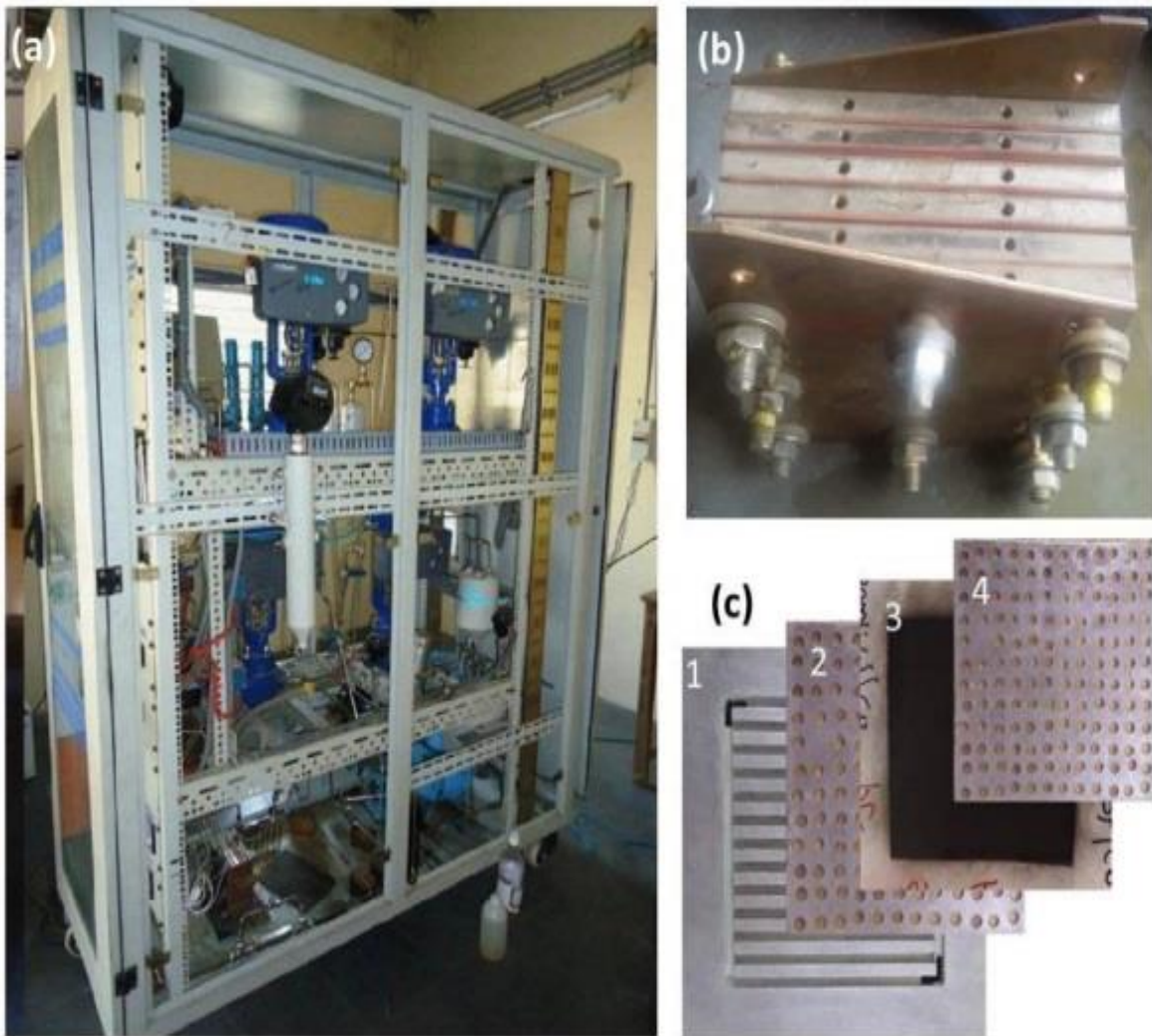
**PEM elektrolizatori** - Prvi PEM elektrolizatori razvijeni su tijekom 1960-ih kako bi se prevladali nedostaci alkalnih elektrolizatora. PEM elektrolizatori tehnološki su slični tehnologiji PEM gorivnih članaka, gdje se kao elektrolit koristi protonski propusna membrana (npr. Nafion, fumapem). Takve membrane su dobre jer imaju veliku vodljivost protona, malu debljinu i mogu raditi pri visokim tlakovima. Vezano uz održivost i utjecaj na okoliš, PEM elektrolizatori se koriste kao jedna od boljih opcija za pretvorbu energije iz

obnovljivih izvora u čisti vodik. PEM elektrolizatori imaju velike prednosti kao što su kompaktan dizajn, visoka gustoća struje, visoka učinkovitost, radi na nižim temperaturama (20–80 °C) i proizvodi ultračisti vodik te također proizvodi kisik kao nusproizvod. Dodatno, balansiranje i upravljanje PEM postrojenja je vrlo jednostavno, što je privlačno za industrijske primjene. Međutim, zbog skupljih materijala koji se nalaze u PEM elektrolizatorima kao što su platina/paladij ili iridijev (IV) oksid/rutenijev (IV) oksid (Pt/Pd, IrO<sub>2</sub>/RuO<sub>2</sub>), glavni izazov njihove buduće primjene je sniženje troškova proizvodnje i održavanje visoke učinkovitosti.

Princip rada PEM elektrolizatora: Voda se elektrokemijskim procesom razlaže na vodik i kisik na pripadajućim elektrodama. Kisik na anodi, a vodik na katodi. Voda se pumpa na stranu anode gdje se dijeli na kisik (O<sub>2</sub>), protone (H<sup>+</sup>) i elektrone (e<sup>-</sup>). Protoni putuju na stranu katode putem vodljive membrane. Elektroni izlaze iz anode kroz vanjski strujni krug, čime se stvara pokretačka energija reakcije. Na strani katode protoni i elektroni se rekombiniraju i stvaraju vodik, što je prikazano na Slici 3-2. Najvažniji dijelovi PEM ćelije elektrolizatora su: sklop membrana/elektroda (engl. Membrane Electrode Assembly, MEA), kolektori struje i separacijske ploče. Slika 3-3. prikazuje jedan tipični PEM elektrolizator s osnovnim dijelovima PEM ćelije. Kao katodni katalizatori elektrokemijskih reakcija u PEM elektrolizatorima koriste se razni plemeniti metali (Kumar i Himabindu, 2019).



Slika 3-2. PEM elektroliza (Kumar i Himabindu, 2019)



Slika 3-3. (a) Tipični PEM elektrolizator, (b) svežanj PEM ćelija, (c) osnovni dijelovi PEM ćelije: 1 - Bipolarna ploča, 2 - anodni kolektor struje, 3 - Sklop membrana/elektroda (MEA), 4 - katodni kolektor struje (Kumar i Himabindu, 2019)

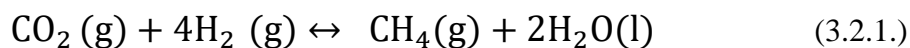
**SOEC** - Najslabije razvijena tehnologija elektrolize od tri, elektrolizatori s krutim oksidima još nisu komercijalizirani, iako su u tijeku naponi da se dovedu na tržište. Koriste keramiku kao elektrolit i imaju niske materijalne troškove. No, budući da koriste paru za visokotemperaturnu elektrolizu, potreban im je izvor topline, zbog čega stručnjaci sugeriraju da bi SOEC-i mogli uspjeti u nuklearnim, solarnim termalnim i geotermalnim projektima. Još jedna prednost je da SOEC-i mogu raditi u obrnutom načinu rada kao gorivne ćelije, pretvarajući vodik natrag u električnu energiju (Patel, 2019).

S obzirom da PEM elektrolizatori najbolje reaguju kod korištenja intermitentnih obnovljivih izvora energije, njih ćemo koristiti u ovom radu.

### 3.2. Metanacijski proces

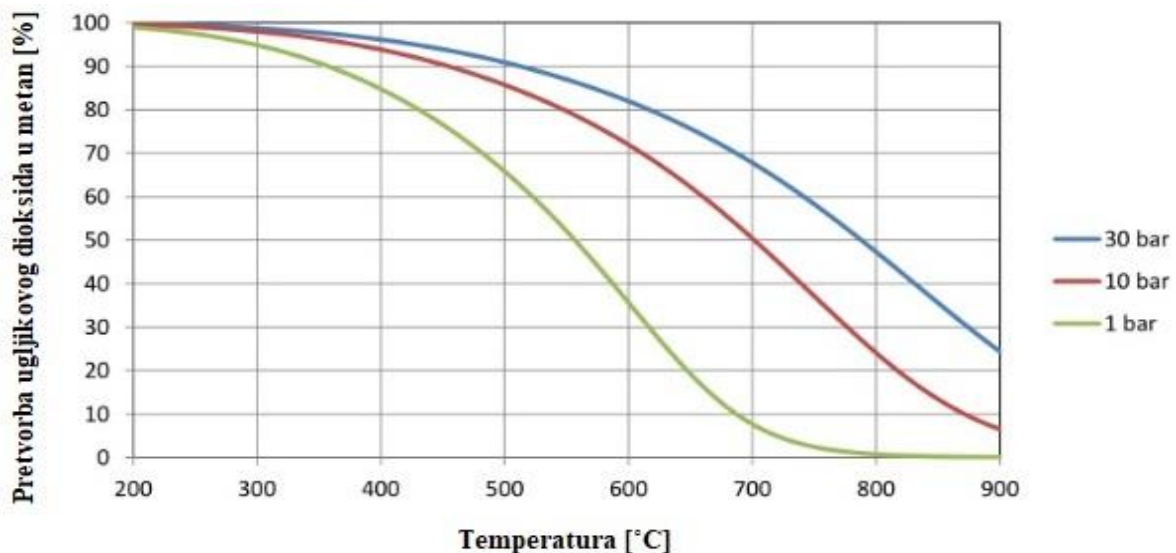
Jedan od najčešćih kemijskih procesa koji se primjenjuju u kemijskoj industriji je hidrogenacija. Točnije, odnosi se na reakciju između molekularnog vodika i drugog elementa ili organskog spoja koja se izvodi u katalitičkoj sredini. Dvije najpoznatije reakcije hidrogenacije su metanacija ugljikovog dioksida i ugljikovog monoksida. Reakcijom ugljikovog monoksida ili ugljikovog dioksida s vodikom u konačnici dovodi do proizvodnje metana odnosno sintetskog prirodnog plina ( u daljnjem tekstu – SNG). Konverzija ugljikovog dioksida u metan naziva se i *Sabatierov* proces, prema francuskom kemičaru Paul-u Sabatier-u, inovatoru u procesima katalitičke hidrogenacije, koji ga je otkrio 1910-ih (Granitsiotis, 2017). S novim razvojem P2G tehnologija za učinkovitije energetske rješenje skladištenja viškova obnovljive električne energije, ovaj proces dobija veću važnost u energetskim sustavima (Helmeth, n.d.). Metan ima veću gustoću energije od metanola i tekućih ugljikovodika, može se sintetizirati u jednom koraku (jedna katalitička reakcija) iz ugljikovog dioksida i vodika, te što je vrlo važno, može se prilagoditi ionako velikoj distribucijskoj mreži prirodnog plina i zamijeniti ga kao obnovljivi izvor energije (Granitsiotis, 2017).

Formula prema kojoj se odvija reakcija:



Proces je veoma egzoterman, a količina energije koja se dobije prikazuje se kao reakcija promjene entalpija i iznosi  $\Delta H = -165 \text{ kJ/mol}$ . Primjenom *Le Chatelierovog* načela, vidljivo je kako povećanje temperature ne pogoduje konverziji ugljikovog dioksida, s druge strane povećanje tlaka utječe na poboljšanje stupnja pretvorbe. Dakle, najveći izazov pri izvođenju ove reakcije je kontrola povećanja temperature egzotermnih reakcija, što znači učinkovito uklanjanje topline, što je usko povezano s dizajnom reaktora.

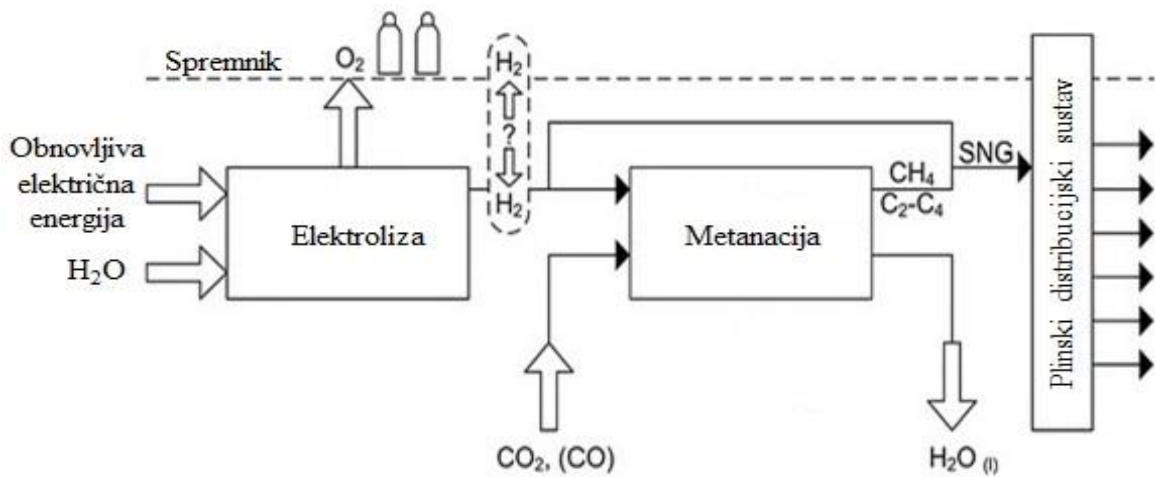
Slika 3-4. prikazuje odnos između pretvorbe  $\text{CO}_2$ , tlaka i temperature (Helmeth, n.d.).



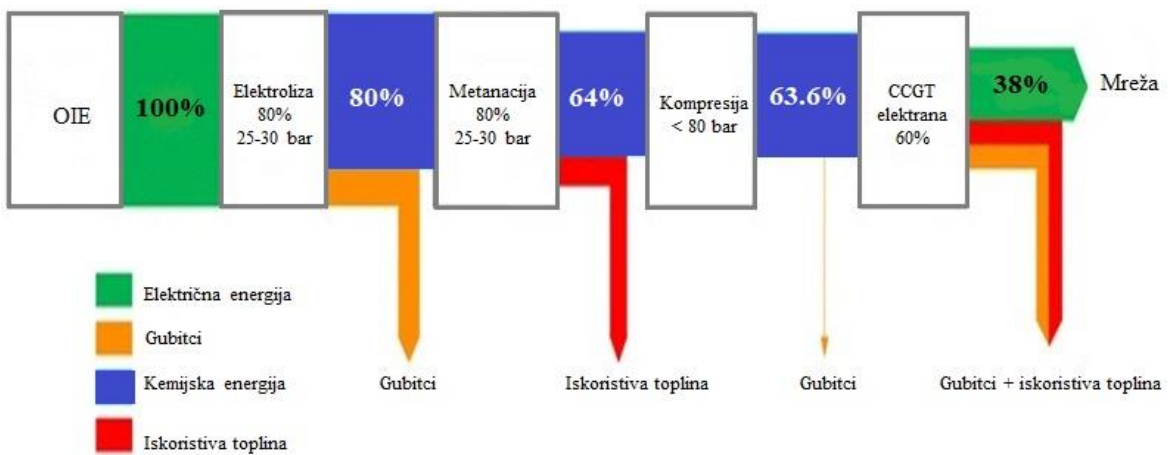
Slika 3-4. Odnos stupnja pretvorbe, tlaka i temperature tijekom metanizacije (preuređeno od Helmeth, n.d.)

Na Slici 3-5. prikazan je koncept skladištenja obnovljive energije u plinskom distribucijskom sustavu te na Slici 3-6. prikazana je shema tipičnog P2G procesa. Višak proizvedene obnovljive električne energije dovodi se do elektrolizatora vode gdje se djelovanjem struje razlaže na svoje osnovne molekule. Razdvojeni kisik se skladišti s obzirom da se može koristiti u raznim drugim granama industrije poput industrije stakla, čelika te rezanju i zavarivanju metala. Vodik se usmjerava prema metanacijskom reaktoru gdje se prije ulaska miješa sa ugljikovim dioksidom u stehiometrijskom odnosu 1:4. Raspon temperatura u reaktoru ovisi o katalizatoru koji se koristi (najčešće na bazi nikla) te onda moraju biti između 200 °C i 550 °C kako ne bi došlo do stvaranja otrovne atmosfere pri niskim temperaturama ili deaktivacije katalizatora zbog okrupnjivanja na visokim temperaturama. Kako bi se izbjegla degradacija katalizatora otrovima katalizatora, poput sumpora ili siloksana, potrebna je metoda čišćenja plina uzvodno od reaktora za metanizaciju (Grünig et al, 2014). Produkti ove reakcije su voda i SNG. Dio tog proizvedenog plina vraća se nazad u struju vodika te se na taj način pomiče ravnoteža reakcije prema produktima. Time se pozitivno djeluje na stupanj pretvorbe CO<sub>2</sub>. Plin koji je preostao otprema se u plinsku mrežu ili u spremnike u slučaju da nema potrebe za potrošnjom.



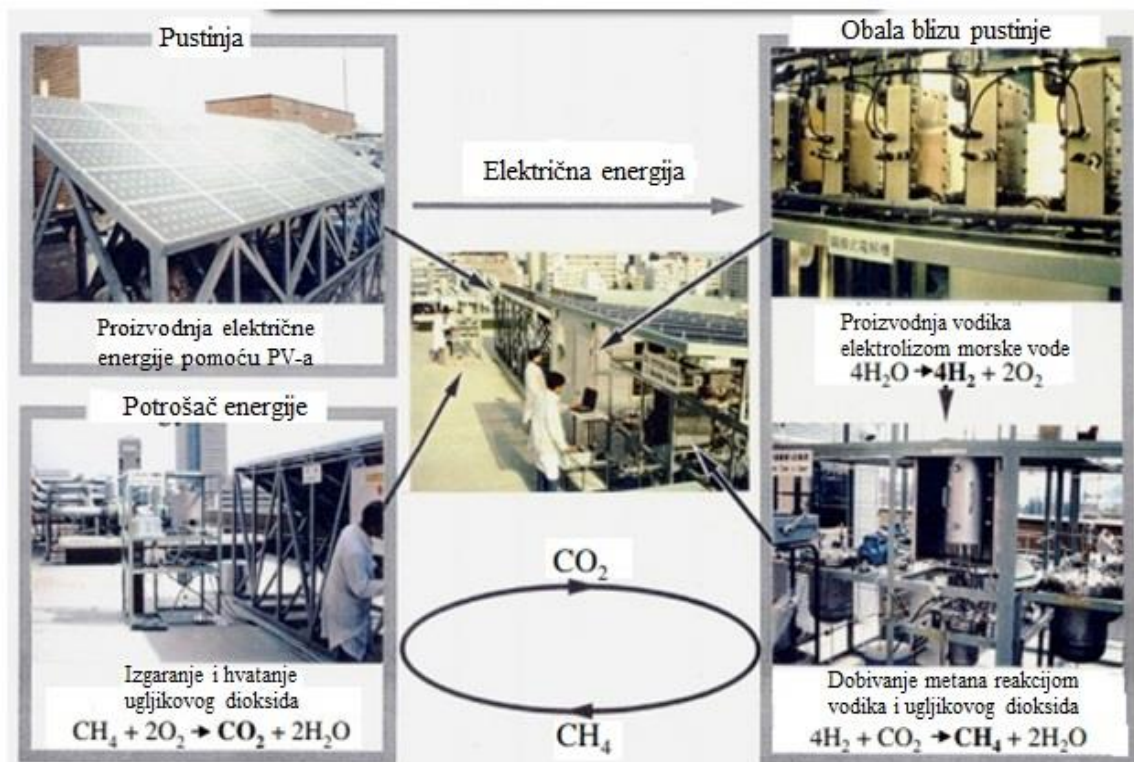


Slika 3-5. Koncept skladištenja obnovljive energije u plinskom distribucijskom sustavu (preuređeno od Grünig et al, 2014)



Slika 3-6. Sankey dijagram tipičnog P2G procesa (preuređeno od Grünig et al, 2014)

Postoji nekoliko projekata upotrebe P2G tehnologije. Na temelju uspješnog razvoja ključnih materijala, instaliran je prototip postrojenja za globalno recikliranje CO<sub>2</sub> nad krovom Instituta za istraživanje materijala na Sveučilištu Tohoku u Japanu 1995. godine te je 2003. godine pokrenuto pilot postrojenje industrijskih razmjera koje je moglo proizvesti 4 m<sup>3</sup>/h vodika i 1 m<sup>3</sup>/h metana. Sastoji se od fotonaponske ćelije, elektrolizatora u kojem se odvija elektroliza morske vode, sustava za metanizaciju CO<sub>2</sub>, komore za izgaranje CH<sub>4</sub> iz koje se CO<sub>2</sub> šalje natrag u sustav za metanizaciju CO<sub>2</sub> što je predstavljeno na Slici 3-7. (Hashimoto et al, 2014).



Slika 3-7. Prototip postrojenja za globalno recikliranje CO<sub>2</sub>, Sveučilište Tohoku, kasnije pilot postrojenje industrijskih razmjera (preuređeno od Hashimoto et al, 2014)

Na sjeveru Njemačke, *Audi*, jedan od najpoznatijih svjetskih proizvođača automobila, ima vlastito postrojenje za proizvodnju metana, vidljivo na Slici 3-8. Sa 2 elektrolizatora po 3 MW, maksimalno se generira 1300 m<sup>3</sup>/h vodika i 325 m<sup>3</sup>/h metana.



Slika 3-8. Postrojenje Audi e-gas, Werlte, Njemačka (Otten, 2014)

U Njemačkoj se također nalazi i jedan od *STORE&GO* projekata, koji služe za demonstraciju. Prvo postrojenje koje je pušteno u rad bilo je postrojenje u Falkenhagenu u Njemačkoj, gdje je u svibnju 2018. godine postojeće postrojenje za proizvodnju vodika prošireno jedinicom za metanaciju s proizvodnim kapacitetom od 57 m<sup>3</sup>/h SNG-a. Od siječnja 2019. proizvedeni SNG ubrizgavan je u mrežu za transport prirodnog plina. Postrojenje je postiglo ukupnu P2G učinkovitost od 53% na temelju rezultata mjerenja. Jedinica za metanaciju postigla je ukupnu učinkovitost metanacije od 85% (uključujući potrošnju topline i potražnju za električnom energijom). Relativno niska ukupna učinkovitost P2G proizašla je iz loše učinkovitosti postojećeg alkalnog elektrolizatora. Osnovna tehnologija u Falkenhagenu (jedinica za metanaciju) bila je sposobna proizvesti SNG visoke kvalitete (volumetrijski sadržaj metana > 99 vol.-%) za široku varijaciju opterećenja (40 – 100 %). Također tijekom promjena opterećenja, kvaliteta SNG-a uvijek je ispunjavala granice za ubrizgavanje plina (*STORE&GO*, n.d.).

## 4. METODA PRORAČUNA ENERGETSKIH TOKOVA U PROGRAMU *ENERGYPLAN*

Za hipotetski slučaj u diplomskom radu koristiti će se programski simulator *EnergyPLAN* koji služi za izradu i procjenu energetske sustava država i regija.

### 4.1. *EnergyPLAN*

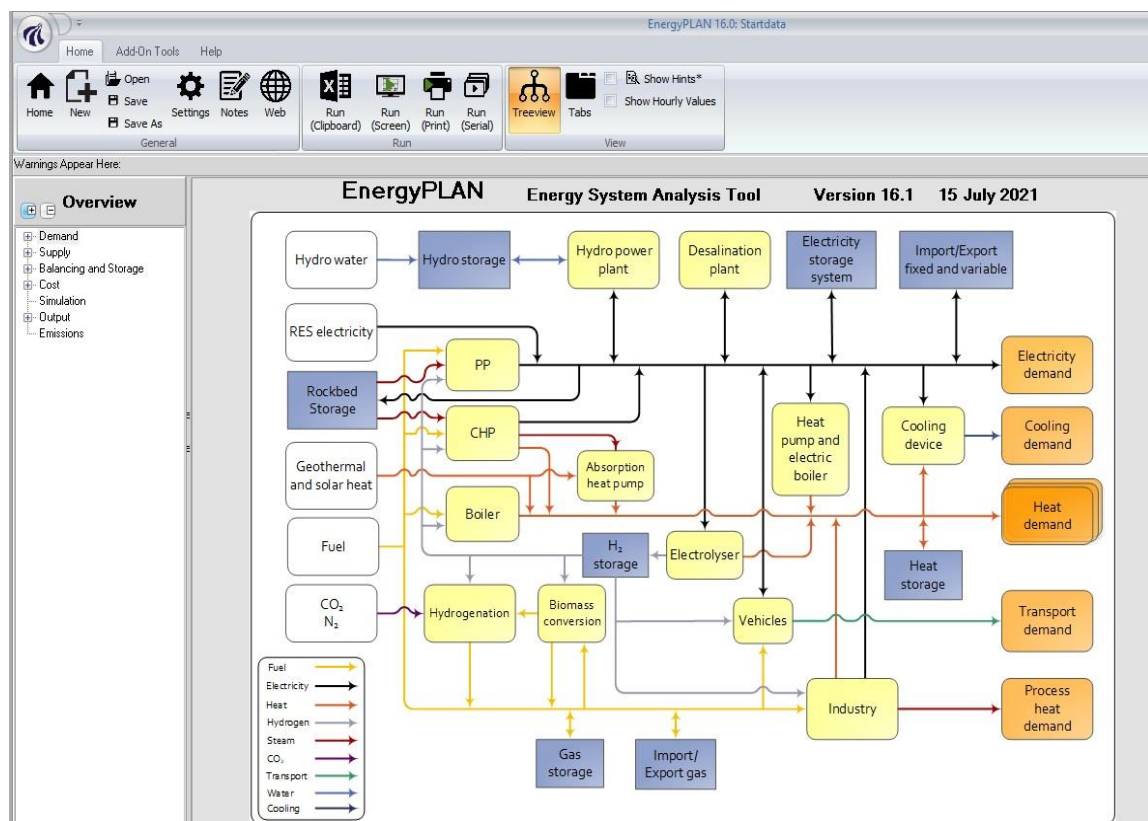
Kako bi se emisije ugljikovog dioksida smanjile sukladno ciljevima Pariškog sporazuma, energetske sustave moraju prijeći sa pretežno fosilnih goriva na sustave zasnovane na obnovljivim izvorima energije. Budući su takvi sustavi vrlo složeni po prirodi, njihovo detaljno analiziranje i modeliranje zahtijeva korištenje naprednih alata. Trenutno širok raspon takvih računalnih alata omogućuje korisnicima modeliranje i analizu na nacionalnoj razini, ali i na one lokalne poput općina i gradova kako bi njihov prijelaz na obnovljive izvore energije bio što jednostavniji i prikladniji. Tri najčešća metodološka pristupa modeliranju energetske sustave su alati ili modeli optimizacije, simulacije i ravnoteže. Svaki pristup ima svoje prednosti, ali i slabosti. Iako su optimizacijski alati dominantni u analizi energetske sustave, njihova složenost može uzrokovati poteškoće u tumačenju rezultata i može utjecati na njihovu točnost. U svojoj sustavnoj analizi kojom su istraživali modele optimizacije elektroenergetskog sustava, Priesmann i skupina autora otkrili su da veća složenost modela ne jamči veću točnost. Jedan od alata koji se najčešće koristi za analizu energetske sustave sa visokim udjelom obnovljivih izvora energije je program *EnergyPLAN*. *EnergyPLAN* program računalni je model koji služi za analizu energetske sustave. Stvoren je za proučavanje i istraživanje u osmišljavanju budućih rješenja za održivu energiju s posebnim naglaskom na energetske sustave s visokim udjelom obnovljivih izvora energije. Mnogi autori smatraju ga najprikladnijim alatom za integraciju obnovljivih izvora energije u mnoge energetske sustave kao npr. u Kini, Danskoj i Irskoj. Razvijen je tako da njegov korisnik brzo i jednostavno može razmotriti kombinacije alternativnih energetske sustave (Lund et al., 2021).

### 4.2. Opće karakteristike i primjene *EnergyPLAN-a*

*EnergyPLAN* korisniku omogućuje analizu tehnološke promjene koja je potrebna pri modeliranju sustava sa 100% obnovljive energije. Kako bi se to prilagodilo, *EnergyPLAN* uključuje niz novih tehnologija kao što su energija valova, centralizirani

sustavi grijanja i hlađenja, energija plime i oseke, koncentrirana solarna energija, skladištenje topline, proizvodnja bioplina, rasplinjavanje biomase i razne P2G tehnologije. Program omogućuje i usporedbu više različitih alternativa tranzicije umjesto da daje samo jedno optimalno rješenje. Nadalje, dugoročne projekcije npr. cijena energije pokazale su se sklone velikim fluktuacijama, čineći sustave dizajnirane na temelju jednog optimalnog rješenja sa nižim troškovima manje učinkovitima i nesigurnijima. Simulacija scenarija može se dovršiti za manje od 10 sekundi u *EnergyPLAN*-u s implikacijom da korisnici mogu uspoređivati utjecaje različitih alternativa u relativno kratkom vremenskom razdoblju. *EnergyPLAN* ukupno simulira vremensko razdoblje od jedne godine, stoga bi za dugotrajnije analize trebalo provesti nekoliko simulacija. U razdoblju od jedne godine program simulira energetske sustav na satnoj razini odnosno kroz 8760 koraka. Takav nam koncept analize omogućava istraživanje satne, dnevne tjedne ili sezonske razlike u potražnji toplinske i električne energije (Lund et al., 2021).

*EnergyPLAN* dolazi sa grafičkim sučeljem u koje korisnik može upisivati ulazne podatke i vršiti pregled modela. Na Slici 4-1. moguće je vidjeti izgled glavnog sučelja programa.



Slika 4-1. Izgled glavnog sučelja programa *EnergyPLAN* (EnergyPLAN, 2022)

Od ulaznih podataka koje korisnik unosi ubrajaju se:

- Potrošnja energije (električna energija, toplina, transport i dr.)
- Proizvodnja energije (vjetroelektrane, solarne elektrane i dr.), uključujući postrojenja za pretvorbu energije kao što su elektrolizatori, postrojenja za bioplin i jedinice za hidrogenizaciju.
- Simulacija (definiranje načina rada svakog postrojenja i sustava, uključujući tehnička ograničenja kao što su prijenosni kapacitet i dr.)
- Troškovi (troškovi goriva, cijena energenata, porezi, varijabilni i fiksni operativni troškovi i investicijski troškovi)

Izlazni podaci dobiveni programom su energetske bilance, rezultat godišnje proizvodnje energije, potrošnja goriva, uvoz/izvoz električne energije, ukupni troškovi i prihodi od razmjene električne energije. Simulacija je prezentirana u mjesečnim, godišnjim i satnim pregledima proizvodnje i potražnje energije, ukupnim emisijama ugljikovog dioksida i novčanim tokovima prema/s vanjskog tržišta električne energije. Satna distribucija omogućava još dublju analizu u proizvodnju i potrošnju energije, a rezultati osim prikaza na ekranu mogu se uvesti u proračunsku tablicu poput *Excel*-a za daljnje istraživanje ili ilustraciju (Lund et al., 2021).



## 5. STANJE I PRILIKE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA U REPUBLICI HRVATSKOJ

U Republici Hrvatskoj vidljiva je stagnacija u polju korištenja obnovljivih izvora, za razliku od zemalja s puno manjim potencijalom. Prema zadnjim izvještajima, Republika Hrvatska ima 981 MW od vjetroelektrana u pogonu (HOPS, 2022) te tek nešto više od 108 MW fotonaponskih sustava (Eurostat, 2020).

Prema podacima iz 2021. HEP grupa raspolagala je sa 19,13 TWh proizvedene i kupljene električne energije, a HEP Opskrba kupcima je prodala 8,1 TWh (HEP, 2022). Podaci o proizvodnji i nabavi električne energije prikazani su u Tablici 5-1.

Tablica 5-1. Podaci o proizvodnji i nabavi električne energije (HEP, 2022)

| Proizvodnja i nabava električne energije | GWh           |
|--|---------------|
| Hidroelektrane                           | 6.785         |
| Termoelektrane                           | 3.537         |
| Nuklearna elektrana Krško                | 2.709         |
| Otkup iz OIE                             | 1.424,67      |
| Uvoz                                     | 4.674         |
| <b>UKUPNO RASPOLOŽIVO</b>                | <b>19.130</b> |

Vidljivo je kako najveći udio u proizvodnji električne energije u Hrvatskoj imaju hidroelektrane sa 6,8 TWh proizvedene energije, a najmanji udio imaju obnovljivi izvori energije. Kada bi se u Hrvatskoj povećao udio obnovljivih izvora energije, smanjio bi se uvoz električne energije iz inozemstva, dodatno bi se uštedjelo i smanjile bi se emisije

CO<sub>2</sub>. Povećanje proizvodnje iz obnovljivih izvora energije također bi smanjilo i proizvodnju u termoelektranama koje su štetne za okoliš. U Tablici 5-2. vidljive su količine instaliranih kapaciteta za proizvodnju toplinske i električne energije iz OIE u Hrvatskoj 2020. godine.

Tablica 5-2. Instalirani kapaciteti za proizvodnju toplinske i električne energije iz obnovljivih izvora energije u Hrvatskoj 2020. godine (EIHP, 2021)

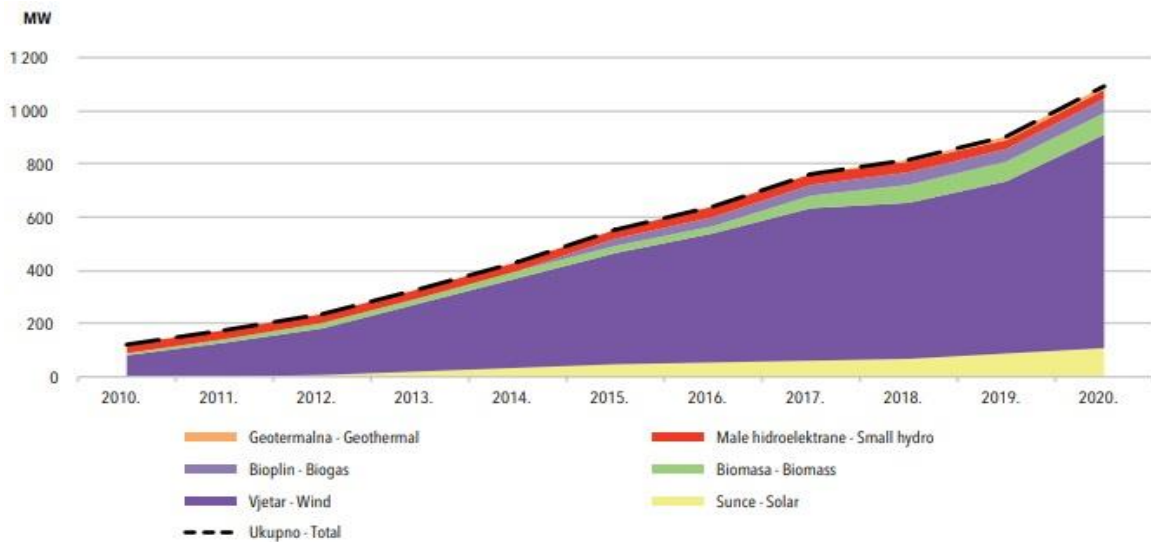
| Vrsta izvora        | Instalirana toplinska snaga<br>(MW) | Instalirana električna snaga<br>(MW) |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Sunce               | 201,6                               | 108,5                                |
| Vjetar              | -                                   | 801,3                                |
| Biomasa             | 243,1**                             | 80,2                                 |
| Bioplin             | 54,9                                | 55,1                                 |
| Male hidroelektrane | -                                   | 33                                   |
| Geotermalna         | 46,5***                             | 10                                   |
| <b>Ukupno</b>       | <b>546,1</b>                        | <b>1088,1</b>                        |

\* sustavi priključeni na elektroenergetsku mrežu

\*\* odnosi se samo za kogeneraciju na biomasu

\*\*\* geotermalna toplinska energija za grijanje prostora





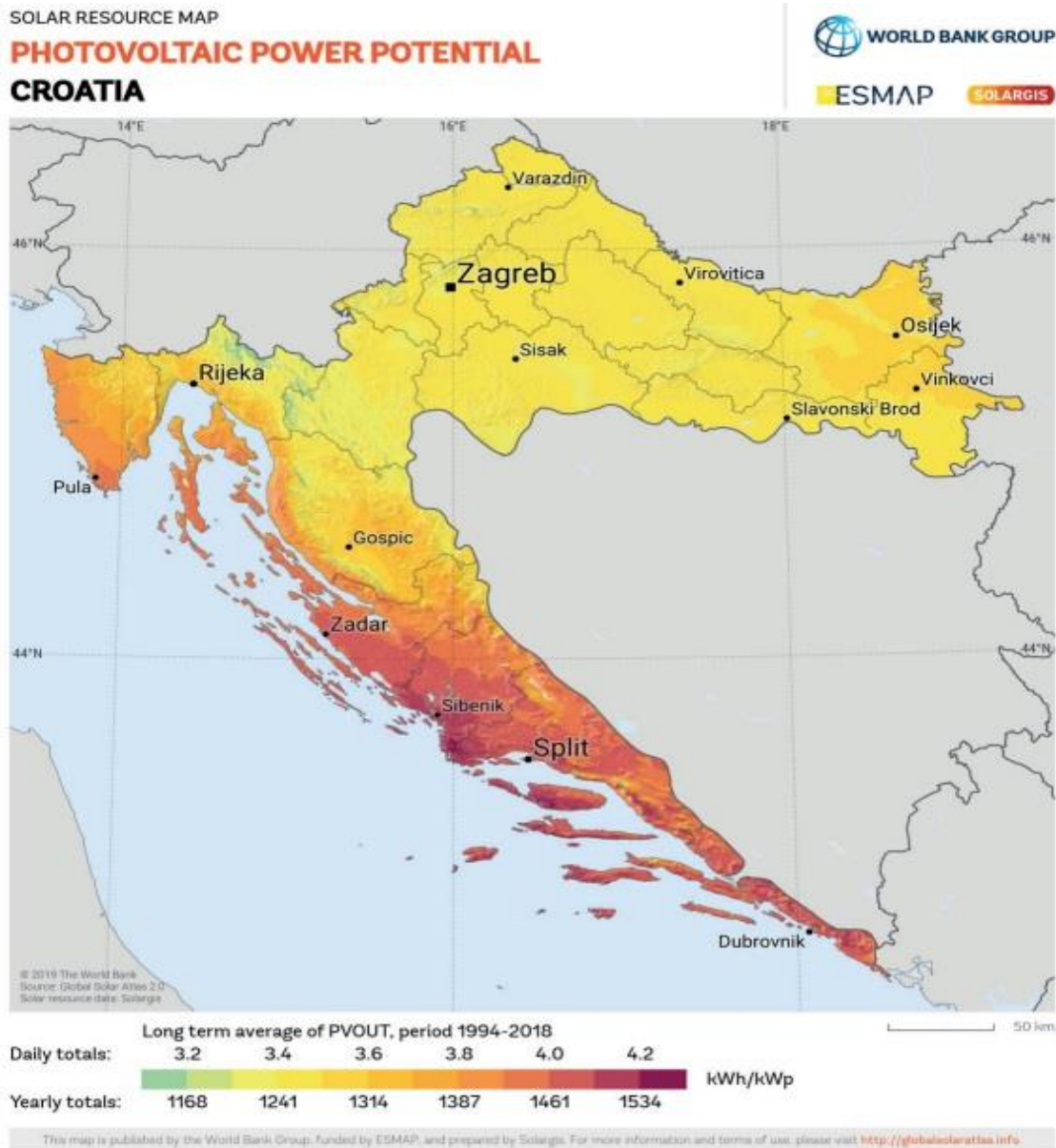
Slika 5-1. Instalirani kapaciteti za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora u Republici Hrvatskoj (EIHP, 2021)

Na Slici 5-1. moguće je istaknuti kako su se od 2010. godine do 2020. godine značajno povećali kapaciteti za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora u Republici Hrvatskoj. To se prvenstveno odnosi na iskorištavanje energije vjetra, a što je izravna posljedica izgradnje većeg broja vjetroelektrana diljem Republike Hrvatske. Potrebno je istaknuti i kako je sve izraženija zastupljenost biomase te sunčeve energije, a moguće je i pretpostaviti kako će korištenje sunčeve energije biti još i veće u budućnosti s razvojem tehnologija za efikasnije iskorištavanje potencijala sunčeve energije te što je vrlo bitno, jedan od osnovnih preduvjeta za razvoj potencijala iskorištavanja sunčeve energije (kao i drugih oblika obnovljivih izvora energije) je svakako pad troškova investicija u postrojenja za proizvodnju obnovljivih izvora energije (Meglič, 2022).

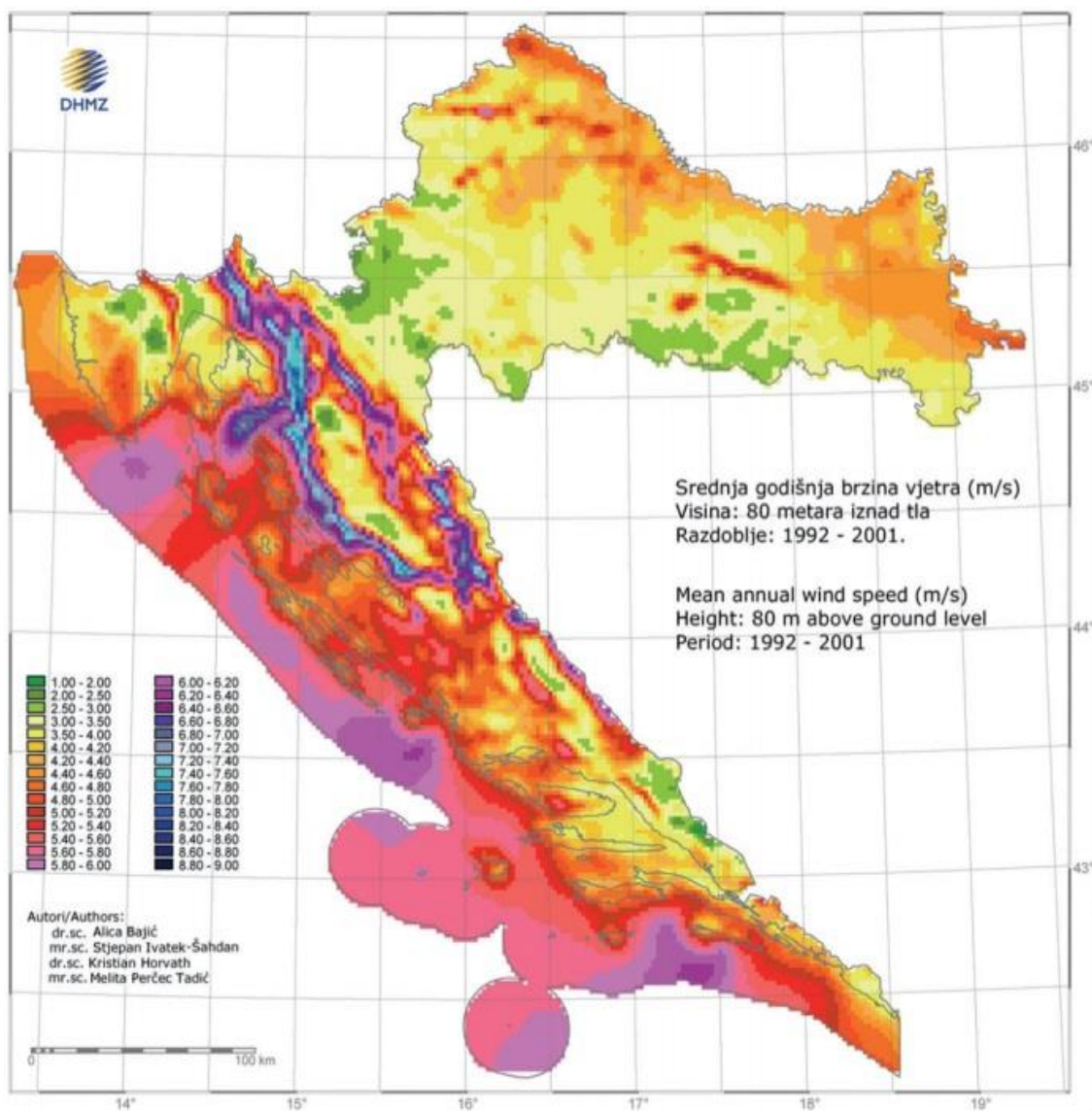
Moguće je istaknuti nekoliko razloga zašto je potrebno hitno ulagati u obnovljive izvore energije (UN, 2022):

- Obnovljivi izvori prisutni su na cijeloj površini planeta Zemlje, iako je više od 80% država energetske deficitarno, povećanje stupnja iskorištavanja raspoloživih obnovljivih izvora energije ima potencijal kreiranja energetske neovisnosti većeg broja država;
- Obnovljivi izvori energije su jeftiniji, što je posljedica rapidnog razvoja tehnologija za iskorištavanje obnovljivih izvora energije. U Republici Hrvatskoj iskorištavanje obnovljivih izvora energije dodatno pojeftinjuju brojni poticaji te svakako i mogućnost korištenja sredstava dostupnih iz EU fondova, sredstava iz nacionalnih izvora i sl.;
- Obnovljivi izvori energije su zdraviji za korištenje u odnosu na neobnovljive izvore energije. Pritom se može analizirati utjecaj na floru, faunu te na čovjeka;
- Svaka novčana jedinica uložena u obnovljive izvore energije kreira 3 puta više radnih mjesta u odnosu na neobnovljive izvore energije. Iz tog razloga moguće je istaknuti kako ulaganje u obnovljive izvore energije ima i izražen socijalni učinak zbog izravnog doprinosa kreiranju novih radnih mjesta
- Čak i danas se značajna sredstva (u 2020. godini 5,9 trilijuna eura) izdvajaju u obliku subvencija s ciljem eksploatacije fosilnih goriva. Kada bi isti ili manji iznos bio investiran u razvoj obnovljivih izvora energije do 2030. godine, već 2050. godine postigao bi se cilj nulte neto emisije štetnih plinova.

Republika Hrvatska nalazi se na geografski povoljnoj lokaciji i dobro je povezana sa zemljama u susjedstvu, na području bogatom resursima poput energije vjetera i sunčeve energije, što prikazuju Slika 5-2. i Slika 5-3.



Slika 5-2. Potencijal za fotonaponske elektrane u Hrvatskoj (Svjetska banka, n.d.)



Slika 5-3. Srednja godišnja brzina vjetra u Hrvatskoj (Državni hidrometeorološki zavod, n.d.)

Kao što je i vidljivo na slikama, Republika Hrvatska ima velik potencijal za iskorištenje tih energija, pogotovo županije poput Šibensko-kninske, Splitsko-dalmatinske i Dubrovačko-neretvanske. Priobalna područja imaju veći potencijal sunčeve energije od drugih dijelova zemlje, kako prikazuje Slika 5-2. Kako prikazuje Slika 5-3., priobalna područja imaju i velik potencijal energije vjetra, ali i kopneni dijelovi Hrvatske imaju potencijal za razvoj energije vjetra. Prema scenariju niskih restrikcija u cijeloj Europskoj uniji Zajedničkog istraživačkog centra Europske komisije, Republika Hrvatska ima potencijal od 61 GW kapaciteta priobalnih vjetroelektrana i 179 GW na moru, od čega je 106 GW potencijal za plutajuće vjetroelektrane na moru. Ako se iz razvoja vjetroelektrana

na moru isključi pojas od 12 nautičkih milja udaljenosti od obale zbog potrebe očuvanja krajobraza, još uvijek postoji ogroman potencijal za vjetroelektrane na moru: 95 GW, od čega je 72 GW za plutajuće vjetroelektrane na moru zbog dubine mora veće od 60 metara. Zajednički istraživački centar Europske komisije predstavio je i potencijal za fotonaponske elektrane u Republici Hrvatskoj, koji iznosi između 50 GW i 175 GW prema scenariju u kojem se 3 % dostupnih prirodnih površina koristi za fotonaponske elektrane. U okviru tih brojki, procjenjuje se da potencijal integriranih fotonaponskih elektrana iznosi između 2,6 GW i 9 GW. Osim vjetra i sunca, Hrvatska ima i velike potencijale za korištenje geotermalne energije, zbog visokog geotermalnog gradijenta u kontinentalnom dijelu države. Zbog geotermalnog gradijenta koji je 60 % veći od europskog prosjeka, kontinentalna Hrvatska ima značajan potencijal za proizvodnju električne energije u geotermalnim elektranama, s konzervativnom procjenom od 500 MW (Energovizija, 2021). Zbog velikog potencijala te još uvijek nedovoljno razvijenog tog istog potencijala, Republika Hrvatska jedna je od država koja će u budućnosti morati optimizirati vlastitu strukturu elektroenergetskog sustava kako bi iskoristavala viškove proizvedene električne energije iz intermitentnih obnovljivih izvora energije.

## 6. METODA

Kao što je već napisano, za optimizaciju energetskeg sustava i korištenje viškova električne energije iz obnovljivih izvora te kasnije proizvodnju SNG-a, prikazano na slici 1-1., koristiti će se programski simulator *EnergyPLAN* i programski jezik *Python*. U *EnergyPLAN*-u potrebno je unijeti nekoliko setova podataka za pravilnu izradu referentnog odnosno baznog scenarija. Nakon referentnog modela izrađenog u *EnergyPLAN*-u, u *Python*-u je potrebno napraviti program koji će simulirati različite scenarije odnosno promjenu bitnih parametara za optimizaciju strukture energetskeg sustava. U ovom slučaju napravljena su 3 scenarija. To će biti scenarij u kojem će biti najmanji troškovi za optimizaciju strukture, zatim scenarij s najmanjom izmjenom električne energije te naposljetku scenarij najmanje izmjene plina. Za svaki od tih scenarija biti će izrađen *Sankey*-ev dijagram tog procesa.

### 6.1. Satne distribucije

U program je potrebno unijeti satne distribucijske krivulje korištenih energija poput snage vjetra, po jednu satnu distribuciju za snagu svake vrste hidroelektrane koja se koristi (akumulacijske i protočne) te satne distribucijske krivulje toplinskog opterećenja za odabranu godinu. One skupa s podacima o sustavu, nakon obrade u softveru, trebaju dati reprezentativan model. Svi se ti trenutni podaci mogu pronaći na stranicama Međunarodne energetske agencije (IEA) ili se može izraditi model izradom satnih distribucija snage vjetra, satne distribucije za snagu svake vrste hidroelektrane te satne distribucije toplinskog opterećenja za odabranu godinu. Nakon izrade analize energetske bilance za danu godinu, dobiveni podaci modela moraju odgovarati rezultatima koje je moguće pronaći na stranicama Međunarodne energetske agencije za tu godinu s pretpostavljenim dopuštenim odstupanjem od 3 %. Ukoliko odstupanja budu u granicama, model se proglašava valjanim te se može koristiti kao osnova za nastavak proračuna. Bitno je napomenuti kako se satne distribucije u program unose u obliku tekstualne datoteke (.txt) i sastoje se od 8760 satnih vrijednosti. Postoji još niz podataka koje je potrebno implementirati u softver kako bi se pravilno izračunali parametri modela, od čega su najbitniji:

Satna distribucija insolacije - proizvodnja električne energije iz fotonaponski modula. U ovom se slučaju također koriste podaci srednjih vrijednosti.

Uvoz i izvoz električne energije - *EnergyPLAN* ima opciju zadavanja točne količine koja se izvozi ili uvozi. Ova je stavka bitna za Republiku Hrvatsku budući da ima proizvodne kapacitete izvan granica. To je naravno nuklearna elektrana Krško koja se nalazi u suvlasništvu sa Republikom Slovenijom. Nuklearna elektrana je posebna u ovom slučaju, jer se za pretpostavku njezinog rada koristi konstantna satna distribucija. Razlog tomu je priroda rada ovakve jedinice, tj. bazni način rada i male promjene opterećenja (Aščić, 2018).

## 6.2. Izrada scenarija

U ovom diplomskom radu, jer se radi o hipotetskom slučaju, nije potrebna izrada krivulja za implementaciju u softver, već će se koristiti podaci distribucije Republike Hrvatske za 2021. godinu preuzete sa stranice Međunarodne energetske agencije. U nastavku bit će prikazane i pojašnjene najbitnije stavke potrebne za izradu baznog scenarija.

### 6.2.1. *Kartica Demand - Electricity*

Hrvatski energetske sustav karakterizira velik uvoz električne energije. Bitno je napomenuti kako se energija proizvedena u nuklearnoj elektrani Krško tretira kao uvezena energija. S druge strane, država ima i izvoz električne energije. U ovoj kartici potrebno je unijeti podatke o potrošnji te uvozu i izvozu električne energije. S obzirom da se radi o hipotetskom slučaju, nije unesena prava vrijednost.

### 6.2.2. *Kartica Demand - Heating*

Toplinski sustav podijeljen je na tri komponente: individualno grijanje, mala kogeneracija i velika kogeneracija s mogućnošću kondenzacije. Glavna distribucijska datoteka u ovoj kartici krivulja je satnog toplinskog opterećenja. U male toplane spadaju sve toplane u Republici Hrvatskoj koje nemaju kogeneraciju, a zadovoljavaju potrošnju od 2,316 PJ ili 0,64 TWh godišnje. Javne toplane, tj. termoelektrane promatraju se kao velika kogeneracijska postrojenja čija učinkovitost iznosi 90 %. U ovom slučaju koristiti ćemo velike kogeneracije s mogućnošću kondenzacije odnosno u *EnergyPLAN*-u grupa 3.

### 6.2.3. *Kartica Supply –Heat and Electricity*

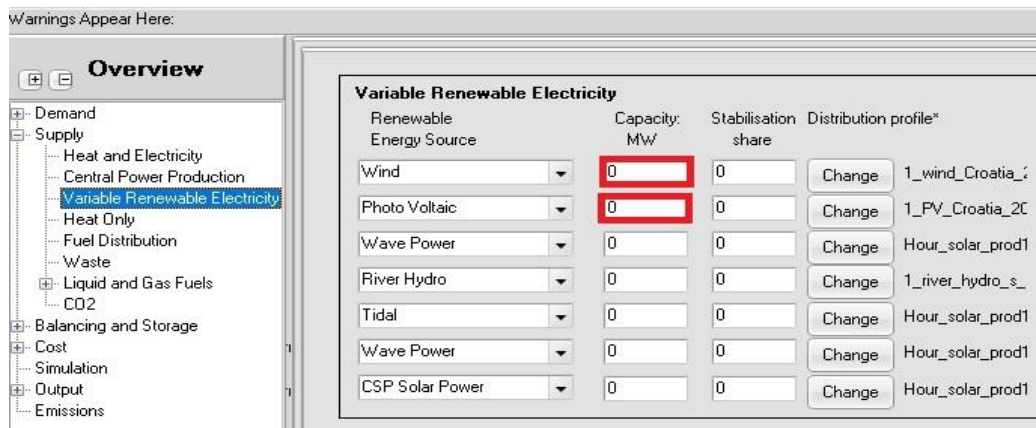
Ova kartica zahtijeva unos podataka o korištenim izvorima za dobivanje električne i toplinske energije, koji u ovom slučaju nisu intermitentni. To su kotao i kogeneracijsko



postrojenje.

#### 6.2.4. Kartica Supply – Variable Renewable Electricity

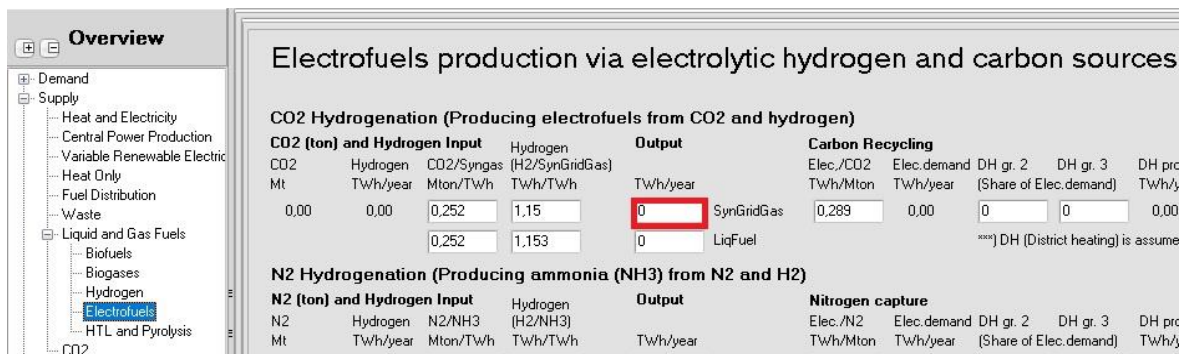
U ovu karticu unose se podaci za korištene izvore obnovljive energije. U ovom slučaju to su vjetroelektrane i fotonaponske ćelije. Slika 6-1. prikazuje unos podataka u programu.



Slika 6-1. Unos podataka za korištene obnovljive izvore energije u *EnergyPLAN*-u (EnergyPLAN, 2022)

#### 6.2.5. Kartica Supply – Liquid and Gas Fuels

Kako bi smo optimizirali elektroenergetski sustav, potreban nam je vodik i SNG. Stoga, u ovu karticu unose se podaci o elektrolizatoru, spremniku za vodik i CO<sub>2</sub> hidrogenaciji – količini proizvedenog metana. Slika 6-2. prikazuje unos podataka.



Slika 6-2. Unos podataka za količinu proizvedenog SNG-a u *EnergyPLAN*-u (EnergyPLAN, 2022)



#### 6.2.6. Kartica *Balancing and Storage – Liquid and Gas Fuel*

U karticu za ravnotežu mreže i pohranu postavljaju se određeni limiti za energetske mreže i određeni kapaciteti za pohranu. U našem slučaju potreban nam je spremnik za plin i električni grijač za pokrivanje vršnog opterećenja za proizvodnju tople vode ili pare za industriju te za potrebe centralnog toplinskog sustava.

#### 6.2.7. *Ekonomski parametri*

*EnergyPLAN* ima mogućnost cjelokupne ekonomske analize sustava, a za nju potrebno je u model uvrstiti podatke o troškovima sustava. U *EnergyPLAN*-u prikazani su kroz tri kartice: Investicijski i fiksni troškovi, varijabilni troškovi i cijena održavanja te cijena goriva. Osim toga, potrebno je i postaviti cijenu emisijskih dozvola za CO<sub>2</sub> te diskontnu stopu.

Većina podataka potrebnih za analize uzeti su kao srednje vrijednosti raspona iz kataloga Danske energetske agencije (Danish Energy Agency i Energinet, 2022). Za nekoliko tehnologija, koje nisu uključene u katalog, troškovi se temelje na relevantnoj literaturi (Devaraj et al., 2020; Gorre et al., 2019; Gorre et al., 2020). Podaci o troškovima prikazani su u Tablici 6-1.

Tablica 6-1. Investicijski troškovi i vijek trajanja postrojenja

| Jedinica  | Milijuna eura po veličini | Period | Troškovi rada i održavanja [% od investicijskih troškova] |
|---|---------------------------|--------|---|
| CHP [MW-e]  | 1                         | 25     | 2   |
| Kotao [MW-th]                                       | 0,1                       | 25     | 2   |
| Električni grijač [MW-e]                            | 0,1                       | 25     | 2   |
| Vjetroelektrana [MW-e]                              | 1                         | 25     | 2   |
| Fotonaponske ćelije [MW-e]                          | 0,8                       | 25     | 2   |
| Recikliranje CO <sub>2</sub> [MtCO <sub>2</sub> /y] | 80                        | 25     | 2   |
| Metanacija CO <sub>2</sub> [MW]                     | 0,8                       | 25     | 2   |
| Elektrolizator [MW-e]                               | 0,9                       | 10     | 4   |
| Spremnik vodika [GWh]                               | 25                        | 10     | 2   |
| Spremnik plina [GWh]                                | 10                        | 25     | 2   |

### 6.3. Korištenje *Python*-a za simulaciju

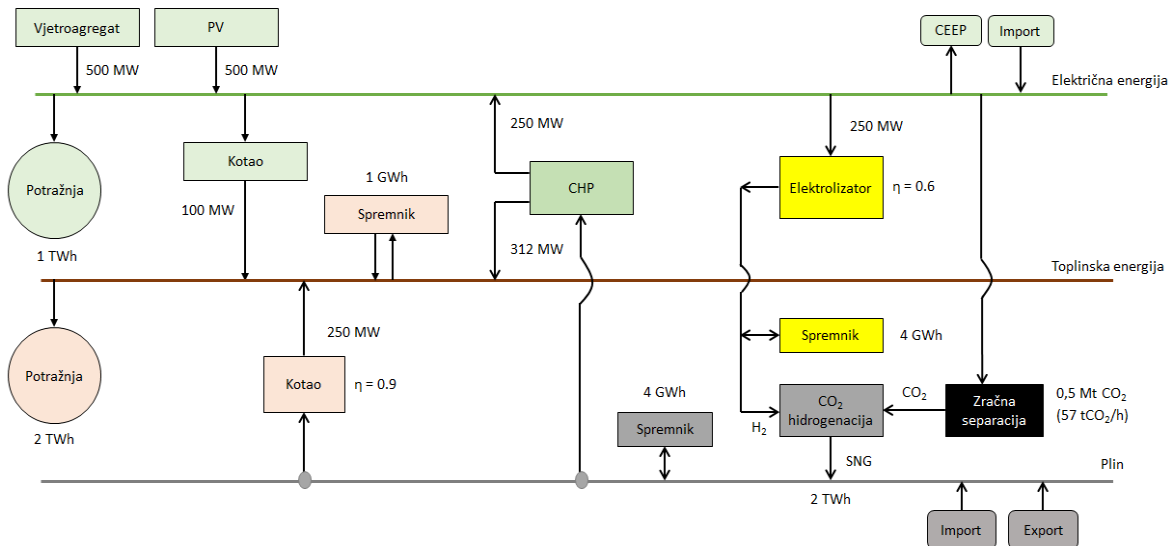
U interpreterskom programskom jeziku *Python* izrađena je programska skripta u kojoj se koriste učitavaju podaci iz programa *EnergyPLAN* i koja izrađuje matrice s pojedinim vrijednostima. Zatim se ubacuje funkcija koja se poziva unutar programa koja mijenja vrijednosti parametara unutar sustava te učitava rezultate. Simuliraju se različiti scenariji ovisno o 6 parametara koji se mijenjaju za ukupno 3 koraka:

- Kapacitet vjetroelektrana [MW]
- Kapacitet fotonaponskih elektrana [MW]
- Instalirani kapacitet *CHP* postrojenja [MW]
- Instalirani kapacitet elektrolizatora [MW]
- Kapacitet spremnika vodika [GWh]
- Kapacitet spremnika plina [GWh]

Nakon odrađene simulacije u kojoj postoji 729 različitih scenarija, u *Python*-u je moguće dobiti vrijednosti i matrice u kojoj su nama najbitniji: scenarij u kojem imamo najmanje troškove za optimizaciju strukture energetskog sustava, zatim scenarij s najmanjom izmjenom električne energije te scenarij najmanje izmjene plina. Osim toga, mogu se dobiti različiti grafički prikazi za bolju vizualizaciju programa.

## 7. MODEL ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Energetski sustav koji se optimizira u ovom radu bazira se najprije na bazni scenarij s unesenim podacima u *EnergyPLAN* u kojem imamo hipotetski slučaj optimizacije. Shema sustava nalazi se na Slici 7-1.



Slika 7-1. Shema hipotetskog slučaja energetskog sustava s visokim udjelom intermitentnih OIE

Nakon ubacivanja ulaznih podataka u *EnergyPLAN*, simulira se program u *Python*-u koji optimizira 6 parametara navedenih u poglavlju 6.3. Vrijednosti navedenih parametara koje se mijenjaju su u rasponu od:

- Kapacitet vjetroelektrana [MW] – od 1000 do 2000 MW
- Kapacitet fotonaponskih elektrana [MW] – od 1000 do 2000 MW
- Instalirani kapacitet *CHP* postrojenja [MW] - od 400 do 800 MW
- Instalirani kapacitet elektrolizatora [MW] - od 500 do 1000 MW
- Kapacitet spremnika vodika [GWh] – od 0 do 8 GWh
- Kapacitet spremnika plina [GWh] – od 0 do 4 GWh

Elektrolizator koji se koristi za proizvodnju vodika je PEM elektrolizator sa učinkovitošću od 60% te kotao koji se koristi za toplinsku energiju radi sa učinkovitošću od 90%.

### 7.1. Analiza rezultata

Preko *Sankey*-evih dijagrama vidljivi su tokovi optimiziranih energetske sustava. S lijeve strane su ulazi primarne energije u kojima veliku većinu zauzimaju obnovljivi izvori energije, u ovom slučaju energija vjetra i sunčeva energija. Proizvodnjom električne energije iz intermitentnih obnovljivih izvora energije višak električne energije ide u elektrolizator koji proizvodi vodik i zatim se metanacijskom jedinicom proizvodi sintetski plin, koji se kasnije može koristiti za grijanje ili proizvodnju električne energije.. Osim obnovljivih izvora energije u scenarijima s najmanjim troškom i s najmanjom izmjenom električne energije imamo i plin, u ovom slučaju uvoz. S desne strane vidljiva je finalna potrošnja i gubici. U finalnoj potrošnji najveći je udio za toplinsku energiju, odnosno centralni toplinski sustav.

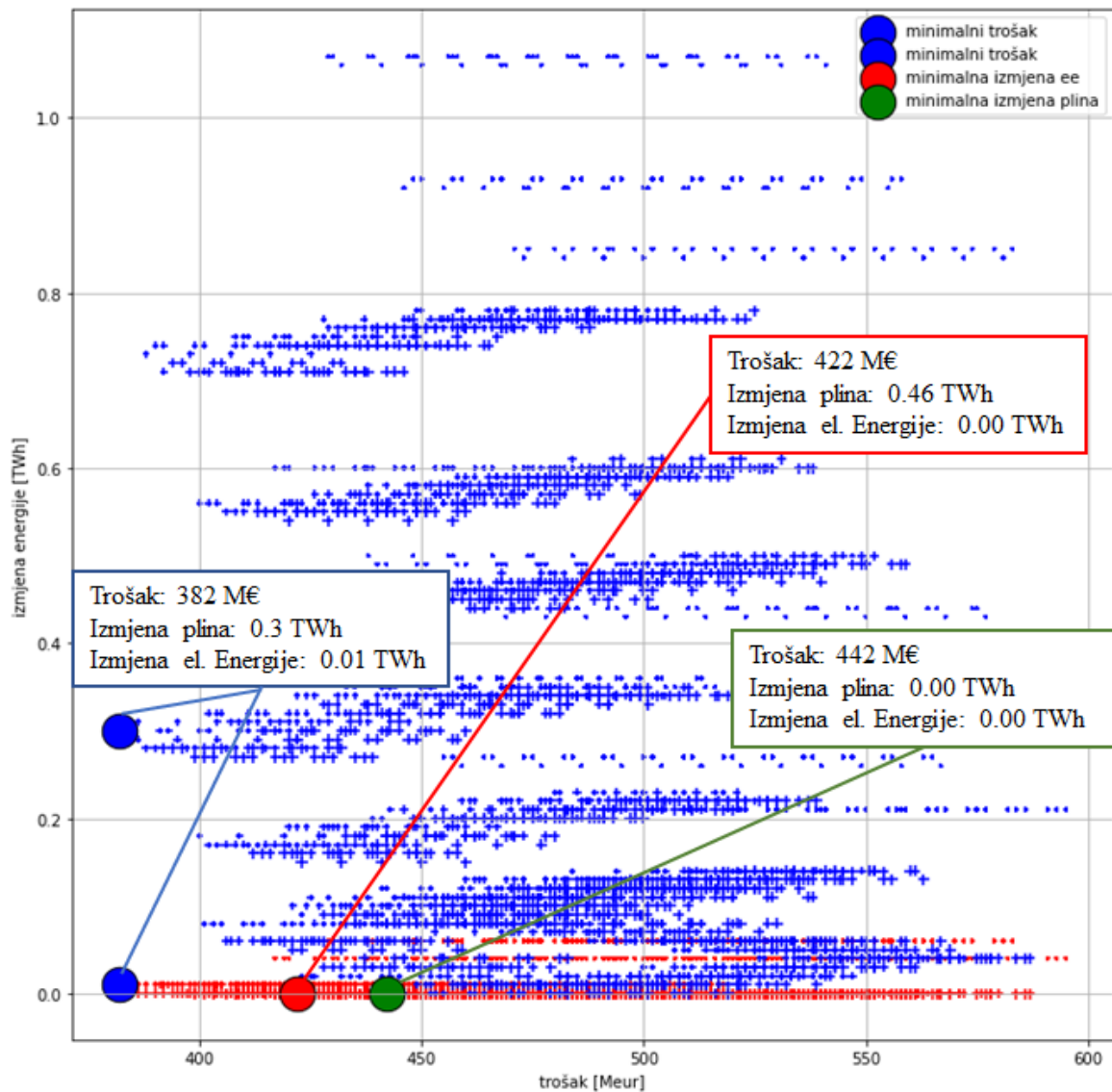
U scenariju s najmanjim troškom optimizacije imamo najmanji trošak, ali još uvijek je prisutan uvoz plina i električne energije.

U scenarijima s minimalnom izmjenom električne energije i minimalnom izmjenom plina postignuto je 100% pokrivenosti električne energije, odnosno 100% vlastite proizvodnje se uspjelo pokriti iz intermitentnih izvora izravnim korištenjem ili preko P2G procesa. U scenariju s najmanjom izmjenom plina postignuta je i potpuna pokrivenost plina, čime nema uvoza plina. Time ovaj sustav pomaže da se intermitentni izvori prebace u P2G i da tada dobiveni plin koristimo kada intermitentnih izvora nema.

Ideja je da se plinom pokrije samo ono što vjetar i sunčeva energija ne mogu pokriti, ali u svemu tome treba gledati i ekonomsku stranu, jer prekapacitiranjem sustava potrebna je značajna novčana investicija.

Na Slici 7-2. vidljivi su troškovi svih scenarija u odnosu na njihove izmjene energije. Može se uočiti da smanjenjem izmjena energija trošak pojedinog scenarija raste. U ovom slučaju, najveći je trošak u kojem imamo najmanju izmjenu plina. Međutim, vidljivo je da se u tom scenariju postiže potpuna pokrivenost električne energije i plina, odnosno samodostatnost. U budućnosti ti troškovi mogu biti i manji smanjenjem početnih

investicija elektrolizatora, vjetroelektrana, fotonaponskih elektrana i sustava za proizvodnju sintetskog prirodnog plina uz njihovo povećanje učinkovitosti.



Slika 7-2. Trošak pojedinog scenarija i njihove izmjene energije

## 7.2. Bazni scenarij

Ovaj scenarij potreban je kako bismo definirali parametre potrebne za optimizaciju energetske strukture. Korištena je distribucija Republike Hrvatske za 2021. godinu. Ulazni podaci korišteni za ovaj scenarij nalaze se u Tablici 7-1.

Tablica 7-1. Ulazni podaci u *EnergyPLAN*-u

| Jedinica                      | Iznos | Mjerna jedinica        |
|-------------------------------|-------|------------------------|
| Potražnja električne energije | 1     | TWh/god                |
| Potražnja toplinske energije  | 2,22  | TWh/god                |
| Kotao                         | 250   | MW                     |
| Električni grijač             | 500   | MW                     |
| CHP postrojenje               | 250   | MW                     |
| Vjetroelektrane               | 500   | MW                     |
| Fotonaponske elektrane        | 500   | MW                     |
| Zračni separator              | 0,25  | MtCO <sub>2</sub> /god |
| Metanacijski reaktor          | 114   | MW                     |
| Elektrolizator                | 400   | MW                     |
| Spremnik vodika               | 2     | GWh                    |
| Spremnik plina                | 1     | GWh                    |
| Trošak plina                  | 27    | EUR/GJ                 |
| Cijena električne energije    | 200   | EUR/MWh                |
| Cijena CO <sub>2</sub>        | 100   | EUR/tCO <sub>2</sub>   |
| Diskontna stopa               | 5     | %                      |

### 7.3. Scenarij sa 100% uvezenom energijom

Scenarij s potpunim uvozom energije opisuje sustav u kojem se sva potražnja za električnom i toplinskom energijom bilancira uvozom električne energije i plina. Ovaj scenarij služi za usporedbu s dekarboniziranim scenarijima. Kapaciteti koji su instalirani navedeni su u Tablici 7-2. *Sankey*-ev dijagram za scenarij potpunog uvoza energije prikazan je na Slici 7-3.

Tablica 7-2. Iznosi parametara za scenarij potpunog uvoza energije

| Jedinica                                     | Iznos | Mjerna jedinica |
|--|-------|-----------------|
| Kapacitet vjetroelektrana                    | 0     | MW              |
| Kapacitet fotonaponskih elektrana            | 0     | MW              |
| Instalirani kapacitet <i>CHP</i> postrojenja | 500   | MW              |
| Instalirani kapacitet elektrolizatora        | 0     | MW              |
| Kapacitet spremnika vodika                   | 0     | GWh             |
| Kapacitet spremnika plina                    | 0     | GWh             |



Izrazi i kratice korištene u *Sankey*-evim dijagramima:

B3 – kotao

BUS –E - Skup korištenih izvora za električnu energiju

BUS – GG - Skup korištenih izvora za plinsku mrežu

CHP3 – kogeneracijsko postrojenje

CO<sub>2</sub>Hydro - električna energija potrebna za hidrogenaciju

CO<sub>2</sub>Hydro:SNG – proizvodnja sintetskog prirodnog plina iz hidrogenacije

DEM – E: General – potražnja električne energije koja se koristi za općenite svrhe

DEM – H: DH – G3 – potražnja za toplinskom energijom zadovoljena kotlom

EB: DH-G3 – Električni grijač koji se koristi za opskrbu toplinske energije u grupi 3

Electrolyser – Elektrolizator

LOSS – ukupni gubitak

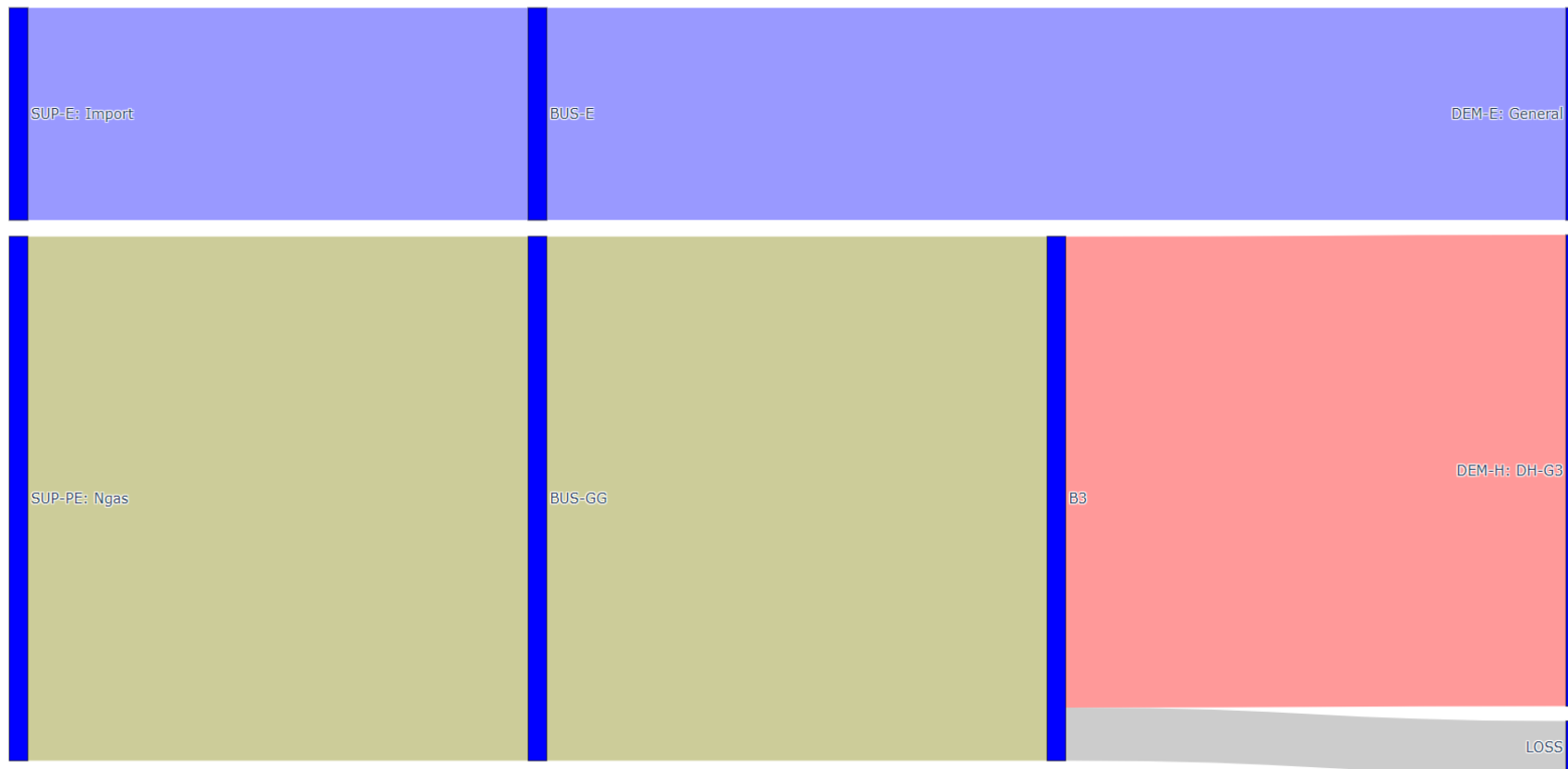
PP+ - elektrane koje proizvode samo električnu energiju

RES – HUB –Čvorište svih obnovljivih izvora energije

SUP-E: Import – Opskrba električne energije uvozom

SUP – E: Wind; PV – Opskrba električne energije vjetrom i fotonaponskim elektranama

SUP-PE: Ngas – Izvor za proizvodnju električne energije što se bilancira prirodnim plinom



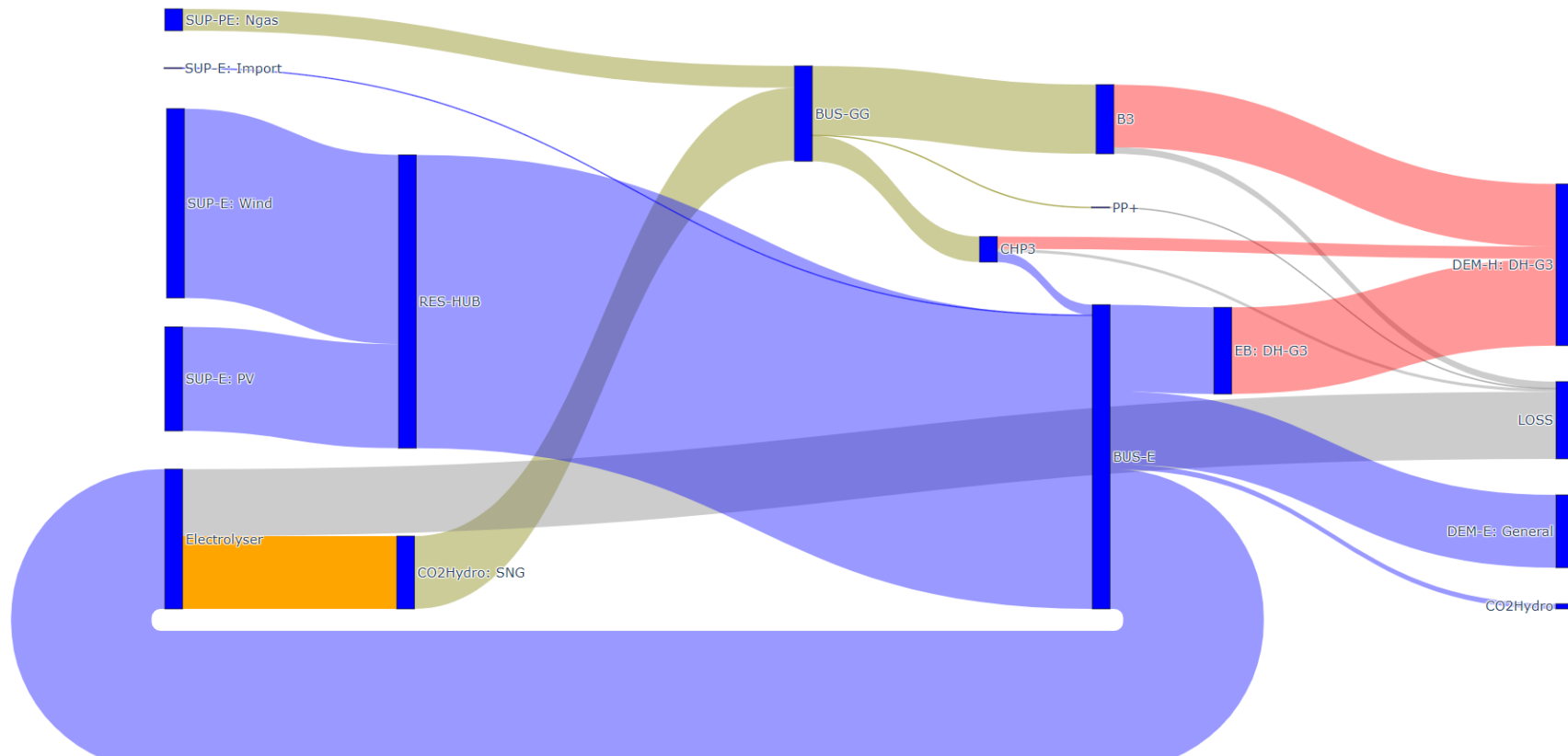
Slika 7-3. Sankey-ev dijagram za scenarij potpunog uvoza energije

#### 7.4. Scenarij s najmanjim troškom

Ovaj scenarij optimizira sustav proizvodnjom vodika i SNG-a uz najmanji trošak investicija. Iz njega se dobija da je za takav trošak potrebno koristiti kapacitete prikazane u Tablici 7-3. *Sankey*-ev dijagram za scenarij najmanjeg troška prikazan je na Slici 7-4.

Tablica 7-3. Iznosi parametara potrebni za scenarij najmanjeg troška

| Jedinica                                     | Iznos | Mjerna jedinica |
|--|-------|-----------------|
| Kapacitet vjetroelektrana                    | 1500  | MW              |
| Kapacitet fotonaponskih elektrana            | 1000  | MW              |
| Instalirani kapacitet <i>CHP</i> postrojenja | 400   | MW              |
| Instalirani kapacitet elektrolizatora        | 500   | MW              |
| Kapacitet spremnika vodika                   | 2     | GWh             |
| Kapacitet spremnika plina                    | 0     | GWh             |



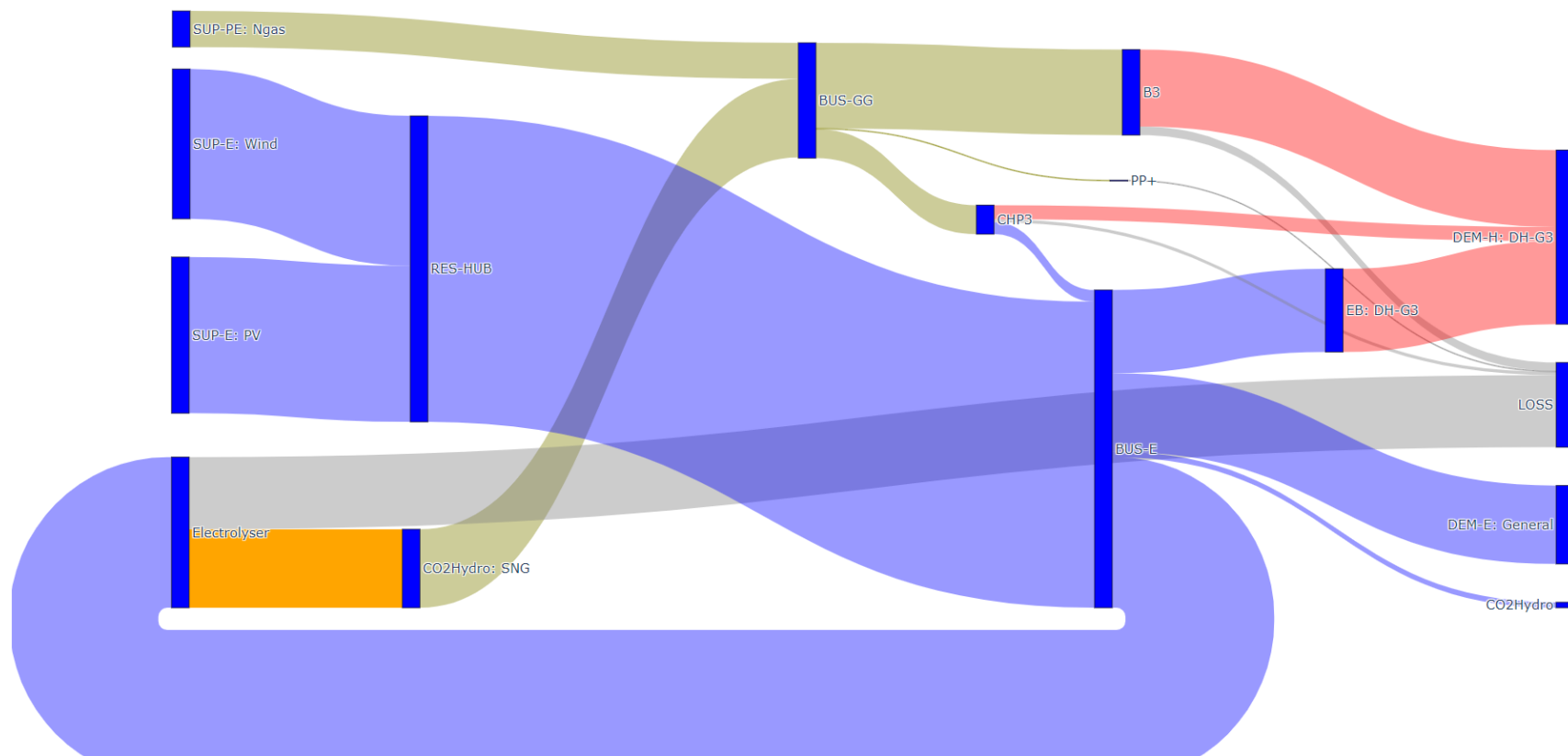
Slika 7-4. Sankey-ev dijagram za scenarij minimalnog troška optimizacije

## 7.5. Scenarij s najmanjom izmjenom električne energije

Scenarij izmjene električne energije je godišnja razlika između uvoza i izvoza električne energije. Iz *Python* matrice izračunavamo da je potrebno koristiti parametre prikazane u Tablici 7-4. *Sankey*-ev dijagram za scenarij najmanje izmjene električne energije prikazan je na Slici 7-5.

Tablica 7-4. Iznosi parametara potrebni za scenarij s najmanjom izmjenom električne energije

| Jedinica                                     | Iznos | Mjerna jedinica |
|--|-------|-----------------|
| Kapacitet vjetroelektrana                    | 1000  | MW              |
| Kapacitet fotonaponskih elektrana            | 2000  | MW              |
| Instalirani kapacitet <i>CHP</i> postrojenja | 400   | MW              |
| Instalirani kapacitet elektrolizatora        | 500   | MW              |
| Kapacitet spremnika vodika                   | 2     | GWh             |
| Kapacitet spremnika plina                    | 0     | GWh             |



Slika 7-5. Sankey-ev dijagram za scenarij s minimalnom izmjenom električne energije

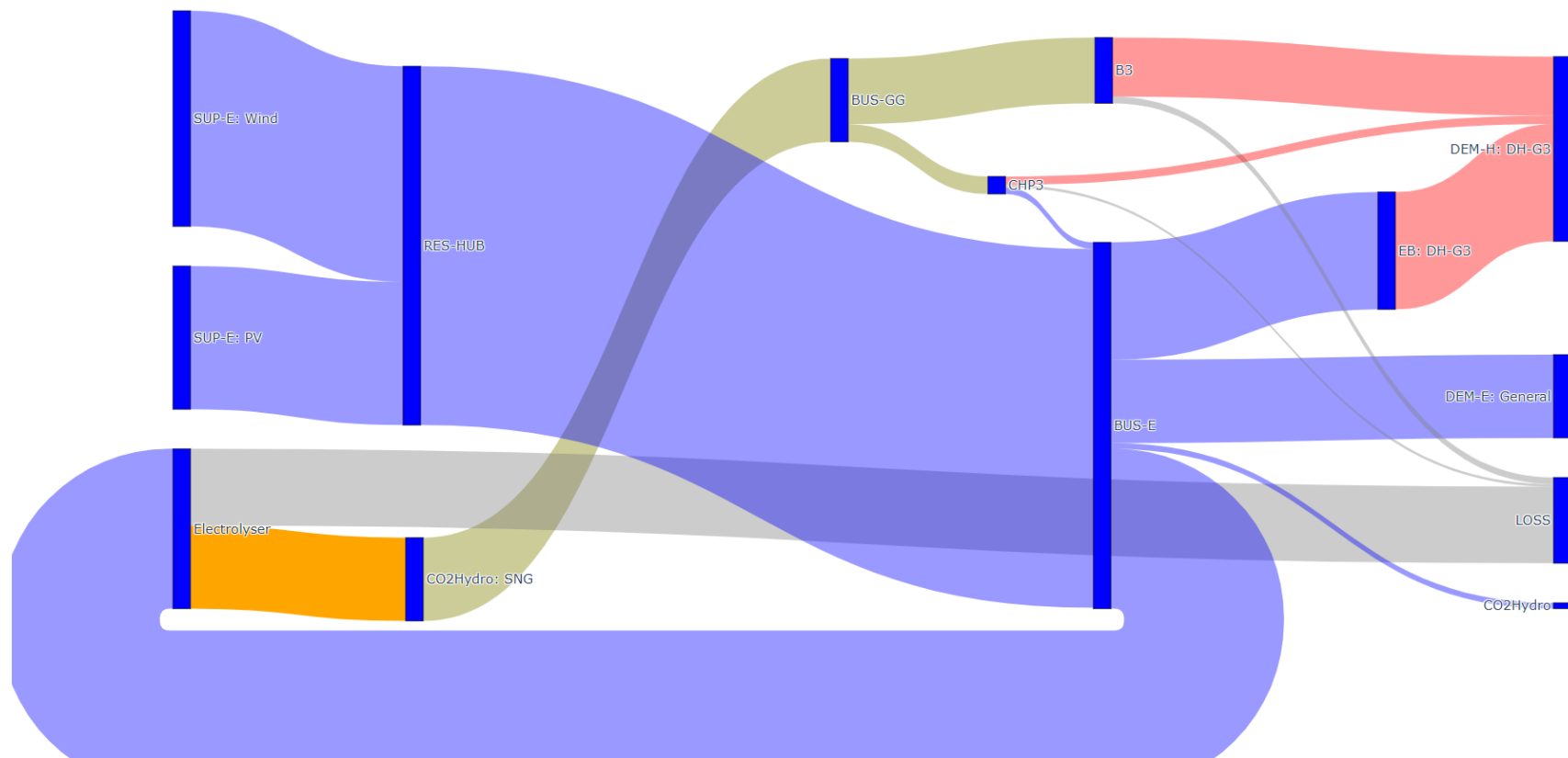
## 7.6. Scenarij s najmanjom izmjenom plina

U ovom scenariju sustav se optimizira za najmanju izmjenu plina. Ako nema plina, *EnergyPLAN* namješta da će se plin uvoziti. Izmjena plina također je apsolutna razlika između uvoza i izvoza, u ovom slučaju samo uvoz. Iz *Python* matrice izračunavamo da je potrebno koristiti kapacitete prikazane u Tablici 7-5. *Sankey*-ev dijagram za scenarij najmanje izmjene plina prikazan je na Slici 7-6.

Tablica 7-5. Iznosi parametara potrebni za scenarij s najmanjom izmjenom plina

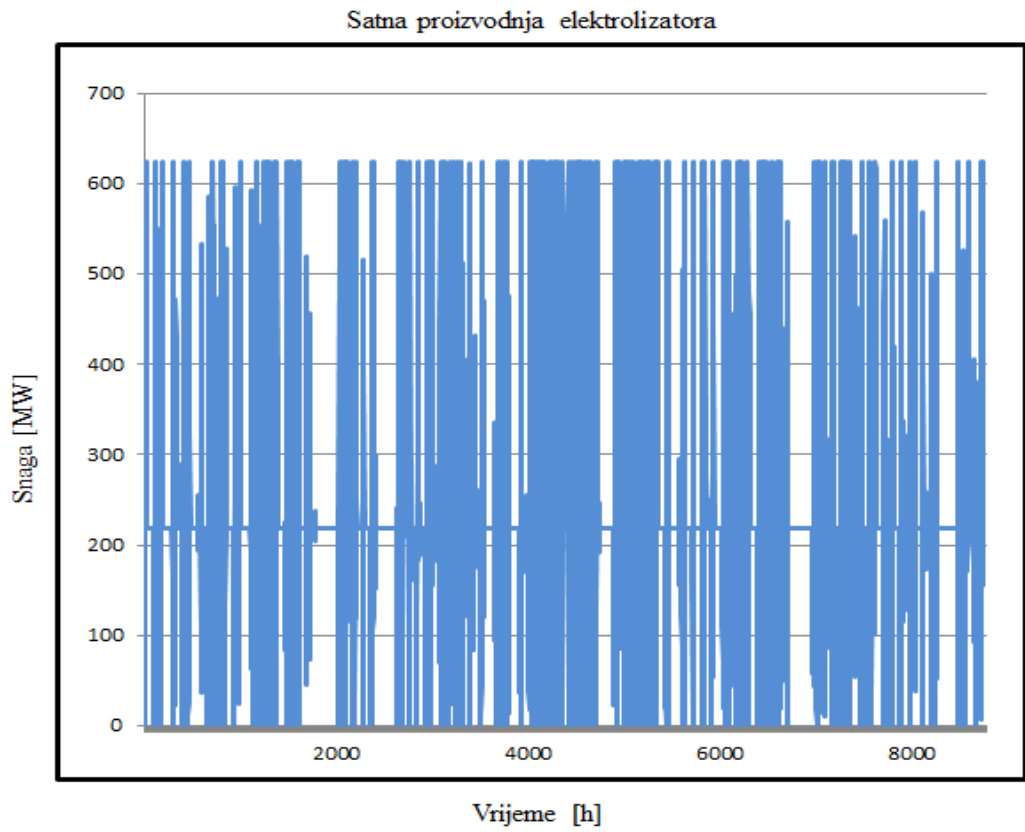
| Jedinica                                     | Iznos | Mjerna jedinica |
|--|-------|-----------------|
| Kapacitet vjetroelektrana                    | 2000  | MW              |
| Kapacitet fotonaponskih elektrana            | 1500  | MW              |
| Instalirani kapacitet <i>CHP</i> postrojenja | 400   | MW              |
| Instalirani kapacitet elektrolizatora        | 625   | MW              |
| Kapacitet spremnika vodika                   | 2     | GWh             |
| Kapacitet spremnika plina                    | 0     | GWh             |

Slika 7-7. prikazuje satnu raspodjelu proizvodnje elektrolizatora kapaciteta 625 MW. Na oznaci od 2000 sati vidljivo je da je elektrolizator na 0 MW, odnosno ne radi, iz razloga što tada nema viškova električne energije proizvedene iz vjetra ili sunčeve energije.



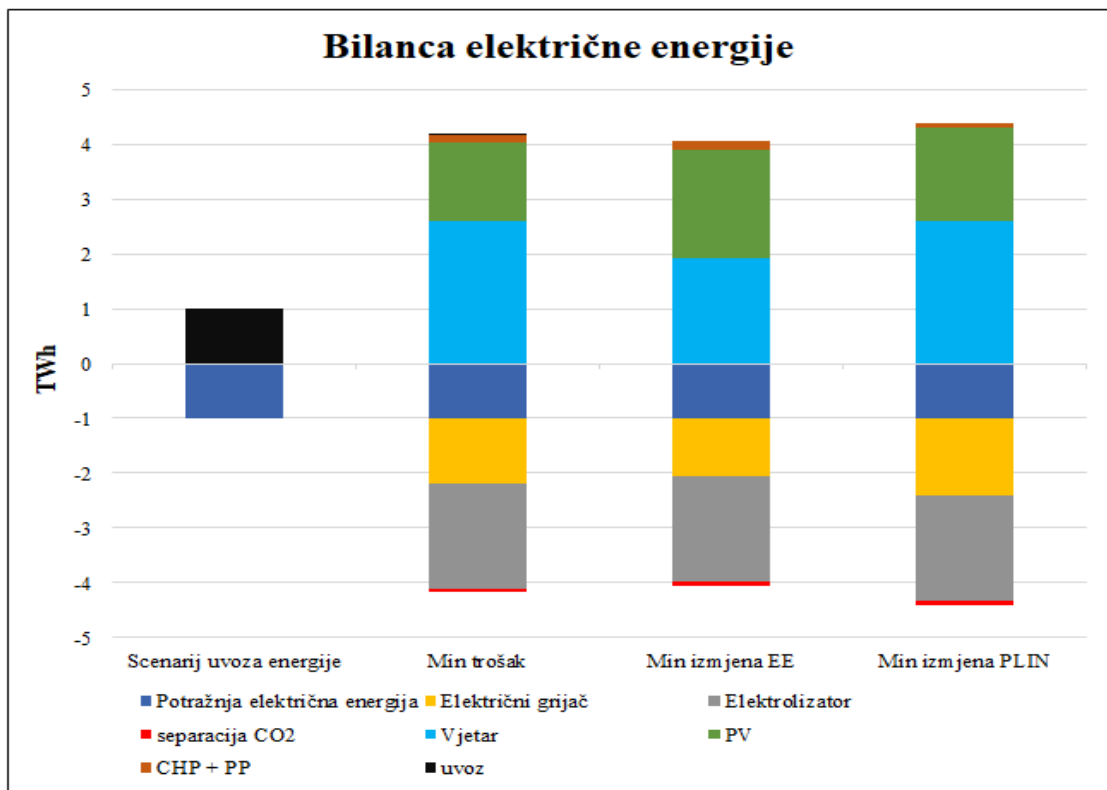
Slika 7-6. Sankey-ev dijagram za scenarij s minimalnom izmjenom plina



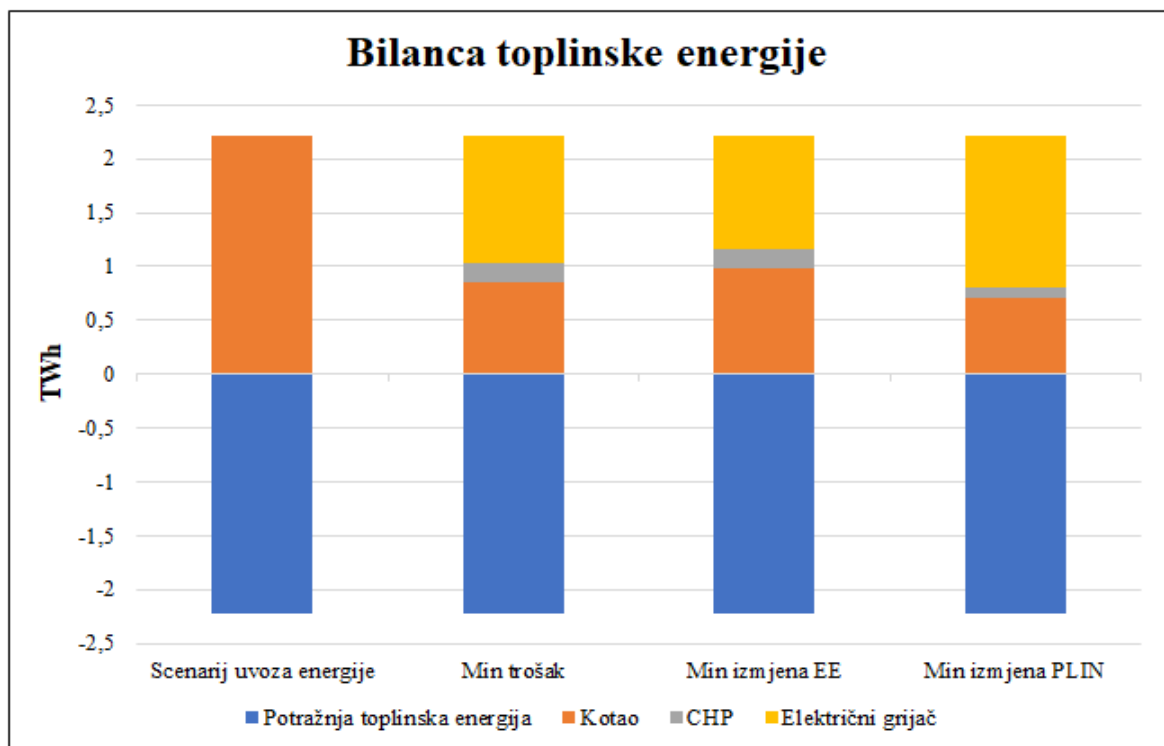


Slika 7-7. Satna proizvodnja vodika u elektrolizatoru

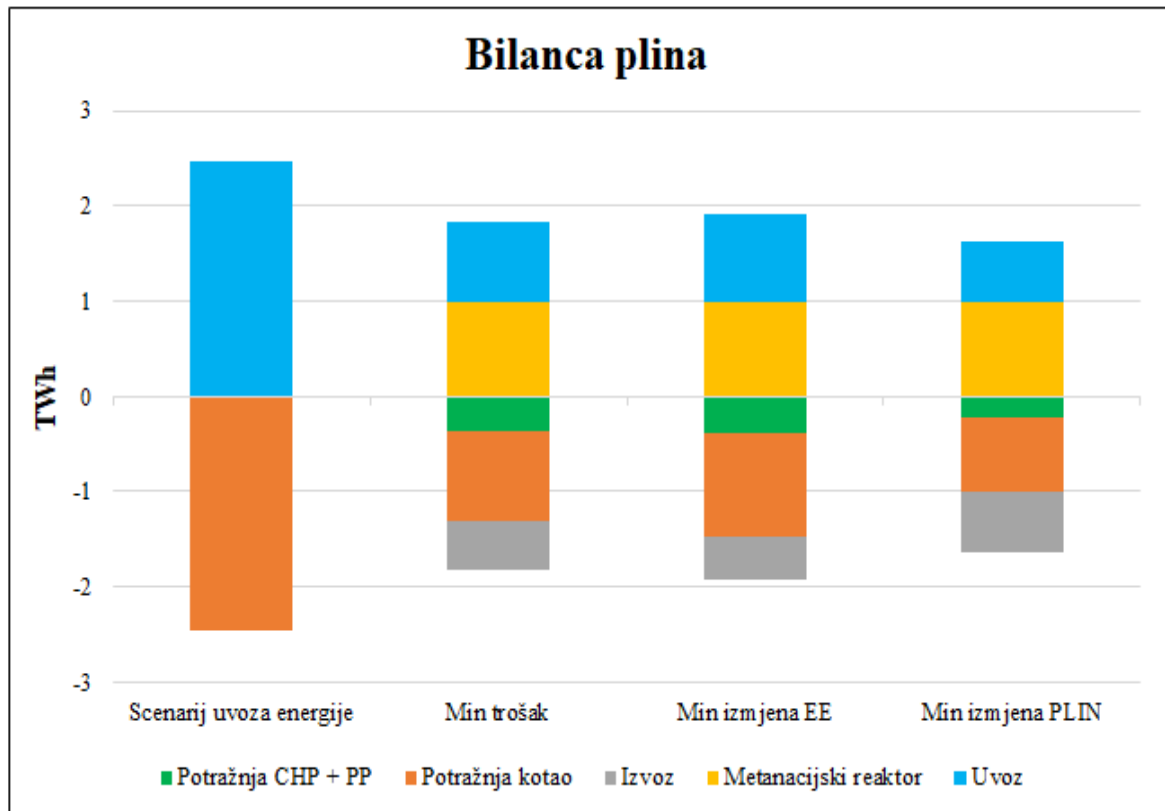
## 7.7. Skupna analiza energetskih tokova za odabrane slučajeve



Slika 7-8. Bilanca električne energije u scenarijima



Slika 7-9. Bilanca toplinske energije u scenarijima



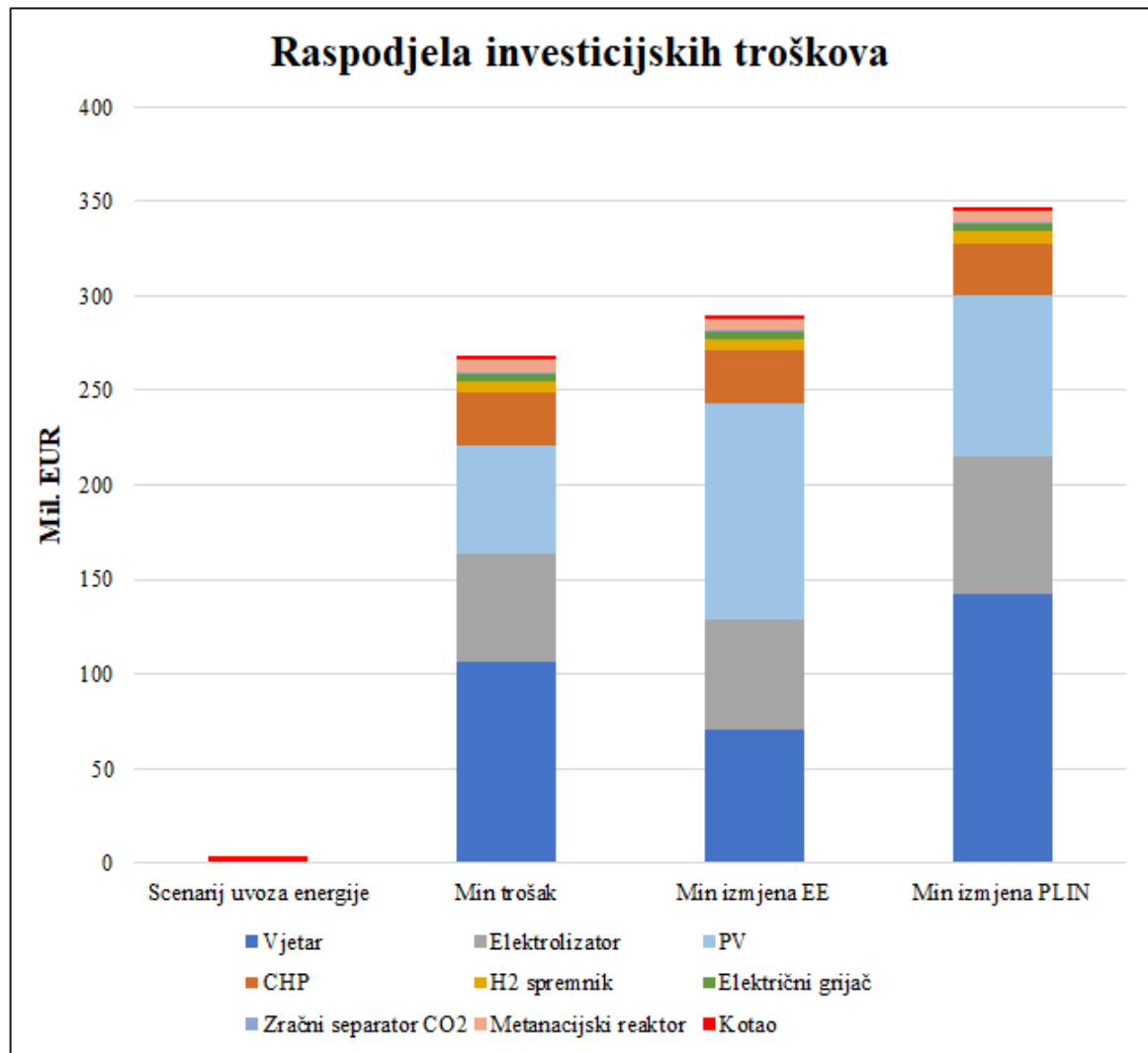
Slika 7-10. Bilanca plina u scenarijima

Na slikama su vidljive sve bilance energetske tokova. Za potrebe usporedbe stavljen je scenarij uvoza energije u kojem potpuno uvozimo električnu energiju i plin, bez vlastite proizvodnje. Kod Slike 7-8., u scenarijima minimalnog troška i minimalne izmjene plina najveći udio proizvodnje električne energije je iz vjetroelektrana, dok je u scenariju s minimalnom izmjenom električne energije to fotonaponska elektrana. Najveći potrošač električne energije u optimiziranim scenarijima je elektrolizator potreban za P2G proces. U scenariju uvoza energije potražnju za električnom energijom bilanciramo uvozom.

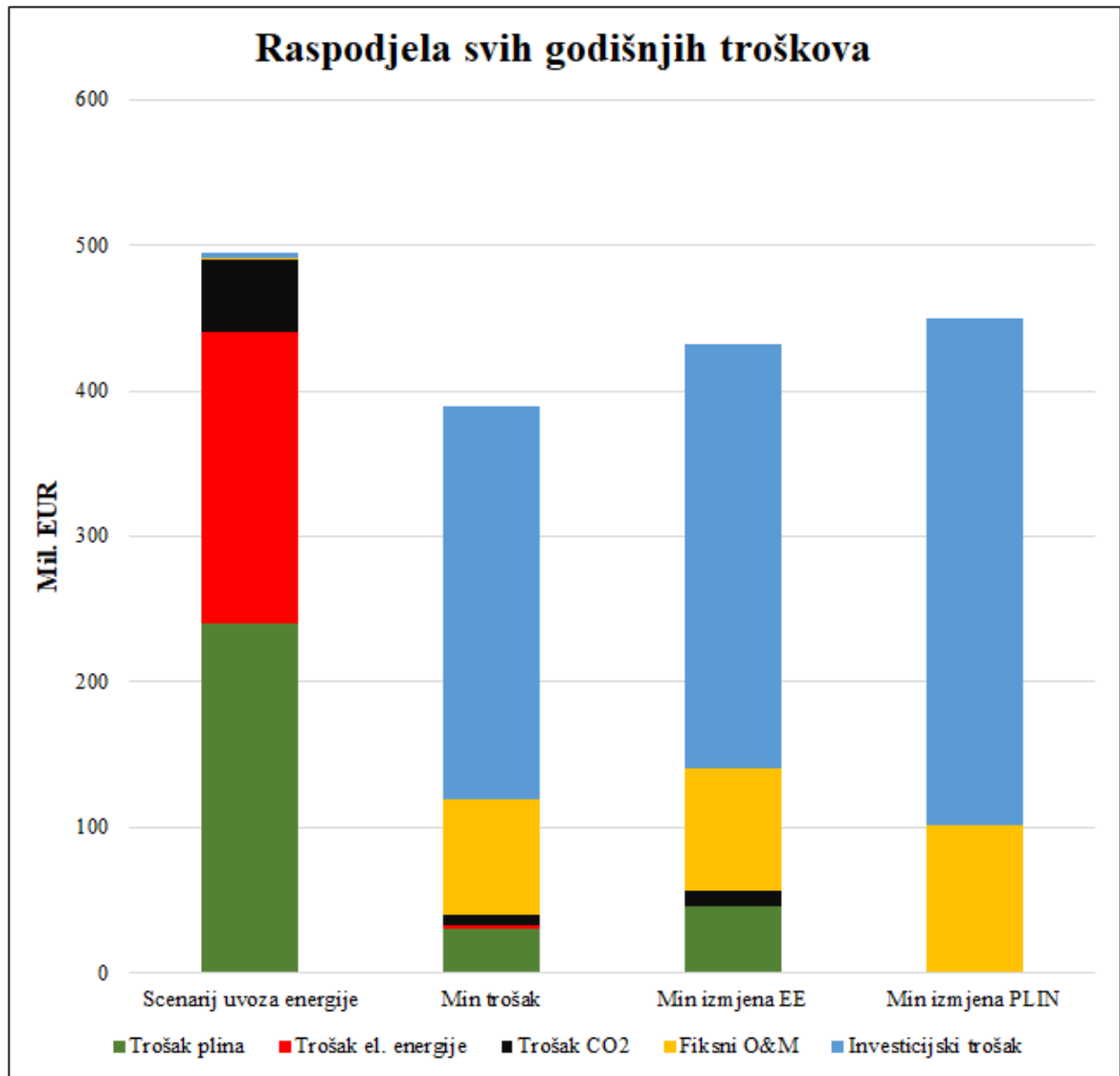
Za bilanciranje toplinske energije (Slika 7-9.), u scenariju uvoza energije koristi se kotao. U ostalim scenarijima, osim kotla veći udio zauzima električni grijač te manji udio zauzima kogeneracijsko postrojenje.

Bilanca plina za sve scenarije prikazana je na Slici 7-10. U optimiziranim scenarijima najveći potrošač plina je kotao te manji potrošač je kogeneracijsko postrojenje. Osim toga, prisutan je i izvoz viškova plina. Potražnja se pokriva korištenjem metanacijskog reaktora za proizvodnju sintetskog prirodnog plina te manjim udjelom uvoza.

## 7.8. Skupna analiza troškova za odabrane slučajeve



Slika 7-11. Raspodjela godišnjih investicijskih troškova za scenarije



Slika 7-12. Raspodjela svih godišnjih troškova za scenarije

Iz Slike 7-11. vidljivo je da su u scenarijima minimalnog troška i minimalne izmjene plina najveći investicijski trošak vjetroelektrane, koje u tim scenarijima najviše i proizvode električnu energiju zbog njihovog većeg udjela u instaliranoj snazi. Osim vjetroelektrana povećane investicije su fotonaponske elektrane i elektrolizatori. U scenariju s minimalnom izmjenom električne energije najveći investicijski trošak su fotonaponske elektrane koje u tom scenariju proizvode najviše električne energije zbog većeg udjela instalirane snage. Prisutan je također i trošak investicija u vjetroelektrane, elektrolizatore i kogeneracijsko postrojenje.

Svi godišnji troškovi scenarija prikazani su na Slici 7-12. Oni uključuju investicijske troškove, troškove rada i održavanja te varijabilne troškove, koji uključuju

trošak uvoza plina, električne energije i CO<sub>2</sub> emisija. Moguće je uočiti da se u dekarboniziranim scenarijima najveći dio troškova sastoji od investicijskog troška. Osim njega značajni udio je fiksni trošak rada i održavanja. U scenarijima minimalnog troška i minimalne izmjene električne energije prisutni su i troškovi plina zbog uvoza i CO<sub>2</sub> emisija. Može se uočiti da u scenariju uvoza energije, gdje nemamo nikakvu proizvodnju već se sve potrebe zadovoljavaju uvozom, najveći dio troškova upravo otpada na troškove uvoza plina i električne energije, čime ovaj scenarij ispada i najskuplji mogući oblik elektroenergetskog sustava. Takav sustav u budućnosti može postati i skuplji zbog većih cijena energenata, čime dekarbonizirani sustavi mogu profitirati zbog vlastite samodostatnosti bez potrebe za plaćanjem visokih cijena energenata.

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu prikazane su mogućnosti optimizacije elektroenergetskih sustava korištenjem *Power-to-Gas* procesa proizvodnjom vodika i sintetskog prirodnog plina. Implementacijom P2G tehnologija moguće je iskorištavanje viškova intermitentnih obnovljivih izvora energije u slučajevima kada nastaju kritični viškovi proizvedene električne energije koji zbog promjena napona i frekvencija negativno utječu na elektroenergetski sustav. Tada se ti proizvedeni viškovi mogu pomoću P2G tehnologije skladištiti u obliku kemijske energije proizvedenog vodika i metana. Potom se ti proizvedeni plinovi mogu koristiti u kućanstvima za grijanje i svim sektorima djelatnosti, za industriju, transport ili se mogu skladištiti u spremnike za kasniju upotrebu.

Prema Europskoj strategiji za vodik naglašeno je da je vodik presudan za postizanje ugljične neutralnosti EU-a do 2050. godine. No, s obzirom da je još uvijek malen udio vodika u korištenju, potreban je i rast uporabe. Glavni cilj strategije je ubrzanje razvoja niskougljičnog vodika odnosno vodika koji nastaje iz obnovljivih izvora energije. Za to će biti potrebno instalirati velike količine elektrolizatora koji će viškove električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije pohranjivati u obliku vodika.

Republika Hrvatska također svojom strategijom za vodik radi na vlastitoj dekarbonizaciji tako što promiče proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije. Potencijal za proizvodnju električne energije u Republici Hrvatskoj prvenstveno proizlazi iz potencijala za proizvodnju obnovljivih izvora energije. Strategija navodi da je u području zračnog i brodskog prometa moguće koristiti sintetska goriva (e-goriva) koja imaju potencijalno manje troškove logistike i veću gustoću energije u odnosu na komprimirani ili ukapljeni vodik te istovremeno koriste poznate tehnologije motora s unutrašnjim izgaranjem. Za sva ta ostvarenja potrebno je da se instalacija elektrolizatora ubrzano razvije za što će trebati značajne novčane investicije.

Iz scenarija prikazanih u radu vidljivo je da je moguće uravnoteženje energetske sustava primjenom P2G tehnologije. U scenarijima s minimalnom izmjenom električne energije i minimalnom izmjenom plina postignuta je 100% pokrivenost električne energije, odnosno 100% vlastite proizvodnje se uspjelo pokriti iz intermitentnih izvora izravnim korištenjem ili preko P2G procesa. U scenariju s najmanjom izmjenom plina postignuta je i potpuna pokrivenost plina, čime nije potreban uvoz plina. Time ovaj sustav pomaže da se

intermitentni izvori prebace u P2G i da tada dobiveni plin koristimo kada intermitentnih izvora nema.

Također su prikazani i troškovi optimizacijskih scenarija, gdje je vidljivo da je najskuplji trošak potpune optimizacije, ali u tom scenariju je postignuta 100%-tna pokrivenost električne energije i plina čime se uspijeva dobiti samodostatan elektroenergetski sustav.

Za daljnju budućnost korištenja P2G tehnologije i implementacije u elektroenergetske sustave uz naglašenost važnosti vodika potrebno je još uvijek istraživati i razvijati nove tehnologije za poboljšanje procesa. Nužno je povećati učinkovitost elektrolizatora i metanacije kako bi se poboljšala ukupna učinkovitost procesa. Predviđa se da će se daljnjim napretkom i učinkovitošću smanjiti investicijski troškovi i cijena zelenog vodika, čime će ovakvi projekti dobiti važnu ulogu u dekarbonizaciji nacionalnih energetske sustava.



## LITERATURA

1. AŠČIĆ, D., 2018., Implementacija P2G tehnologija u model elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske korištenjem softverskih alata EnergyPLAN i Python, diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
2. BANOVAČ E., PUDIĆ D., 2021., Dekarbonizacija energetskeg sustava uporabom vodika, Časopis Plin
3. DANISH ENERGY AGENCY AND ENERGINET, 2022., Technology Data - Energy Plants for Electricity and District heating generation
4. DEVARAJ D., DONNELLAN P., SYRON E., 2020., Synthetic natural gas production: production cost, key cost factors and optimal configuration
5. EIHP, 2021., Energija u Hrvatskoj; Godišnji energetskeg pregled; Ministarstvo zaštite okoliša i energetike
6. ENERGOVIZIJA D.O.O., 2021., Vodič za razvoj i provedbu projekata obnovljivih izvora energije u Hrvatskoj
7. ENERGYPLAN, 2022., Advanced analysis of smart energy systems, Version 16.1
8. EUROPEAN COMMISSION, 2019., Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. Brussels, COM(2019) 640.
9. GORRE J., LEONHARD R., MÖRS F., SCHLAUTMANN, R., 2020., Innovative large-scale energy storage technologies and power-to-gas concepts after optimisation, D5.9, Final report on evaluation of technologies and processes, STORE&GO
10. GORRE J., VAN LEEUWEN C., ORTLOFF F., 2019., Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage, Applied Energy
11. GRANITSIOTIS, G., 2017., Methanation of Carbon Dioxide, Experimental research of separation enhanced methanation of CO<sub>2</sub>, Technische Universiteit Delft

12. GRÜNIG, J., SCHAAF, T., SCHUSTER, R. M., ROTHENFLUH, T., ORTH A., 2014., Methanation of CO<sub>2</sub> - storage of renewable energy in a gas distribution system; SpringerOpen Journal
  13. HASHIMOTO K., IZUMIYA K., KATO Z., KUMAGAI N., TAKANO H., 2014., The production of renewable energy in the form of methane using electrolytic hydrogen generation; Energy, Sustainability and Society
  14. IEA, 2022., Direct Air Capture, IEA, Paris
  15. IKÄHEIMO J., KIVILUOMA J., LINDROOS J., PURSIHEIMO E., WEISS R., 2022., Impact of power-to-gas on the cost and design of the future low-carbon urban energy system, Applied Energy
  16. KUMAR S. S., HIMABINDU V., 2019. „Hydrogen production by PEM water electrolysis - A review“, Materials Science for Energy Technologies 2 (2019) 442 – 454
  17. LUND, H., THELLUFSEN, J.Z., 2021. EnergyPLAN: Advanced Energy Systems Analysis Computer Model
  18. MEGLIĆ I., 2022., Obnovljivi izvori energije u funkciji energetske neovisnosti Republike Hrvatske, završni rad. Zagreb: Ekonomski fakultet
  19. NARODNE NOVINE, br. 40/2022 (492). Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine. Zagreb: Narodne novine d.d.
  20. OTTEN R., 2014. The first industrial PtG plant – Audi e-gas as driver for the energy turnaround, CEDEC
- Web izvori:
21. ČEVDEK A., Elektroliza  
URL: <https://si.openprof.com/wb/elektroliza?ch=653> (05.11.2022.)
  22. DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD, Atlas vjetra Hrvatske  
URL: [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_hrvatska&param=k1\\_8](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1_8) (10.11.2022.)
  23. EUROSTAT, Electricity production capacities for renewables and wastes, 2020.

URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_inf\\_epcrw/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_inf_epcrw/default/table?lang=en)  
(10.11.2022.)

24. HELMETH, Integrated High-Temperature ELeCtrolysis and METHAnation for Effective Power to Gas Conversion: Methanation process

URL: <http://www.helmeth.eu/index.php/technologies/methanation-process> (11.11.2022.)

25. HEP d.o.o., 2022., Struktura izvora električne energije u 2021.

URL: <https://www.hep.hr/opskrba/trziste-elektricne-energije/trziste/izvori-energije/1385>  
(09.11.2022.)

26. HOPS, 2022., Vjetroelektrane u pogonu

URL: <https://www.hops.hr/vjetroelektrane> (10.11.2022.)

27. PATEL S., 2019., Why Power-to-Gas May Flourish in a Renewables-Heavy World

URL: [Why Power-to-Gas May Flourish in a Renewables-Heavy World \(powermag.com\)](http://www.powermag.com/Why-Power-to-Gas-May-Flourish-in-a-Renewables-Heavy-World/)  
(10.11.2022.)

28. RASMUSSEN H. ET AL., 2020. Roadmap and policy recommendations for power-to-gas in the EU up to 2050

URL: [https://www.storeandgo.info/fileadmin/downloads/deliverables\\_2020/20200713-STOREandGO\\_D8.10\\_DVGW\\_Roadmap\\_and\\_policy\\_recommendations\\_for\\_PtG\\_in\\_the\\_EU\\_up\\_to\\_2050.pdf](https://www.storeandgo.info/fileadmin/downloads/deliverables_2020/20200713-STOREandGO_D8.10_DVGW_Roadmap_and_policy_recommendations_for_PtG_in_the_EU_up_to_2050.pdf) (02.11.2022.)

29. SOCALGAS, 2019. POWER-TO-GAS TECHNOLOGY

URL: [https://www.socalgas.com/sustainability/renewable-gas/power-to-gas?\\_cf\\_chl\\_jschl\\_tk\\_=gqvMLztKPZl6MaO9cuRYudpwY365aVke3zlEYVAYasI-1639903028-0-gaNycGzNCb0](https://www.socalgas.com/sustainability/renewable-gas/power-to-gas?_cf_chl_jschl_tk_=gqvMLztKPZl6MaO9cuRYudpwY365aVke3zlEYVAYasI-1639903028-0-gaNycGzNCb0) (02.11.2022.)

30. STORE&GO, The STORE&GO demonstration site at Falkenhagen, Germany

URL: <https://www.storeandgo.info/demonstration-sites/germany/> (10.11.2022.)

31. SVJETSKA BANKA, PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL

URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/croatia> (10.11.2022.)

32. UN, 2022., Renewable energy – powering a safer future

URL: <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

(15.11.2022.)

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, pod nadzorom mentora, koristeći se navedenom literaturom.

A handwritten signature in black ink, reading "Marin Njirić", written over a horizontal line.

Marin Njirić



KLASA: 602-01/22-01/215  
URBROJ: 51-70-12-22-2  
U Zagrebu, 09.12.2022.

**Marin Njirić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/215, URBROJ: 51-70-12-22-1 od 25.11.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### Optimiranje strukture energetskog sustava za proizvodnju sintetskog plina korištenjem programa EnergyPLAN

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv. prof. dr. sc. Luka Perković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Luka Perković

(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)