

# Simulacija proizvodnje sintetskog prirodnog plina za potrebe dekarbonizacije energetskeg sustava Republike Hrvatske

---

Zgombić, Franko

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:169:639262>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

**SIMULACIJA PROIZVODNJE SINTETSKOG PRIRODNOG PLINA  
ZA POTREBE DEKARBONIZACIJE ENERGETSKOG SUSTAVA  
REPUBLIKE HRVATSKE**

Diplomski rad

Franko Zgombić

N 348

Zagreb, 2021

SIMULACIJA PROIZVODNJE SINTETSKOG PRIRODNOG PLINA ZA POTREBE  
DEKARBONIZACIJE ENERGETSKOG SUSTAVA REPUBLIKE HRVATSKE

FRANKO ZGOMBIĆ

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

Sažetak

Obnovljivi izvori koji sve brže istiskuju fosilne izvore energije iz uporabe uvelike ovise o vremenskim uvjetima i ne mogu uvijek osigurati sigurnu opskrbu energijom. Stoga, da bi se osigurale sve potrebe, energetske sustavi moraju biti vrlo fleksibilni. U praksi se sve češće obnovljivi izvori energije integriraju s konvencionalnim energetske postrojenjima i to prvenstveno s onima gdje je prirodni plin energent. U ovom će radu biti prikazana integracija bioplina i fotonaponskih sustava kao obnovljivih izvora te prirodnog plina kao konvencionalnog fosilnog energenta koji međusobnim nadopunjavanjem mogu stvoriti temelj za dekarbonizaciju energetske sustava RH i to prvenstveno transportnog sektora.

Ključne riječi: sintetski prirodni plin, dekarbonizacija, bioplin, fotonaponski sustavi

Diplomski rad sadrži: 42 stranice, 8 tablica, 23 slike, 26 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko – geološko – naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

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

Ocjenjivači: Dr.sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf  
Dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar, redoviti profesor RGNf  
Dr.sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNf

Datum i mjesto obrane: 17.09.2021., Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SYNTHETIC NATURAL GAS PRODUCTION SIMULATION FOR THE NEEDS OF  
DECARBONIZATION OF ENERGY SYSTEM OF REPUBLIC OF CROATIA

FRANKO ZGOMBIĆ

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

Renewables, which are increasingly displacing fossil fuels from use, are highly weather-dependent and cannot always ensure a secure energy supply. Therefore, to meet all needs, energy systems must be very flexible. In practice, renewable energy sources are increasingly being integrated with conventional energy plants, primarily with those where natural gas is the energy source. This paper will present the integration of biogas and photovoltaic systems as renewable sources and natural gas as a conventional fossil energy source, which by complementing each other can create a basis for decarbonization of the energy system of the Republic of Croatia, primarily the transport sector.

Keywords: synthetic natural gas, decarbonization, biogas, photovoltaic systems

Thesis contains: 42 pages, 8 tables, 23 figures, 26 references

Original in: Croatian

Archived at: 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

Date and place of defense: September 17<sup>th</sup>, 2021, Faculty of Mining, Geology and  
Petroleum Engineering, University of Zagreb

*Zahvaljujem se svom mentoru izv.prof. dr. sc. Luki Perkoviću na pomoći i savjetima tijekom pisanja ovog rada.*

*Također, zahvaljujem se svojim roditeljima, Oriani i Zdenku, na potpori tijekom studiranja i cjelokupnog školovanja.*

## SADRŽAJ

<b>I. POPIS SLIKA .....</b>	<b>I</b>
<b>II. POPIS TABLICA .....</b>	<b>II</b>
<b>III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA, SKRAĆENICA I JEDINICA.....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. POWER – TO – GAS TEHNOLOGIJA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Power – to – H <sub>2</sub> tehnologija .....	6
2.2. Power – to – SNG tehnologija.....	6
<b>3. GLOBALNI I HRVATSKI POTENCIJAL ZA PROIZVODNJU SNG – A KORIŠTENJEM SOLARNE ENERGIJE I BIOPLINA .....</b>	<b>9</b>
3.1. Solarna energija u svijetu i Republici Hrvatskoj.....	9
3.2. Bioplin u svijetu i Republici Hrvatskoj .....	11
<b>4. PROIZVODNJA SNG-A ZA POTREBE DEKARBONIZACIJE RH.....</b>	<b>14</b>
4.2. Simulacija proizvodnje SNG – a.....	15
4.2.1. Električna energija .....	15
4.2.2. Proizvodnja i pohrana vodika.....	20
4.2.3. Toplinska energija.....	22
4.2.4. Bioplin .....	26
4.2.5. Prirodni i sintetski prirodni plin .....	26
<b>5. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJE.....</b>	<b>31</b>
5.1. Analiza s obzirom na dekarbonizaciju transportnog sektora RH.....	31
5.2. Analiza s obzirom na učinkovitost i „obnovljivost“ samog procesa .....	32
5.3. Sankeyevi dijagrami .....	34
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>39</b>
<b>7. LITERATURA.....</b>	<b>40</b>

## I. POPIS SLIKA

<b>Slika 1-1.</b> Kretanje emisija CO <sub>2</sub> u RH po sektorima 2000. - 2018.....	2
<b>Slika 1-2.</b> Emisije CO <sub>2</sub> (g/km) u cestovnom prometu u RH 1990. - 2018.....	3
<b>Slika 1-3.</b> Usporedba emisija CO <sub>2</sub> vozila na navedene pogone .....	4
<b>Slika 2-1.</b> Shema Power - to Gas tehnologije.....	5
<b>Slika 2-2.</b> Pojednostavljena shema proizvodnje SNG – a.....	8
<b>Slika 3-1.</b> Prosječna godišnja insolacija (kWh/m <sup>2</sup> ) u RH .....	10
<b>Slika 3-2.</b> Proizvodnja električne energije u RH iz solarnih sustava 2012. - 2019. ....	10
<b>Slika 3-3.</b> Odnos proizvodnje bioplina u svijetu .....	12
<b>Slika 3-4.</b> Proizvodnja bioplina u RH 2010. - 2019.....	12
<b>Slika 3-5.</b> Projekcija korištenja bioplina u budućnosti.....	13
<b>Slika 4-1.</b> Izgled glavnog sučelja programa EnergyPLAN .....	14
<b>Slika 4-2.</b> Proizvodnja električne energije kroz godinu (8784 sati) .....	17
<b>Slika 4-3.</b> Korištenje proizvedene električne energije kroz godinu (8784 sati).....	19
<b>Slika 4-4.</b> Prikaz skladištenja vodika tijekom godine (8784 sati) .....	21
<b>Slika 4-5.</b> Proizvodnja toplinske energije tijekom godine (8784 sati).....	23
<b>Slika 4-6.</b> Korištenje proizvedene toplinske energije kroz godinu (8784 sati) .....	25
<b>Slika 4-7.</b> Proizvodnja SNG - a i uvoz prirodnog plina tijekom godine (8784 sati) .....	27
<b>Slika 4-8.</b> Korištenje SNG - a i prirodnog plina kroz godinu (8784 sati) .....	29
<b>Slika 4-9.</b> Konačna bilanca energije .....	30
<b>Slika 5-1.</b> Usporedba udjela OIE u proizvodnji energije te prikaz učinkovitosti cijelog procesa.....	34
<b>Slika 5-2.</b> Sankeyev dijagram energetske tokova za cijelu godinu.....	35
<b>Slika 5-3.</b> Sankeyev dijagram za 4427. sat u godini .....	37
<b>Slika 5-4.</b> Sankeyev dijagram za 372. sat u godini .....	38

## **II. POPIS TABLICA**

<b>Tablica 3-1.</b> Usporedba svojstava prirodnog plina i bioplina .....	13
<b>Tablica 4-1.</b> Godišnja bilanca proizvodnje električne energije.....	16
<b>Tablica 4-2.</b> Godišnja bilanca potrošnje električne energije .....	18
<b>Tablica 4-3.</b> Godišnja bilanca proizvodnje toplinske energije.....	22
<b>Tablica 4-4.</b> Godišnja bilanca potrošnje toplinske energije.....	24
<b>Tablica 4-5.</b> Godišnja bilanca dobave plina (SNG + prirodni plin) .....	26
<b>Tablica 4-6.</b> Godišnja bilanca potrošnje SNG - a i prirodnog plina.....	28
<b>Tablica 5-1.</b> Prikaz mogućeg smanjenja emisija CO <sub>2</sub> uvođenjem SNG - a umjesto konvencionalnih goriva u transportni sektor.....	32



### III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA, SKRAĆENICA I JEDINICA

CHP – kogeneracijsko postrojenje (engl. *Combined Heat and Power*)

CTS – centralni toplinski sustav (područno grijanje)

GWh – gigavatsat

GWh<sub>e</sub> – gigavatsat električne energije

GWh<sub>h</sub> – gigavatsat toplinske energije

Mt – megatona

MW – megavat

OIE – obnovljivi izvori energije

PES – opskrba primarnim izvorima energije (engl. *Primary Energy Supply*)

PP – elektrana (engl. *Power Plant*)

PtG – transformacija električne energije u plin (engl. *Power – to Gas*)

PtH<sub>2</sub> – transformacija električne energije u vodik (engl. *Power – to H<sub>2</sub>*)

PtSNG – transformacija električne energije u sintetski prirodni plin (engl. *Power – to SNG*)

PV – fotonaponski sustav (engl. *Photovoltaic*)

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

TWh - teravatsat

V – volt

## 1. UVOD

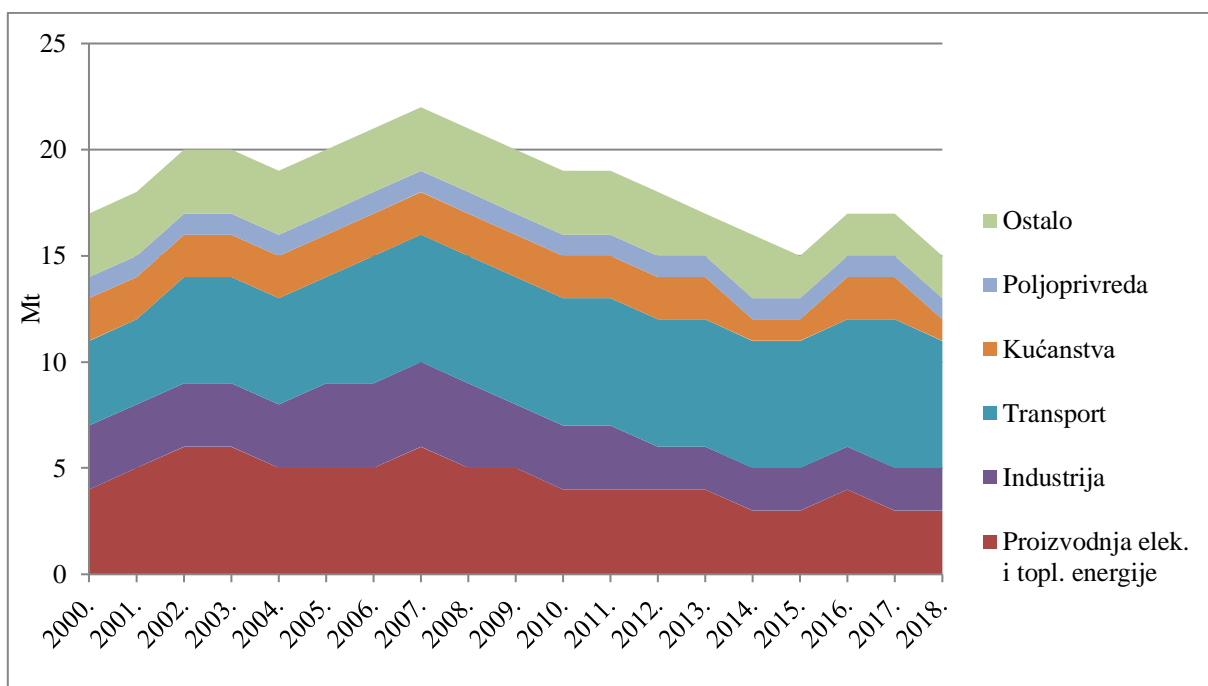
Prijelaz na održivu i u potpunosti zelenu energiju do 2050. godine predstavlja iznimno zahtjevan i kompleksan izazov za Europu i sve njezine građane. Jedini način da se to uspješno ostvari je potpuni zaokret energetske politike i prelazak s fosilnih izvora energije na obnovljive izvore. Činjenica je da je to uistinu težak zadatak koji će tražiti sinergiju kako svih država članica na političkoj razini, tako i svih ekonomskih i energetske sektora na gospodarskoj razini. Poznato je da na porast količine CO<sub>2</sub> u atmosferi utječe čitav niz ljudskih djelatnosti počevši od industrije, preko proizvodnje električne i toplinske energije do transporta i mnogih drugih.

Sve brži prodor obnovljivih izvora energije (OIE) u energetske sustave i njihova interakcija s konvencionalnim postrojenjima za proizvodnju energije vjerojatno će povećati složenost današnjih energetske sustava. U svijetu se postupno stavlja naglasak na optimizaciju integriranih energetske sustava s obzirom na promjenu tržišnih uvjeta. Tako se na primjer, u Europi počinju javljati sustavi koji povezuju energiju vjetra, hidroenergiju i fotonaponske (engl. *Photovoltaic*, PV) sustave s energetske postrojenjima na biomasu ili prirodni plin. Opskrba energijom iz većine energetske sustava temeljenih na obnovljivim izvorima energije ne osigurava neprekidnost i stabilnost jer ponajviše ovisi o vremenskim uvjetima. Stoga fleksibilnost sustava igra važnu ulogu u stvaranju ravnoteže između ponude i potražnje za energijom. Integracija različitih energetske izvora i tehnologija za proizvodnju i pretvorbu energije, uključujući obnovljive izvore i konvencionalna energetske postrojenja, razvila se u novi pristup koji jamči povećanu fleksibilnost sustava. Kogeneracijska postrojenja (engl. *Combined Heat and Power*, CHP) na biomasu ili prirodni plin najčešća su vrsta termoelektrana koje se koriste u EU za kogeneraciju topline i energije. Integracija obnovljivih izvora i kogeneracijske postrojenja sa sustavima za pohranu energije može povećati fleksibilnost sustava. Danas se smatra kako integracija ovih tehnologija postaje sve lakše tehnički izvediva i ekonomski sve prihvatljivija. Međutim, primjena ovih tehnologija također može rezultirati promjenama u radu postojećih postrojenja za proizvodnju i pretvorbu energije i uvozom električne energije u sustave.

Ovaj se diplomski rad usredotočuje na ulogu CHP postrojenja na bazi prirodnog plina i proizvodnje sintetskog prirodnog plina u pružanju fleksibilnosti elektroenergetskom sustavu i pridonosenju procesu dekarbonizacije energetske, točnije transportnog sektora

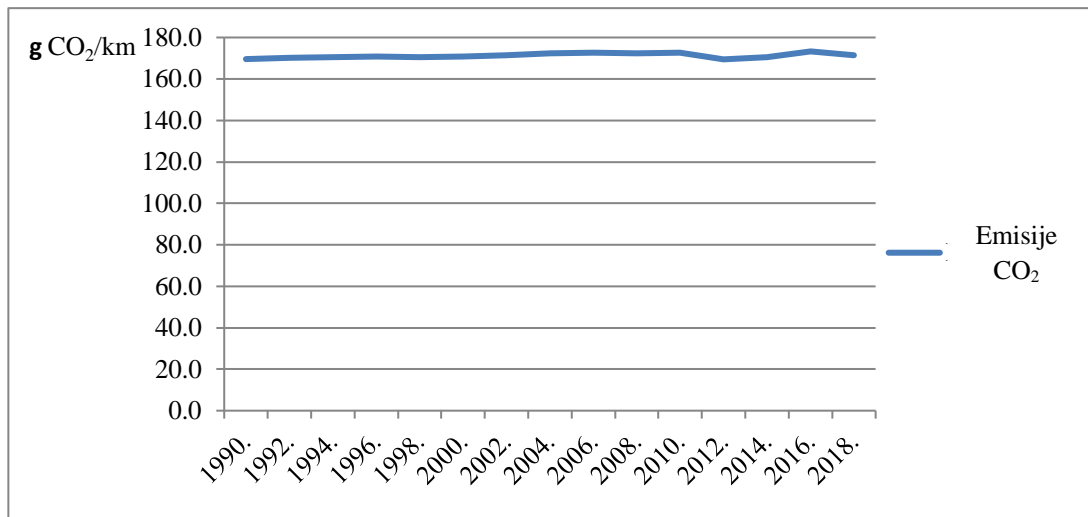
Republike Hrvatske (u daljnjem tekstu RH). Drugim riječima, razmotrit će se mogućnost integracije tehnologije Power – to – SNG u energetske sustav RH kada je prisutno CHP postrojenje zajedno s PV sustavom.

RH, kao zemlja članica Europske unije dužna je pratiti sve regulative i smjernice donesene od strane nadležnih tijela. Konkretno, u RH najveće količine CO<sub>2</sub> emitira sektor transporta. 2018. godine ukupna količina emitiranog CO<sub>2</sub> u atmosferu iznosila je nešto iznad 15 Mt. Od toga čak 6 Mt, odnosno 40%, proizveo je sektor transporta. Drugi sektor po količini emitiranog CO<sub>2</sub> je onaj vezan uz proizvodnju električne i toplinske energije, no taj je iznos ipak manji i 2018. godine se kretao oko 3 Mt, dakle dvostruko manja količina u odnosu na transportni sektor (IEA, 2020e). Preostalih 20 – ak % emisija otpada na grijanje i hlađenje, poljoprivredu, industriju i ostalo (Slika 1-1.).



**Slika 1-1.** Kretanje emisija CO<sub>2</sub> u RH po sektorima 2000. - 2018. (IEA, 2020a)

Iz ovih podataka jasno se može pretpostaviti da bi sektor transporta u narednim desetljećima trebao biti najpodložniji promjenama u kontekstu dekarbonizacije, odnosno da ovdje postoji najviše prostora za napredak. U Hrvatskoj emisije koje dolaze iz ovog sektora već desetljećima ostaju relativno podjednake (Slika 1-2.). To jasno govori kako se cestovni transportni sektor vrlo sporo ili gotovo uopće ne dekarbonizira.

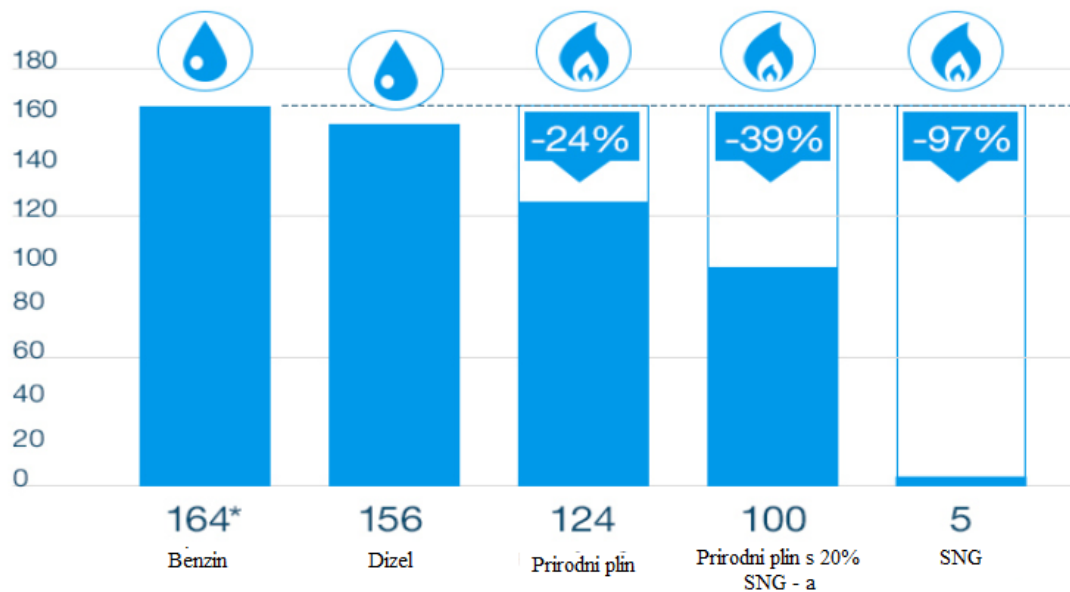


**Slika 1-2.** Emisije CO<sub>2</sub> (g/km) u cestovnom prometu u RH 1990. - 2018. (IEA, 2020a)

Vidljivo je iz gornje slike kako se emisije CO<sub>2</sub> u cestovnom transportu zadnjih 30 – ak godina konstantno kreću oko iznosa od 170 g/km bez značajnijih oscilacija

Međutim, teško je očekivati da Hrvatska može provesti brzu i učinkovitu dekarbonizaciju transportnog sektora. Naravno, najveći razlog je taj što ne postoji dovoljno razvijena i raširena infrastruktura za ubrzanje elektrifikacije, ali i hrvatski životni standard teško može omogućiti građanima prijelaz na električna vozila koja su trenutno i dalje prilično skupa. Međutim, kao privremeno i tranzicijsko rješenje nudi se prirodni plin. Od svih fosilnih energenata, prirodni plin je svakako ekološki najprihvatljiviji i može se reći da ima svjetliju budućnost u odnosu na naftu i ugljen. Problem s prirodnim plinom se javlja u činjenici da su njegove rezerve u RH pri kraju, te se javlja sve veća ovisnost za njegovim uvozom. Potencijalno rješenje se javlja u obliku sintetskog prirodnog plina.

Inače, vozila na plinski pogon, osim što emitiraju manje štetnih plinova u atmosferu, stvaraju i čak do 50% manju buku u odnosu na benzinska i dizelska (Pickering, 2019). Nadalje, prema nekim istraživanjima, u nekim slučajevima vozila u kojima je pogon SNG, teoretski mogu ispuštati čak i do 97% manje CO<sub>2</sub> u odnosu na benzinska vozila (Wingas, 2019) (Slika 1-3.).



**Slika 1-3.** Usporedba emisija CO<sub>2</sub> vozila na navedene pogone (Wingas, 2019)

Sintetski prirodni plin osim što bi omogućio početak dekarbonizacije transporta u RH, kao energent ima još čitav niz prednosti:

- Kroz Power – to – Gas tehnologiju nudi mogućnost pohrane suviška električne energije dobivene iz obnovljivih izvora (posebice iz solarnih sustava tijekom ljetnih mjeseci)
- Iskorištavanje potencijala bioplina za nadogradnjom koji bi tako poslužio kao izvor CO<sub>2</sub> za proizvodnju sintetskog prirodnog plina
- Mogućnost iskorištavanja otpadne topline u različite svrhe koja nastaje kao nusprodukt tijekom stvaranja SNG-a
- Smanjenje uvoza prirodnog plina koji će i dalje biti vrlo važan energent unatoč globalnim energetske trendovima i najavama

U ovome će radu biti definirane i objašnjene PtG tehnologije kao takve, predstavljen potencijal koji RH ima za razvoj jedne tehnologije poput PtSNG – a, ali, provest će se i analizirati simulacija jednog takvog energetske zahvata u hrvatskim okvirima koji uključuje CHP postrojenje i PV sustav, te će na kraju biti prikazana učinkovitost i „obnovljivost“ samog procesa. Za potrebe simulacije korišten je program EnergyPLAN, dok su dobiveni rezultati obrađeni i kasnije analizirani u Microsoft Excelu.

## 2. POWER – TO – GAS TEHNOLOGIJA

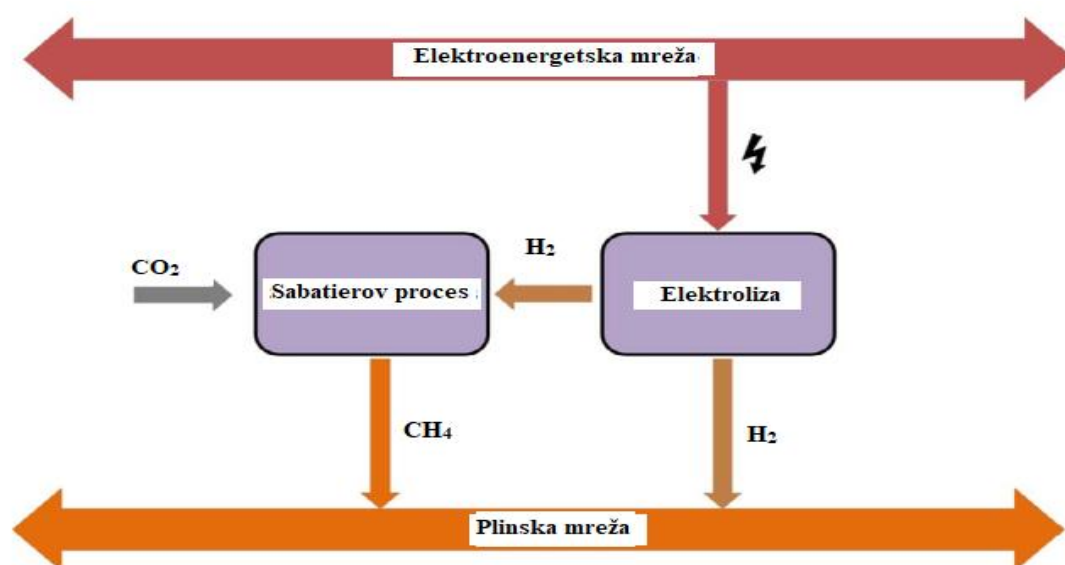
Pohrana energije u obliku Power – to – Gas tehnologije predstavlja poveznicu između sektora električne energije i plinskog sektora na način da omogućava pretvorbu električne energije dobivene iz obnovljivih izvora u kemijsku energiju vodika ili SNG – a. Ta se energija onda dalje koristi ovisno o potrebi, bilo da se radi o reelektrifikaciji, grijanju ili transportu. Kraće rečeno, PtG tehnologija nudi rješenje problema vezanog za neusklađenosti između proizvodnje i potražnje za električnom energijom (Guilera et al, 2018).

Tehnološki gledano, PtG nudi dvije ključne mogućnosti za današnje energetske sustave:

- Skladištenje suviška električne energije generiranog iz obnovljivih izvora energije
- Prijenos energije, korištenjem postojećih mreža za transport i distribuciju prirodnog plina umjesto korištenja prilično zagušene mreže električne energije.

Mnoge ranije studije (Guilera et al, 2018 i Balan et al, 2016) potvrđuju Power – to – Gas kao prihvatljivo, ali i tehnički složeno rješenje koje je sposobno osigurati dostatne kapacitete za pohranu i stvoriti novi važan stupanj fleksibilnosti energetskog sustava. U literaturi, kao i u praksi, najpoznatije su dvije PtG tehnologije (Slika 2-1.):

- Power – to – Hydrogen (PtH<sub>2</sub>)
- Power – to – Synthetic Natural Gas (PtSNG).



Slika 2-1. Shema Power - to Gas tehnologije (Guilera et al, 2018)

## 2.1. Power – to – H<sub>2</sub> tehnologija

PtH<sub>2</sub> tehnologija predstavlja onu manje tehnički složenu varijantu. Ona podrazumijeva da se vodik dobiven procesom elektrolize pomoću električne energije iz obnovljivih izvora (tzv. „zeleni“ vodik) koristi kao samostalan energent ili se pak utiskuje u mrežu prirodnoga plina. Međutim, ovdje postoji otežavajuća okolnost u tome što je količina vodika koja se može utisnuti u mrežu vrlo ograničena. Hipotetski, dozvoljeni udio vodika kreće se u iznosima 7 – 20%, ali se ipak preporučuju i prakticiraju udjeli 2 – 7%. Tako na primjer, u Njemačkoj se taj udio zaustavlja na samo 2%, u Nizozemskoj 12%, a u Francuskoj 6%. Najveći problem se javlja kod strojeva i uređaja na plinski pogon, poput vozila, turbina i kompresora, koji mogu biti posebno osjetljivi na vodik u prirodnom plinu (Balan et al, 2016). Vodik kao samostalni energent danas u svijetu i Europi još nije potpuno zaživio, iako njegovo korištenje iz godine u godinu značajno raste. Također, treba naglasiti da danas 95% posto proizvedenog vodika u svijetu dolazi iz fosilnih izvora (prirodni plin i ugljen), odnosno radi se o „sivom“ i „plavom“ vodiku, dok na „zeleni“ vodik otpada preostalih 5% (Jurgensen, 2015). Ipak što se tiče budućih projekcija, očekuje se da će do 2050. godine globalni potencijal „zelenog“ vodika narasti na čak 5277 TWh ili 135 Mt godišnje.

## 2.2. Power – to – SNG tehnologija

PtSNG tehnologija se smatra tehnički složenijom od PtH<sub>2</sub>. Ovdje se osim vodika, u proces uključuje i CO<sub>2</sub>. Ova tehnologija osigurava veliku energetska fleksibilnost i, za razliku od utiskivanja vodika u plinsku mrežu, ovdje uglavnom ne postoje ograničenja što se tiče dozvoljene koncentracije SNG – a u plinskoj mreži. Nakon što se osigura izvor CO<sub>2</sub> (npr. ugljen ili bioplin), on se upušta u reakciju s vodikom, odnosno događa se proces biološke ili kemijske metanacije (Sabatierov proces) (Balan et al, 2016).

Cijeli postupak proizvodnje SNG – a može se podijeliti u četiri faze (Slika 2-2.):

### 1) Alkalna elektroliza vode

Ovaj način razdvajanja vode na vodik i kisik pomoću alkalnih elektrolizera smatra se najzrelijom tehnologijom te se odvija pri relativno niskoj temperaturi 60 – 90 °C. Konvencionalni elektrolizeri ovog tipa rada pri naponu od 1,8 V do 2,2 V (Šarčević, 2020).

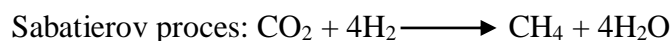
Postupak je vrlo učinkovit, a troškovi su relativno niski. Tijekom procesa stvaraju se znatne količine tzv. otpadne topline koja se dalje može preusmjeriti u anaerobni digester ili u sustave za područna grijanja. Učinkovitost ovih elektrolizera obično seže do 70-80% (Sveinbjörnsson i Münster, 2017). Inače, alkalni elektrolizeri imaju relativno niske kapitalne troškove u odnosu na ostale dvije vrste (PEM i SOEC). Još jedna im je prednost to što imaju vrlo dugačak životni vijek (Šarčević, 2020). Važno je napomenuti i da voda koja u sljedećim fazama procesa nastaje kao nusprodukt, se može ponovno iskoristiti u elektrolizeru, odnosno stvara se svojevrsni zatvoreni krug vode u procesu te se time troškovi znatno smanjuju.

## 2) Osiguravanje izvora CO<sub>2</sub>, transport i kompresija

Kao izvori CO<sub>2</sub> za postupak metanacije najčešće se koriste ugljen i bioplin. Međutim, s obzirom da ugljen kao energent postaje sve manje poželjan i prihvatljiv, bioplin kao obnovljivi energent se smatra znatno boljom i „zelenijom“ opcijom. Bioplin koji se sastoji većinom od CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub> dobiva se anaerobnom digestijom u digesteru. Proces se obično odvija na temperaturi 35 – 55 °C. Dobivena smjesa plinova se komprimira na tlak od 10 bar i usmjerava u reaktor za metanaciju (Guilera et al, 2018).

## 3) Postupak metanacije u reaktoru

Sinteza CO<sub>2</sub> i vodika može se ostvariti na dva načina: biološkom i kemijskom metanacijom. Biološka metanacija podrazumijeva niže temperature i tlakove u odnosu na kemijsku. U ovoj simulaciji se ipak primijenila kemijska, upravo iz razloga što je prilično egzotermna te se toplina koja se oslobađa tijekom procesa može dalje koristiti kao energija i tako se povećava učinkovitost cijelog procesa. Kemijska metanacija, poznata i kao Sabatierov proces, u reaktoru se odvija na temperaturi 300 – 400 °C i tlaku 4 – 20 bar uz prisutnost katalizatora. Osim SNG – a kao primarnog produkta i topline kao nusprodukt se javlja i voda. (Jurgensen, 2015).

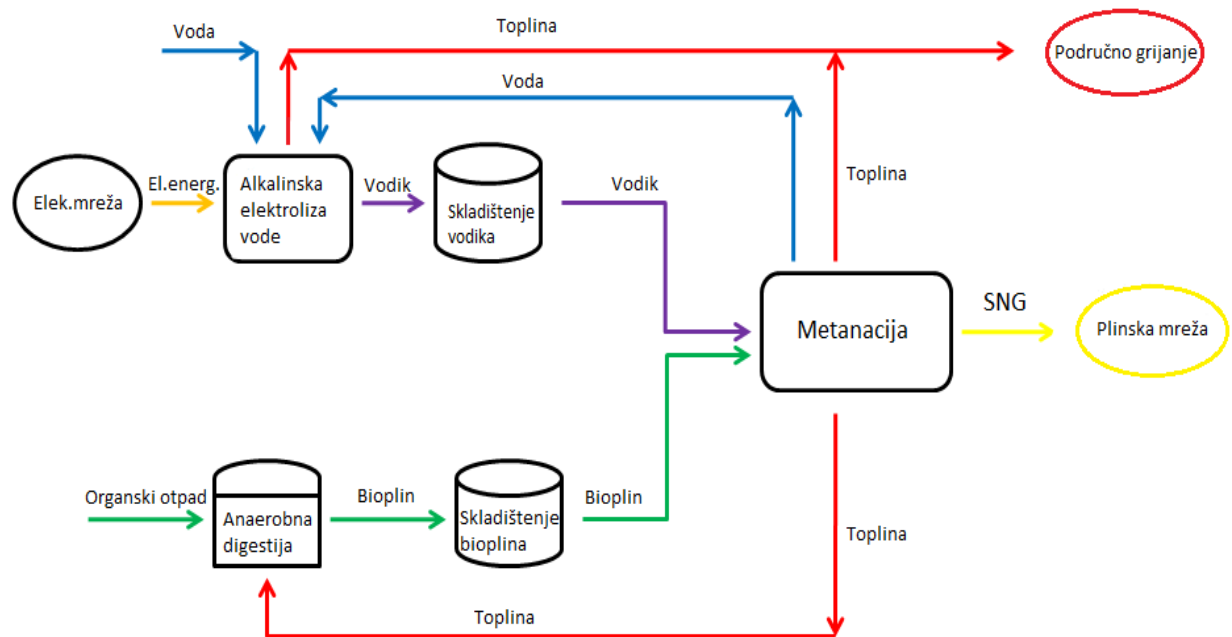


Također je važno napomenuti da u reakciji sudjeluje isključivo CO<sub>2</sub> iz bioplina, dok CH<sub>4</sub> izlazi iz procesa nepromijenjen u odnosu na stanje prije ulaska u reaktor.



#### 4) Komprimiranje SNG – a i puštanje u plinsku mrežu

Na kraju procesa kemijske metanacije SNG se nalazi na tlaku 8 – 10 bar. Taj se tlak treba povećati na iznos ovisno o tome gdje će plin dalje usmjeravati. Na primjer, za utiskivanje u plinsku mrežu tlak će biti potrebno povećati na otprilike 60 bar, a ukoliko se radi o nekoj manjoj mreži, taj će tlak ipak biti nešto manji (Guilera et al, 2018).



**Slika 2-2.** Pojednostavljena shema proizvodnje SNG – a (Sveinbjörnsson i Münster, 2017)

Dakle, za proizvodnju sintetskog prirodnog plina ključna su dva čimbenika: dostatne količine električne energije i stabilan izvor CO<sub>2</sub>. U ovom radu fokus će biti na električnoj energiji dobivenoj iz PV sustava te na bioplinu kao izvoru CO<sub>2</sub>. Razlog tomu ponajviše je činjenica da Republika Hrvatska ima vrlo velik broj sunčanih dana u godini te samim time znatan potencijal, dok je bioplin kao obnovljivi energent u Europi u porastu i smatra se važnim faktorom u procesu dekarbonizacije europske energetike.

### **3. GLOBALNI I HRVATSKI POTENCIJAL ZA PROIZVODNJU SNG – A KORIŠTENJEM SOLARNE ENERGIJE I BIOPLINA**

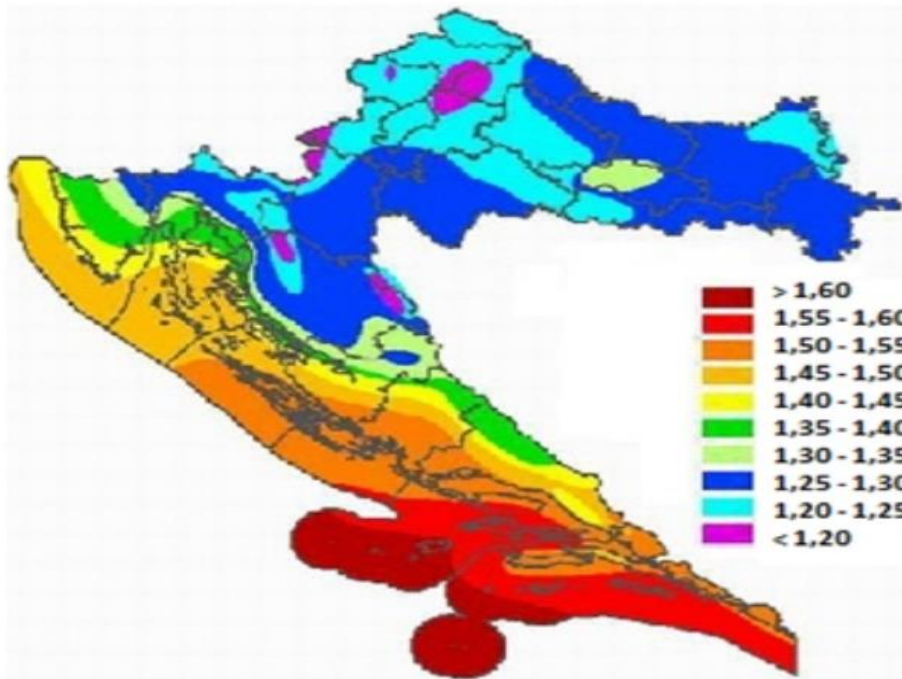
#### **3.1. Solarna energija u svijetu i Republici Hrvatskoj**

Solarna se energija, uz energiju vjetra, smatra jednom od ključnih faktora u planu ostvarivanja klimatski neutralne Europe do 2050. godine. Jedna od najpoznatijih i najraširenijih solarnih tehnologija svakako su fotonaponski sustavi. Ti sustavi omogućavaju direktnu pretvorbu Sunčeve svjetlosti u električnu energiju. Fotonaponski sustavi danas se koriste na svim razinama, od malih uređaja i kućanstava do većih postrojenja (Energy.gov, 2018).

Fotonaponski sustavi predstavljaju poluvodičke uređaje koji pretvaraju sunčevu energiju izravno u električnu putem fotoelektričnog efekta. U praksi se obično više članaka povezuje u grupu čime se stvara fotonaponska ćelija, a više fotonaponskih ćelija čini jedan fotonaponski modul ili solarni panel ili fotonaponsku ploču. Kada se poveže više sunčevih panela dobije se polje fotonaponskih ploča, koje je dio solarne fotonaponske elektrane. Glavni dijelovi fotonaponske elektrane priključene na elektroenergetsku mrežu su fotonaponsko polje i fotonaponski izmjenjivač. Sunčeva energija se u fotonaponskim ćelijama direktno prevara u istosmjernu električnu energiju (Vrankić, 2017).

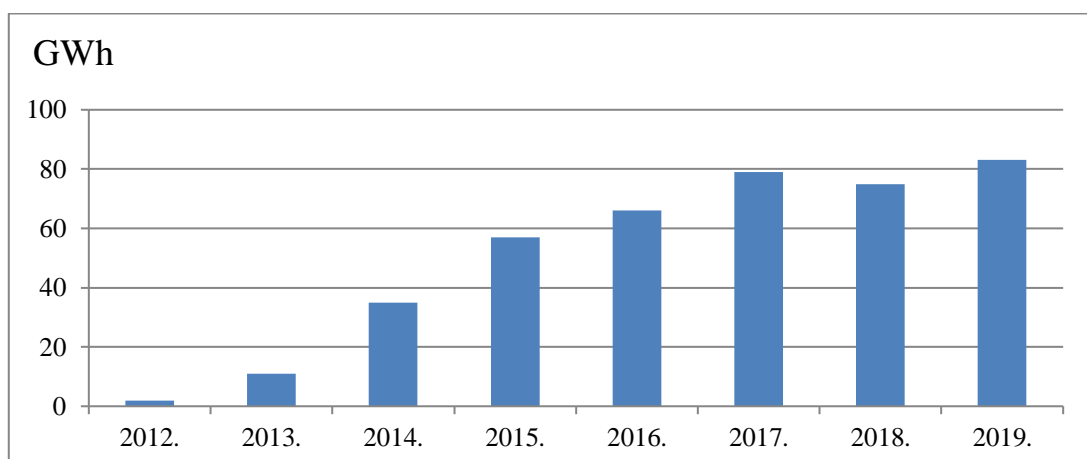
Proizvodnja električne energije iz solarnih sustava je procijenjena na 720 TWh u svijetu, što je porast od 22% u odnosu na godinu dana ranije. Na taj način udio solarne energije u proizvodnji električne energije, globalno gledano, iznosi nešto manje od 3%, pa je tako 2019. godine ovaj obnovljivi izvor prestigao bioenergiju. U skladu s tim, solarna energija postala je treći najzastupljeniji obnovljivi izvor u svijetu, nakon hidroenergije i „onshore“ vjetra. Procjene glase da će s navedenih 720 TWh u 2019. godini ta brojka do 2030. godine narasti na 3 300 TWh (IEA, 2020d).

Republika Hrvatska, a pogotovo njezin primorski dio, jedna je od vodećih europskih država gledajući broj sunčanih sati u godini. Tako, na primjer, grad Split ima 2 633 sunčanih sati godišnje, dok je u gradu Zagrebu ta brojka nešto manja i iznosi 1 927 (DHMZ, 2019) (Slika 3-1.).



**Slika 3-1.** Prosječna godišnja insolacija (kWh/m<sup>2</sup>) u RH (Elmok.hr, 2009)

Iz tih podataka može se zaključiti da je potencijal Hrvatske za razvoj solarnih sustava velik i trenutno vrlo malo iskorišten. Osim toga, u 2019. godini proizvedeno je 83 GWh električne energije iz solarnih sustava, samo 0,65% od ukupno proizvedenih 12 705 GWh iz svih izvora zajedno (IEA). Vidljivo je da je osim razdoblja između 2017. i 2018. godine, gdje je prisutan blagi pad, ta brojka u stalnom porastu. U periodu između 2012. i 2019. godine zabilježen je skok proizvedene električne energije s 2 na 83 GWh, dakle više od 40 puta (Slika 3-2.).



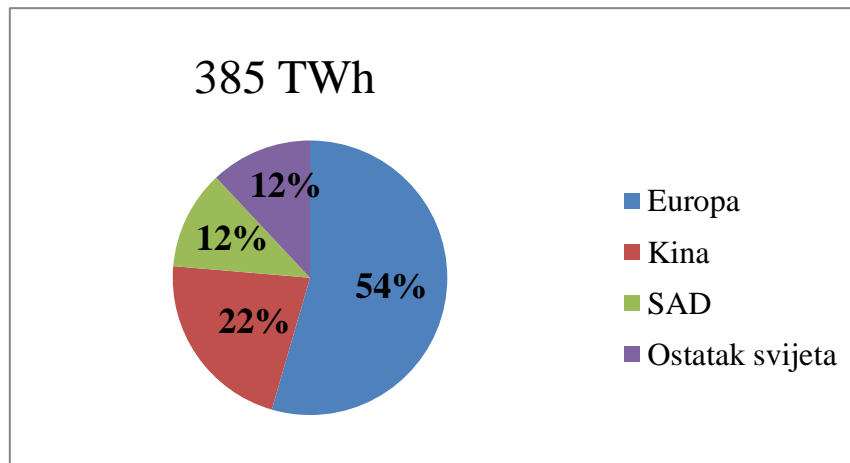
**Slika 3-2.** Proizvodnja električne energije u RH iz solarnih sustava 2012. - 2019. (IEA, 2020b)

Republika Hrvatska bilježi isto tako i konstantan rast novoinstaliranih kapaciteta za proizvodnju električne energije iz solarnih sustava te se s 2019. godinom taj iznos zaustavio na 84,8 MW (Energetski institut Hrvoje Požar, 2020). Jednostavnim izračunom primjećuje se da 83 GWh dobivene električne energije iz vlastitih solarnih kapaciteta nije zadovoljavajući iznos i da velik dio potencijala ostaje neiskorišten. To je posebno naglašen slučaj u ljetnim mjesecima kada je broj sunčanih sati u Hrvatskoj višestruko veći nego u zimskim iz čega proizlazi i čak 5 do 6 puta veća količina dobivene električne energije. Problem nastaje kada se toliko električne energije nema kako pohraniti, niti utrošiti. Potencijalno rješenje za pohranu se javlja u obliku sintetskog prirodnog plina. Naime, sav višak proizvedene električne energije može se preusmjeriti u proces elektrolize vode gdje se kao dobiveni produkt javlja čisti vodik koji je nužna sirovina za stvaranje sintetskog prirodnog plina.

### 3.2. Bioplin u svijetu i Republici Hrvatskoj

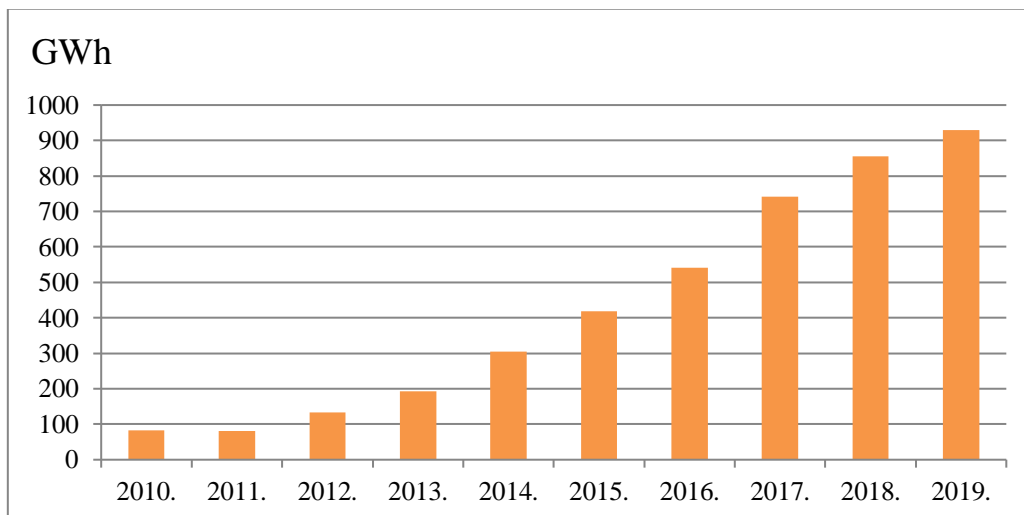
Bioplin nastaje u procesu anaerobne razgradnje organskih ostataka kao na primjer onih životinjskih i biljnih, kao i komunalnog krutog otpada, otpadnih voda, mulja i sl. Taj se proces obično događa na temperaturi između 35 i 55 °C. Dobiveni se bioplin uglavnom sastoji od 50 – 70% metana (CH<sub>4</sub>), 30 – 50% ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>), i nekolicine plinova koji se javljaju u tragovima. Tu se prvenstveno radi o amonijaku (NH<sub>3</sub>), sumporovodiku (H<sub>2</sub>S), kisiku (O<sub>2</sub>) i vodik (H<sub>2</sub>) (Sveinbjörnsson i Münster, 2017).

U svijetu danas postoji 18 GW instaliranih bioplinskih kapaciteta za generiranje električne energije. Većina njih se nalazi u Kini, SAD-u, Velikoj Britaniji te Njemačkoj. U razdoblju između 2010. i 2018. godine prosječan godišnji rast instaliranih kapaciteta bio je 4%. Međutim, važno je napomenuti kako je Europa apsolutno dominantna u ovom segmentu. Tako je na europskom kontinentu u 2018. godini proizvedeno gotovo 210 TWh bioplina, dok je u Kini proizvedeno 85 TWh, a u SAD-u 45 TWh (Slika 3-3.). Što se tiče Europe, 80% bioplina proizvedeno je iz biljnih i životinjskih ostataka, a preostalih 20% iz komunalnog krutog otpada i otpadnih voda (IEA, 2018).



**Slika 3-3.** Odnos proizvodnje bioplina u svijetu (IEA, 2018)

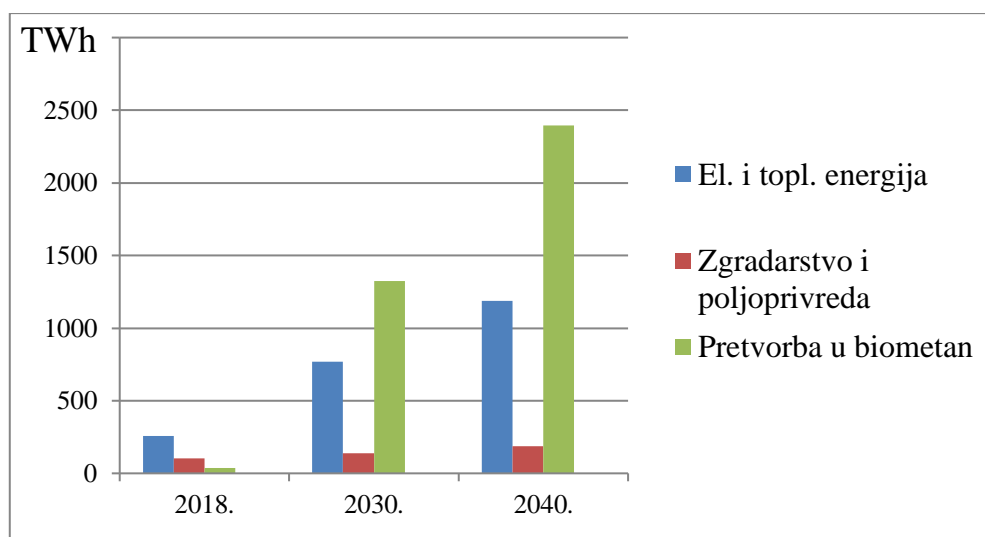
Posljednjih godina Republika Hrvatska također bilježi porast proizvodnje bioplina. Zaključno s 2019. godinom u Hrvatskoj je bilo instalirano 51,9 MW bioplinskih raspoloživih kapaciteta za proizvodnju električne energije, dok je iste godine pomoću bioplina proizveden 401 GWh električne energije (Energetski institut Hrvoje Požar, 2020). Ukupna količina bioplina proizvedenog u Hrvatskoj u 2019. godini je iznosila 929 GWh (IEA, 2019). No, kao što je slučaj i kod solarne energije, bioplin kao energent je u konstantnom porastu te se u posljednjih 9 godina njegova proizvodnja povećala 11 puta (Slika 3-4.).



**Slika 3-4.** Proizvodnja bioplina u RH 2010. - 2019. (IEA, 2020c)

Bioplin se danas u svijetu prvenstveno koristi u proizvodnji električne i toplinske energije, zgradarstvu i poljoprivredi. Samo oko 9% bioplina se dalje transformira u energetski znatno bogatiji biometan (IEA, 2020c). Međutim, projekcije IEA govore da će ubuduće taj trend se potpuno okrenuti te da će se glavnina bioplina dalje pretvarati u

biometan (Slika 3-5.). Razlog tomu se ponajviše nalazi u činjenici da je bioplin energetski prilično siromašniji energent od prirodnog plina te će se u narednim godinama kao takav sve više nadograđivati (Tablica 3-1.). Upravo se Sabatierov proces i proizvodnja sintetskog plina iz bioplina i vodika dobivenog pomoću obnovljive električne energije ističu kao jedna od budućih mogućnosti kako pohrane energije, tako i nadogradnje i boljeg iskorištenja bioplina.



**Slika 3-5.** Projekcija korištenja bioplina u budućnosti (IEA, 2020c)

**Tablica 3-1.** Usporedba svojstava prirodnog plina i bioplina

Parametar	Jedinica	Prirodni plin	Bioplin (60% CH <sub>4</sub> , 38% CO <sub>2</sub> , 2% ostalo)
Donja ogrjevna vrijednost	MJ/m <sup>3</sup>	36,14	21,48
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	0,82	1,21
Wobbeov indeks	MJ/m <sup>3</sup>	39,9	19,5

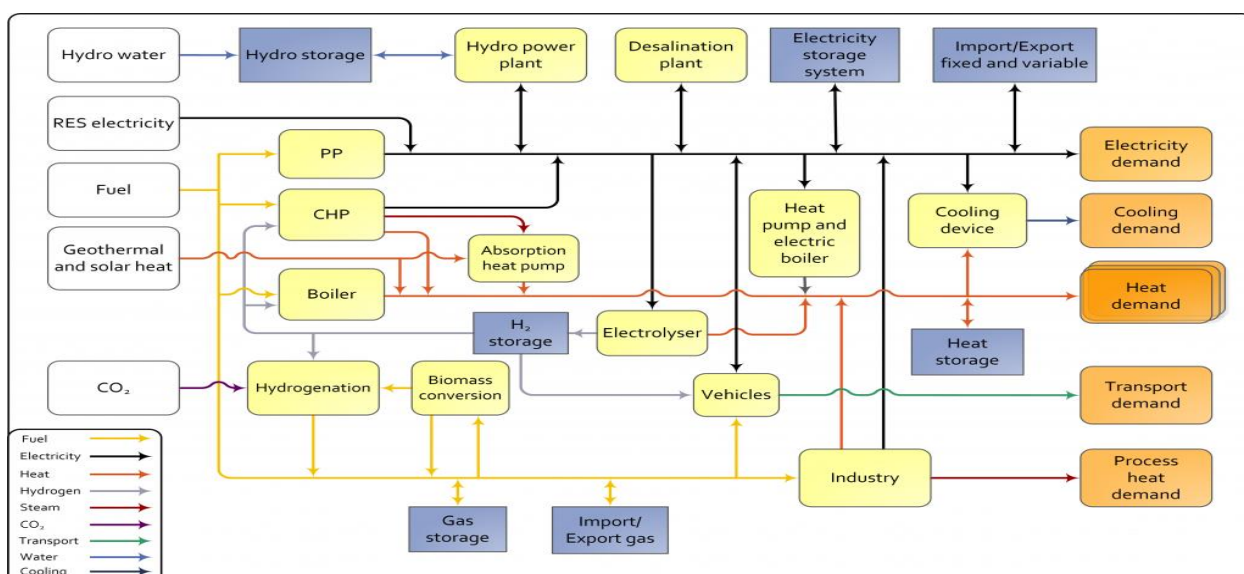
#### 4. PROIZVODNJA SNG-A ZA POTREBE DEKARBONIZACIJE RH

U ovom diplomskom radu provest će se simulacija proizvodnje sintetskog prirodnog plina uz uvjet da će svi ulazni podaci biti u realnim i ostvarivim okvirima za Republiku Hrvatsku, odnosno oni su odabrani u skladu s mogućnostima i kapacitetima hrvatskog energetskeg sustava. To znači da će konačni rezultati dobiveni simulacijom također biti realni i ostvarivi. Također, važno je naglasiti kako su ulazni podaci s kojima sam krenuo u simulaciju proizvoljnog karaktera. Proizvedeni SNG je zamišljen da se prvenstveno iskoristi u sektoru transporta nakon čega će se analizirati kako bi takav scenarij utjecao na smanjenje emisija CO<sub>2</sub> u tom sektoru. Na kraju će se provesti i analiza tih emisija te proračunati energetska učinkovitost.

Simulacija je provedena pomoću računalnog programa EnergyPLAN, dok su dobiveni rezultati obrađeni u Microsoft Excelu.

##### 4.1. EnergyPLAN Program

Program EnergyPLAN računalni je model za analizu energetskeg sustava (Slika 4-1.). Glavna svrha programa je pomoći u kreiranju nacionalnih energetskeg strategija na principu tehničkih i ekonomskih analiza. Međutim, program je primjenjiv kako za nacionalne nivoe, tako i na one lokalne poput gradova i općina. Od svoje prve verzije, program omogućava analizu raznih simulacijskeg strategija s naglaskom na međudnose između kombinirane proizvodnje toplinske i električne energije (CHP) i obnovljiveg izvora energije (Lund, 2020).



Slika 4-1. Izgled glavnog sučelja programa EnergyPLAN

Dizajn EnergyPLAN-a naglašava mogućnost promatranja cjelovitog energetskog sustava u cjelini. Stoga je EnergyPLAN osmišljen kao alat u kojem se, na primjer, mogu koordinirati pametne električne mreže uz korištenje obnovljive energije u druge svrhe osim proizvodnje električne energije. U programu, obnovljiva energija pretvara se i u druge oblike osim električne energije, uključujući toplinu, vodik, sintetičke plinove i biogoriva (Lund, 2020).

#### 4.2. Simulacija proizvodnje SNG – a

U ovom radu bit će napravljena simulacija skladištenja viška električne energije dobivene iz PV sustava i njena pretvorba u SNG uslijed sinteze „zelenog“ vodika s bioplinom. Navedeni SNG usmjerit će se u transportni sektor te će se potom napraviti simulacija koliko bi se manje CO<sub>2</sub> emitiralo u atmosferu godišnje ukoliko bi se za transportni sektor RH osiguralo 100 GWh sintetskog prirodnog plina kao energenta koji će zamijeniti konvencionalna goriva i tako doprinijeti dekarbonizaciji tog sektora. Međutim, u simulaciju nisam ulazio s iznosom od 100 GWh, već s 110 GWh. Tih dodatnih 10 GWh iskoristit će se u svrhu proizvodnje električne i toplinske energije koje ću detaljnije objasniti i obraditi u narednim poglavljima.

##### 4.2.1. Električna energija

Proizvodnja vodika se ostvaruje postupkom elektrolize gdje je glavni izvor električne energije fotonaponski sustav kao i kogeneracijsko postrojenje koje osigurava električnu energiju u trenucima kada fotonaponski sustav ne može zadovoljiti potrebe. Za dobivanje 110 GWh SNG – a, prema EnergyPLAN – u, potrebno je 51,4 GWh vodika. S obzirom da se učinkovitost procesa elektrolize kreće oko 80% (Kumar i Himabindu, 2019), prema tome potrebno je osigurati 64,26 GWh električne energije. Osim toga, predviđeno je da u procesu će se proizvesti i dodatnih 10 GWh<sub>e</sub> koji će se usmjeriti u mrežu električne energije, i još 0,29 GWh<sub>e</sub> koji neće biti iskorišteni u procesu, te se ta manja količina električne energije predviđa za izvoz. To zajedno na kraju čini iznos od 74,56 GWh<sub>e</sub> koja je u procesu prisutna. Fotonaponski sustav kao primarni izvor električne energije koji će osigurati većinu potreba ukupnog je instaliranog kapaciteta od 30000 kW. Korištenjem podataka o Sunčevom zračenju za grad Zagreb, koji je odabran kao najrelevantnija lokacija, za 2016. godinu (PVGIS), izračunato je da bi navedeni fotonaponski sustav u jednoj godini osigurao 42,83 GWh električne energije, odnosno 57% ukupnih potreba.

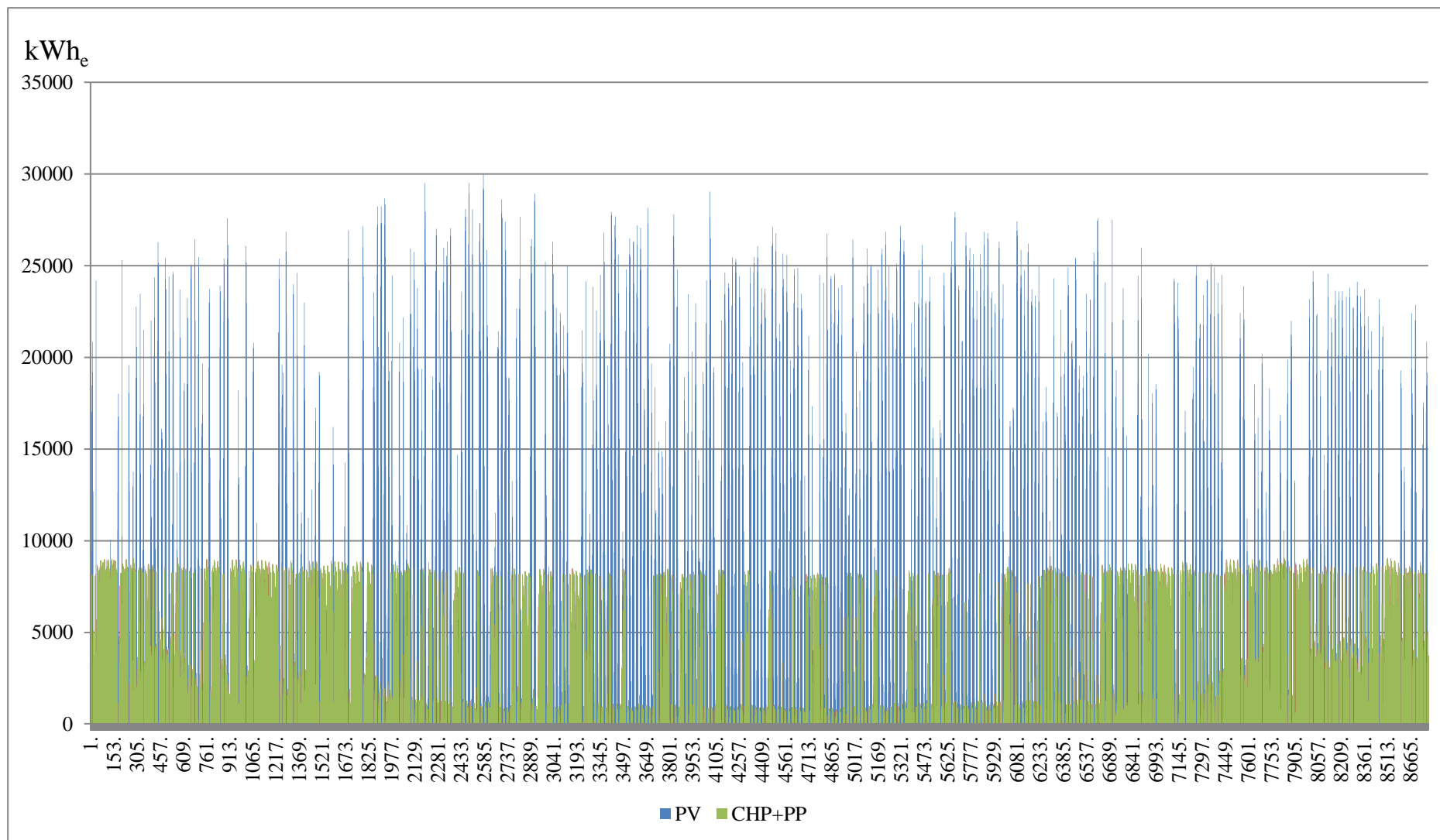


Preostala količina (31,83 GWh, 43%) električne energije nužnih za nesmetano odvijanje procesa, bi se proizvela u kogeneracijskom postrojenju (PP (engl. *Power Plant*) i CHP) kao sekundarnom izvoru. (Tablica 4-1).

**Tablica 4-1.** Godišnja bilanca proizvodnje električne energije

<b>Izvor električne energije</b>	<b>Količina proizvedene električne energije (GWh)</b>
PV	42,83
CHP	7,94
PP	23,79
<b>Ukupno</b>	<b>74,56</b>

Omjer proizvodnje električne energije iz dvaju već spomenutih izvora (PV i CHP + PP) drugačiji je s obzirom na period u godini i broj sunčanih dana u tom dijelu godine. Naravno, iz tog razloga najveća proizvodnja električne energije iz PV – a javlja se u ljetnim mjesecima, dok se u zimskim periodima stvara najveća potreba za kompenziranjem proizvodnje električne energije iz PP – a i CHP – a (Slika 4-2.)



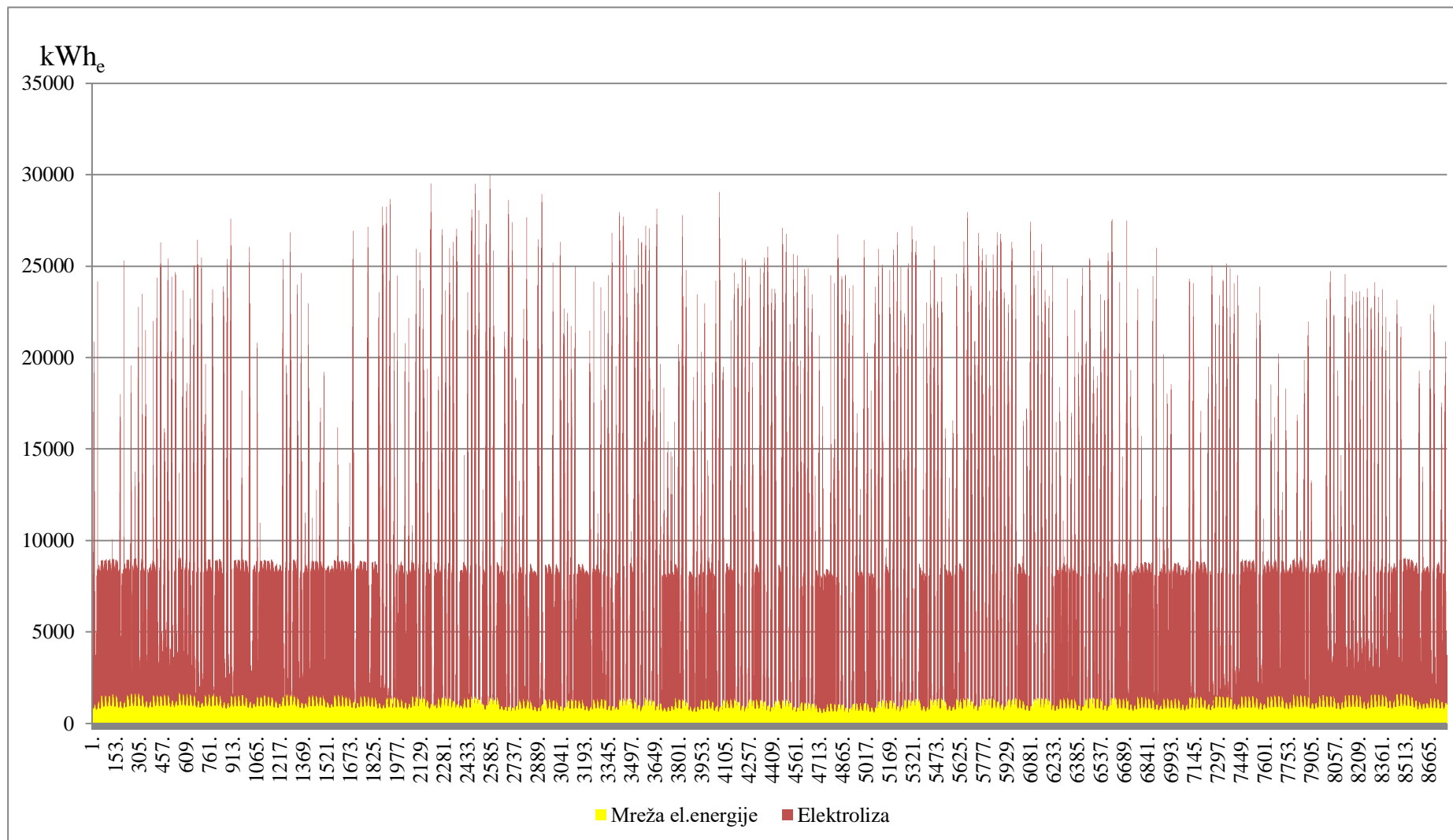
**Slika 4-2.** Proizvodnja električne energije kroz godinu (8784 sati)

Ukupna godišnja potrošnja električne energije u procesu iznosom odgovara električnoj energiji koja je i proizvedena, dakle 74,56 GWh. Što se tiče korištenja proizvedene električne energije ona se troši u tri smjera. Točnije, radi se o električnoj energiji potrebnoj za provedbu elektrolize vode u elektrolizeru, gdje se i troši najveći dio (64,26 GWh<sub>e</sub>). Zatim se jedan dio isporučuje u mrežu (10 GWh<sub>e</sub>), te se najmanji dio izvozi (0,29 GWh<sub>e</sub>) (Tablica 4-2.).

**Tablica 4-2.** Godišnja bilanca potrošnje električne energije

<b>Trošilo električne energije</b>	<b>Količina utrošene električne energije (GWh)</b>
Elektroliza	64,26
Mreža el.energije	10
Izvoz	0,3
<b>Ukupno</b>	<b>74,56</b>

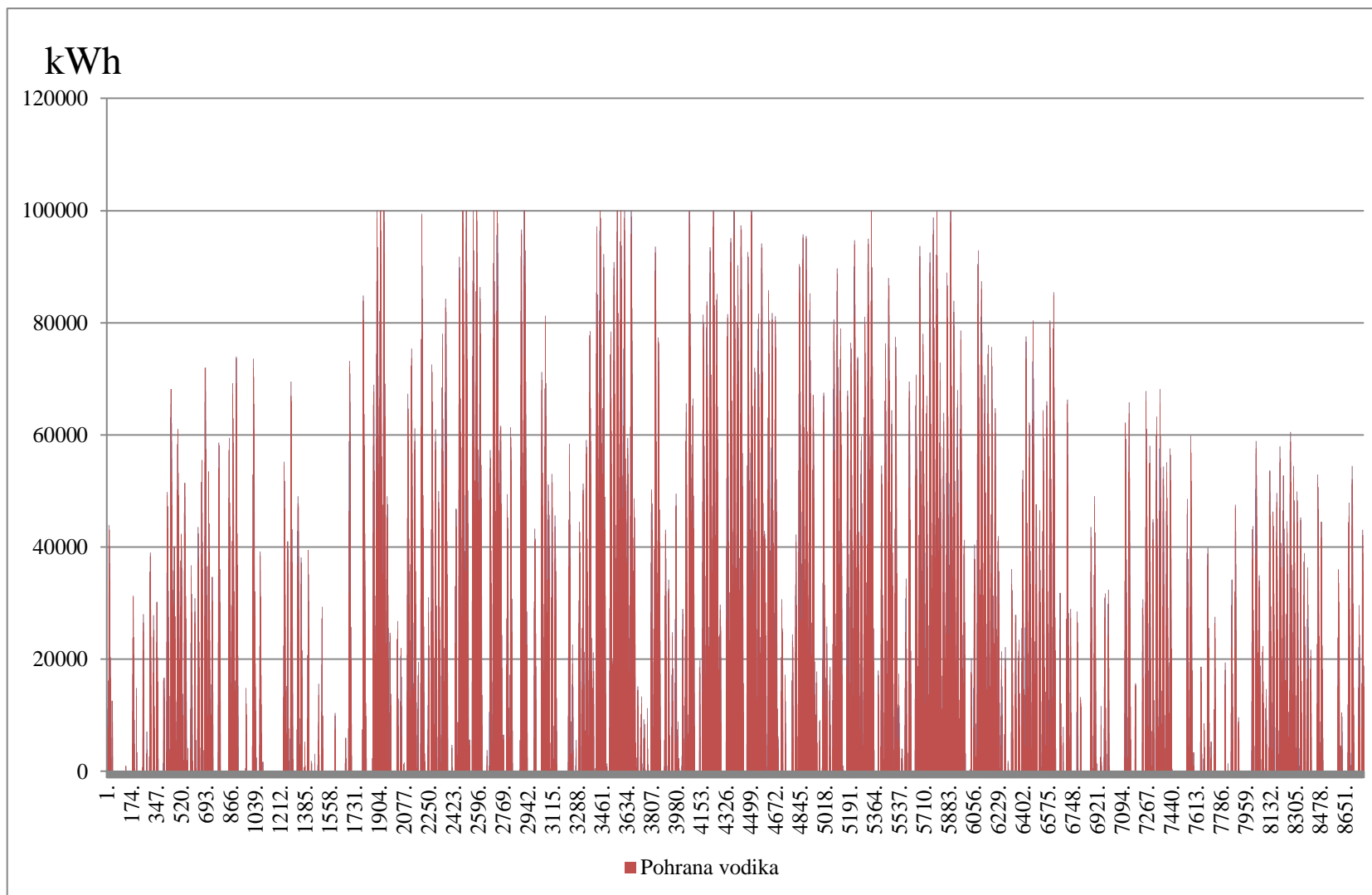
Ključna i najvažnija je zadaća osigurati konstantnu opskrbu za elektrolizere tijekom cijele godine. Mjesečno je za elektrolizere potrebno proizvesti oko 5,35 GWh<sub>e</sub>, dok se preostala električna energija tek onda usmjerava u mrežu, a uglavnom u mjesecima s najznačajnijim suviškom (svibanj – kolovoz), dio električne energije se i izvozi. Na sljedećoj slici, taj iznos nažalost nije bilo moguće prikazati zbog malog iznosa u odnosu na ostala dva (Slika 4-3.)



**Slika 4-3.** Korištenje proizvedene električne energije kroz godinu (8784 sati)

#### *4.2.2. Proizvodnja i pohrana vodika*

U procesu je osigurano da proizvodnja SNG – a bude tijekom cijele godine konstantna. Dakle, u skladu s time, proizvodnja vodika također treba biti u konstantnim i nepromjenjivim količinama. Godišnja količina proizvedenog vodika za potrebe sinteze SNG – a iznosi 51,4 GWh (mjesečno oko 4,28 GWh) za što se utroši 64,26 GWh električne energije (mjesečno 5,35 GWh<sub>e</sub>). Međutim, u periodima kada opskrba električnom energijom premaši navedene potrebe, javlja se suvišak vodika. Taj se suvišak onda pohranjuje i koristi u periodima kada nedostaje „obnovljive“ električne energije. Važno je i naglasiti da je maksimalni kapacitet skladištenje vodika 100 MWh. Naravno, suvišci vodika i potrebe za njegovim skladištenjem najčešće se javljaju u ljetnim mjesecima, no ta se situacija povremeno događa i u drugim dijelovima godine (Slika 4-4.).



**Slika 4-4.** Prikaz skladištenja vodika tijekom godine (8784 sati)

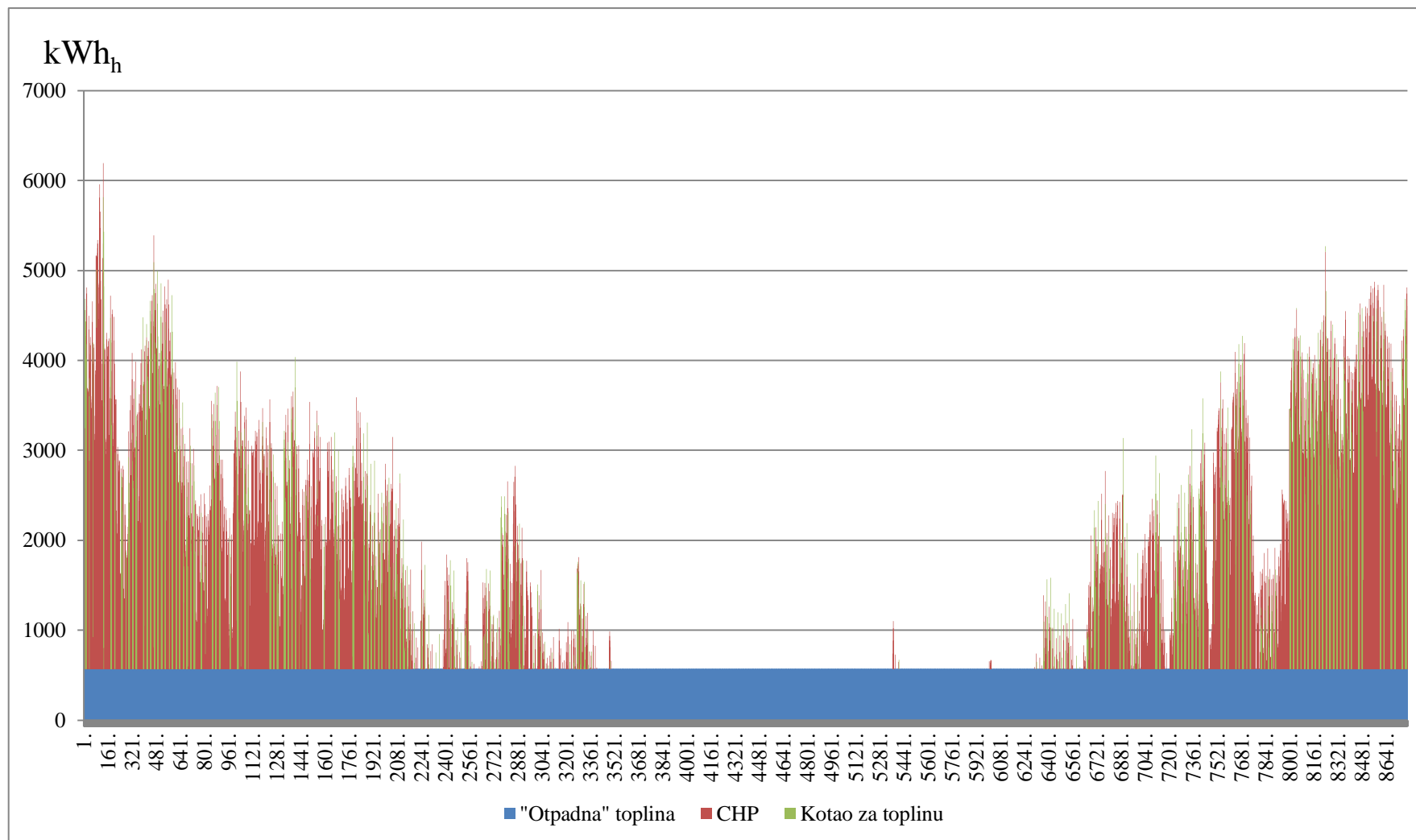
#### 4.2.3. Toplinska energija

Tijekom procesa proizvodnje SNG – a, toplinska se energija proizvodi na tri načina. Točnije, u dva od tri načina radi se o planiranoj proizvodnji topline, dok se kao treći način dobivanja topline podrazumijeva korištenje tzv. „otpadne“ topline. Prvi i najdominantniji izvor topline je kogeneracijsko postrojenje (CHP). U CHP – u se za potrebe ovog procesa proizvodi 6,62 GWh toplinske energije. Velika većine topline dobivene iz ovog izvora dolazi tijekom zimskih mjeseci kada se javlja veća potreba, odnosno kada PV – sustavi postaju ograničeni zbog vremenskih uvjeta. Osim toga, drugi način proizvodnje toplinske energije su kotlovi za proizvodnju topline. Oni se javljaju u primjeni samo u trenucima vršne potražnje, kada ostali izvori ne osiguravaju tražene potrebe. Prvenstveno se toplina pomoću njih proizvodi u hladnijim, zimskim mjesecima, dok su u ljetnim mjesecima manje korišteni. Njihov godišnji doprinos u proizvodnji topline iznosi 1,54 GWh<sub>h</sub>. Također, toplina se kao nusprodukt javlja i tijekom elektrolize kao i tijekom postupka sinteze bioplina i vodika u reaktoru. Količina takve „otpadne“ topline može iznositi čak i do 20% kod elektrolize i do 8% kod procesa metanacije (Sveinbjörnsson i Münster, 2017). Prema tome, količina „otpadne“ topline oslobođene tijekom procesa može biti u značajnim količinama, no radi pojednostavljenja simulacije u EnergyPLAN – u, „otpadna“ toplina svedena je na 5 GWh. Također, treba naglasiti kako je jedino ovaj izvor toplinske energije konstantnog iznosa, bez obzira na period u godini. Dakle, sveukupna količina topline iz procesa proizvodnje SNG – a, iz CHP – a i kotla za proizvodnju topline bi zajedno bila oko 13,16 GWh<sub>h</sub> (Tablica 4-3.).

**Tablica 4-3.** Godišnja bilanca proizvodnje toplinske energije

<b>Proizvodnja toplinske energije</b>	<b>Količina proizvedene toplinske energije (GWh<sub>h</sub>)</b>
CHP	6,62
Kotao za toplinu	1,54
„Otpadna“ toplina	5
<b>Ukupno</b>	<b>13,16</b>

Odnos proizvodnje toplinske energije iz triju izvora drugačiji je u određenom periodu u godini (Slika 4-5.).



**Slika 4-5.** Proizvodnja toplinske energije tijekom godine (8784 sati)

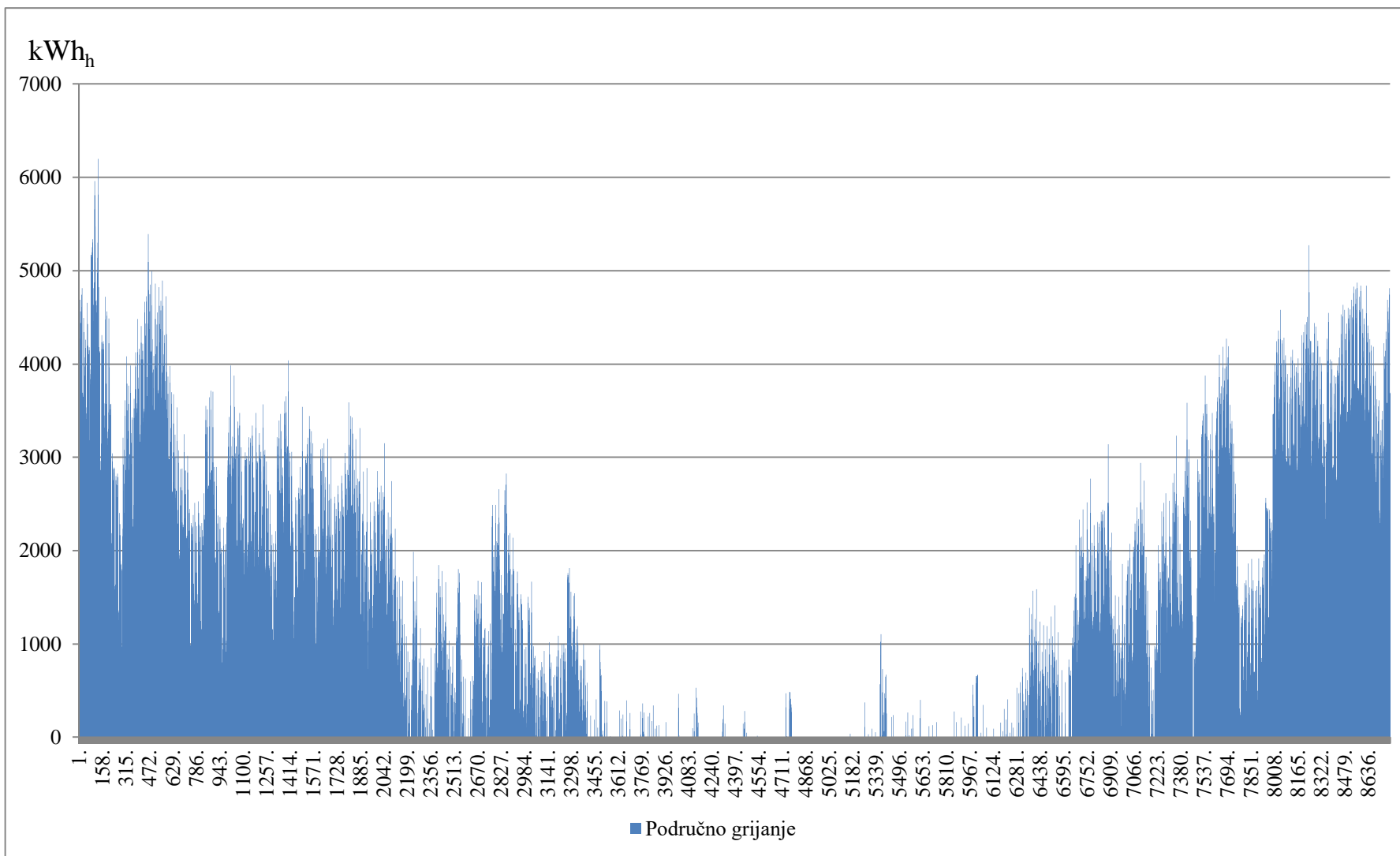


Ta se toplina u praksi može iskoristiti na način da se usmjerava u anaerobni digestor, što bi povećalo učinkovitost kod dobivanja bioplina ili se toplina iskoristi u sustavima područnog grijanja. Obje opcije znatno utječu na učinkovitost cjelokupnog procesa i smatraju se poželjnima. Ipak, u simulaciji sam 11,1 GWh<sub>h</sub> odlučio iskoristiti u svrhu područnog grijanja (Tablica 4-4.).

**Tablica 4-4.** Godišnja bilanca potrošnje toplinske energije

<b>Trošilo topline</b>	<b>Količina utrošene topline (GWh<sub>h</sub>)</b>
Područno grijanje	11,1
<b>Ukupno</b>	<b>11,1</b>

Usporedbom količine proizvedene i utrošene toplinske energije vidljivo je kako nešto više od 2 GWh<sub>h</sub> ostaje neiskorišteno. Glavni je razlog u činjenici da u ljetnim mjesecima gotovo da niti nema potražnje za toplinom u sustavima područnog grijanja te stoga „otpadna“ toplina, koja se neprekidno proizvodi, naprosto ostaje neiskorištena (Slika 4-6.).



**Slika 4-6.** Korištenje proizvedene toplinske energije kroz godinu (8784 sati)

#### 4.2.4. Bioplin

Bioplin kao jedan od dvaju polaznih resursa za sintezu SNG – a potreban je u značajnim količinama. S obzirom da je za kontinuiranu proizvodnju SNG – a prema EnergyPLAN – u godišnje potrebno 64,3 GWh bioplina, u digestoru se treba osigurati digestata u iznosu od 91,9 GWh. Prema tome, vidljivo je da je učinkovitost biodigestora 70%. Iako učinkovitost digestora se inače kreće u postotcima od 30 – 70% (Poeschl et al, 2010), kao referentnu brojku sam uzeo relativno visok postotak iz razloga što se digestori danas ubrzano razvijaju i omogućuju sve bolje razine učinkovitosti.

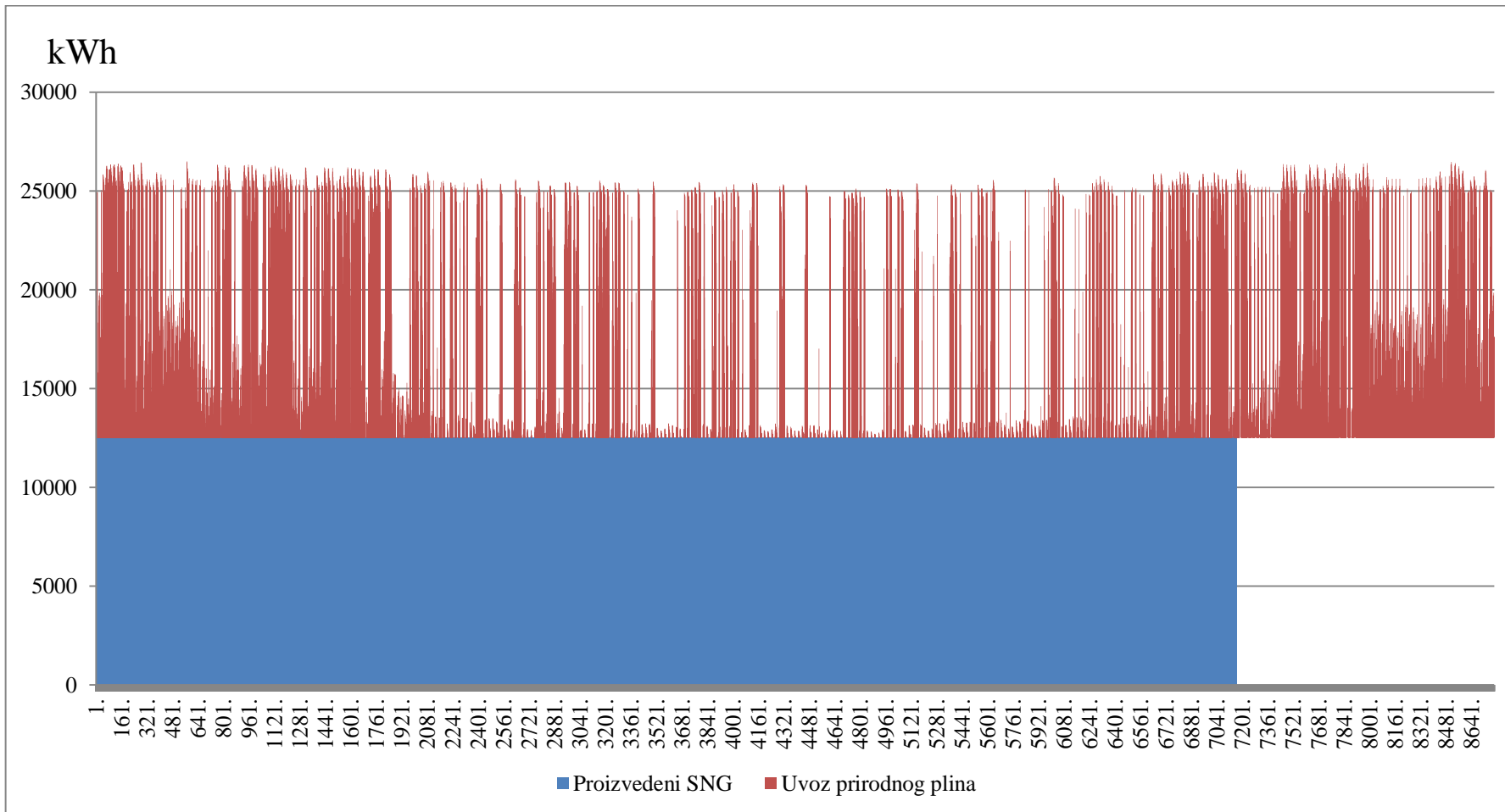
#### 4.2.5. Prirodni i sintetski prirodni plin

Pretpostavka je da bi se proizvodnja predviđenih 110 GWh ravnomjerno rasporedila kroz čitavu godinu, odnosno da bi proizvodnja SNG – a bila približno konstantna i svaki mjesec podjednaka. To bi onda značilo da bi se dnevno za sveukupne potrebe proizvelo 0,30 GWh ili da bi mjesečna proizvodnja tada bila između 8,72 i 9,32 GWh, ovisno o broju dana u mjesecu. Međutim, za potrebe cjelokupnog procesa, ta količina sintetskog prirodnog plina ne bi bila dostatna. Iz tog razloga sustav će se nadopunjavati s uvezenim prirodnim plinom kako bi se proces odvijao neprekidno te kako bi se potrebe za energijom namirile. Uvođenje prirodnog plina u proces bit će najpotrebnije u periodima godine kada CHP i PP rade pojačano, odnosno kada PV sustavi ne osiguravaju potrebnu količinu električne energije za nesmetan rad. Što se tiče konkretnih iznosa, osim proizvedenih 110 GWh SNG – a, tijekom godine je potrebno uvesti u sustav i 46,74 GWh prirodnog plina. Prema tome, sustav ukupno raspolaže s 156,74 GWh što SNG – a, što prirodnog plina (Tablica 4-5.).

**Tablica 4-5.** Godišnja bilanca dobave plina (SNG + prirodni plin)

<b>Izvor plina</b>	<b>Količina plina (GWh)</b>
SNG	110
Uvoz prirodnog plina	46,74
<b>Ukupno</b>	<b>156,74</b>

Kao što je rečeno, SNG se proizvodi u kontinuitetu jednakom količinom tijekom cijele godine, dok je uvoz prirodnog plina u sustav promjenjivog karaktera. Tako je, radi osiguravanja nesmetanog odvijanja procesa u ovoj simulaciji, u zimskim periodima uvoz u porastu, a tijekom ljeta, zbog manje potrebe, on se smanjuje (Slika 4-7.).



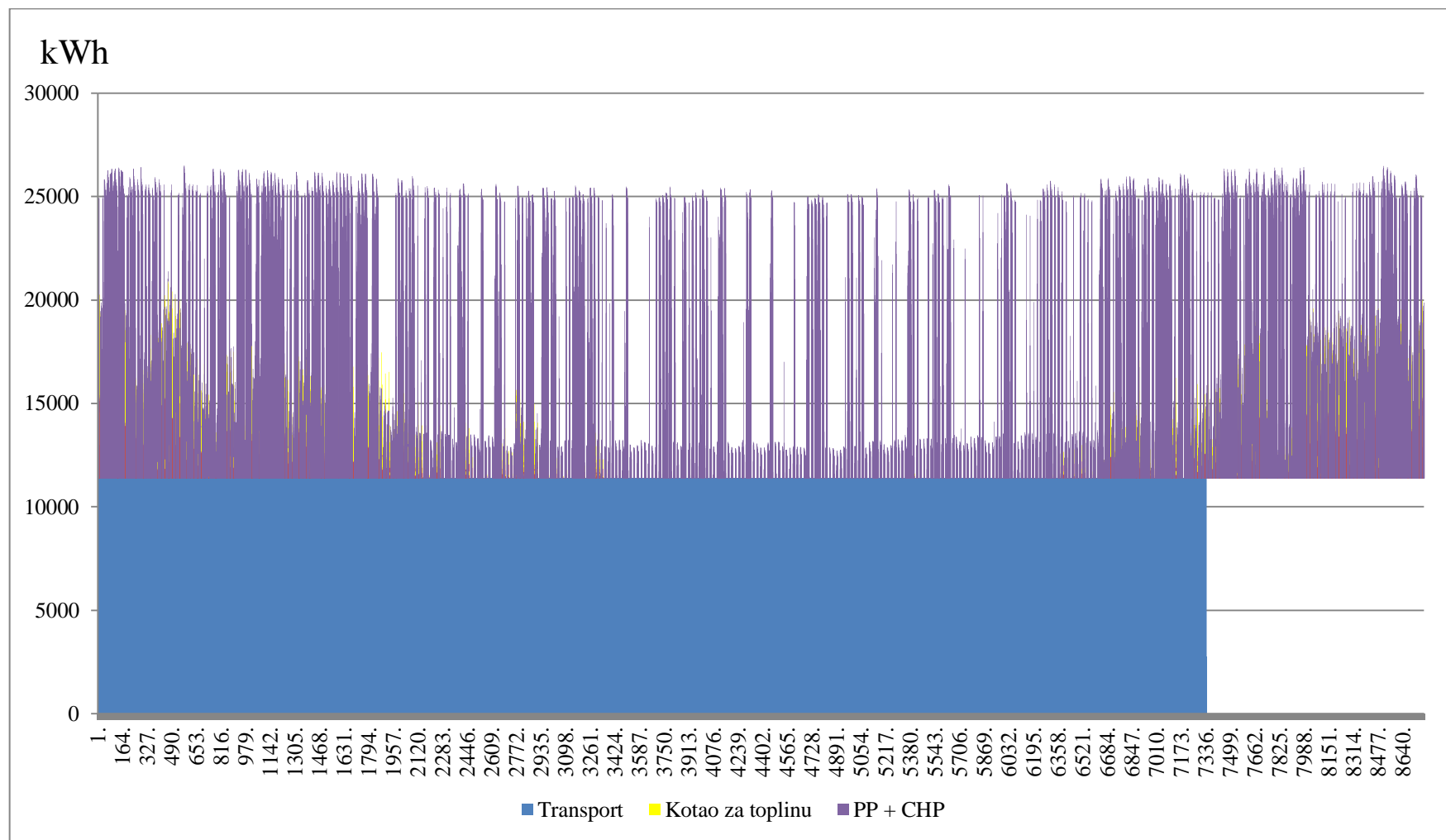
**Slika 4-7.** Proizvodnja SNG - a i uvoz prirodnog plina tijekom godine (8784 sati)

Gledajući iskorištavanje sintetskog prirodnog i prirodnog plina, bit čitave simulacije je osigurati 100 GWh SNG – a za transport kao zacrtani cilj za doprinos dekarbonizaciji tog sektora. Na mjesečnoj bazi bi to značilo da je potrebno proizvesti 8,33 GWh toga energenta, što se i ostvaruje. Prirodni plin i SNG se koriste i kao pogonsko gorivo u CHP – u i PP – u (ukupno 52,98 GWh) kao i u kotlu za proizvodnju topline, no u manjoj količini (1,71 GWh). Također, dio plina se i iz sustava i izvozi (2,14 GWh). (Tablica 4-6.).

**Tablica 4-6.** Godišnja bilanca potrošnje SNG – a i prirodnog plina

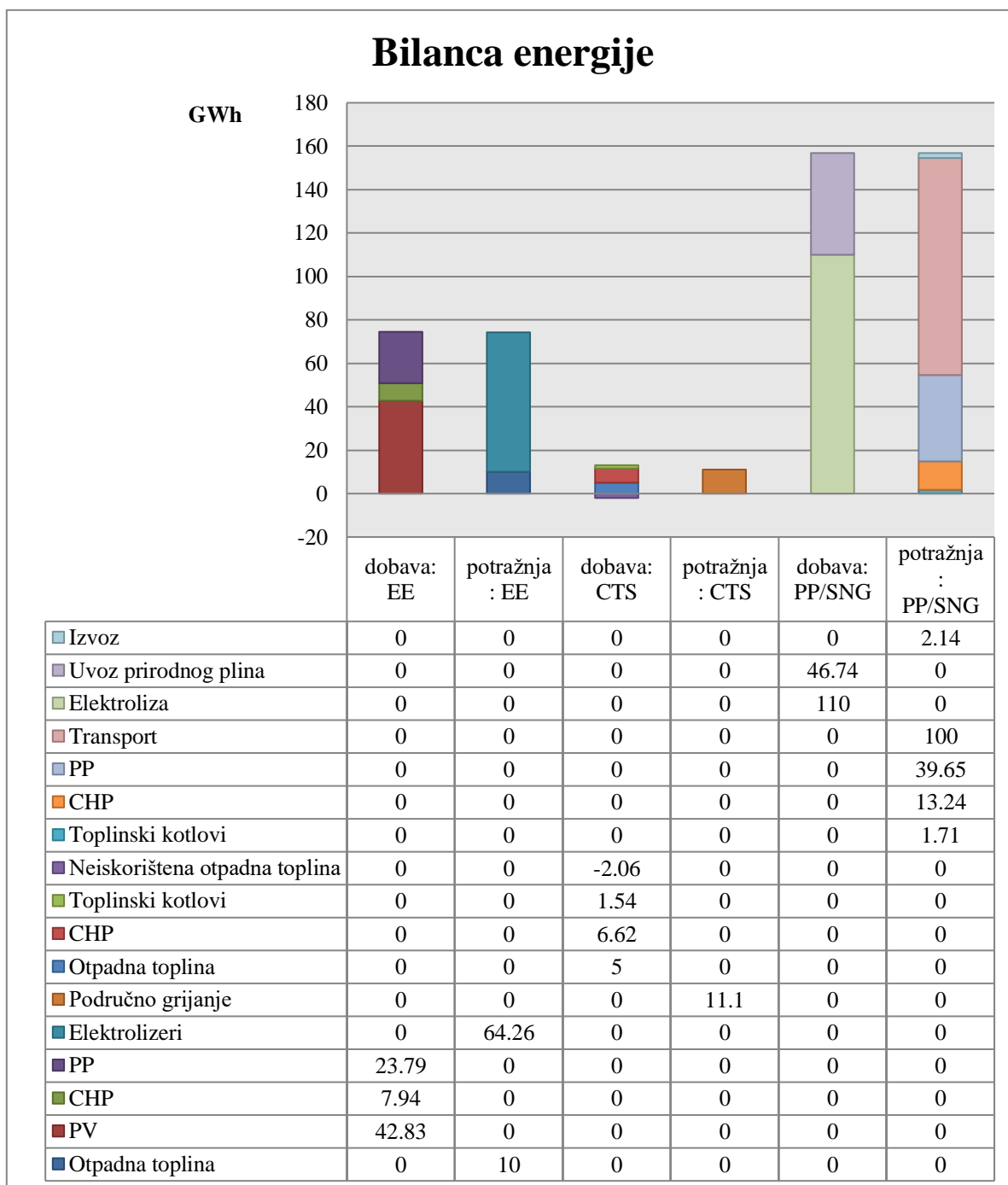
<b>Potrošnja SNG – a / prirodnog plina</b>	<b>Količina potrošnje (GWh)</b>
Transport	100
CHP	13,24
PP	39,65
Kotao za toplinu	1,71
Izvoz	2,14
<b>Ukupno</b>	<b>156,74</b>

Na sljedećoj slici prikazana je zajednička potrošnja dvaju navedenih energenata, gdje je vidljivo kako ona, kao i proizvodnja, značajno raste u zimskim mjesecima. Potrebno je napomenuti da na slici nije prikazan izvoz plina zbog vrlo malog iznosa u odnosu na ostale, dok je potrošnja u kotlovima za toplinu prikazana, no teže vidljiva iz istog razloga kao i kod izvoza (Slika 4-8.).



**Slika 4-8.** Korištenje SNG - a i prirodnog plina kroz godinu (8784 sati)

Radi preglednosti, na sljedećoj slici prikazana je bilanca svih korištenih energenata u procesu (Slika 4-9.).



Slika 4-9. Konačna bilanca energije

## 5. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJE

Nakon objašnjenog tijeka procesa i obavljene simulacije, u ovom poglavlju ću predstaviti dobivene rezultate te iste analizirati. Analizu sam podijelio na dva segmenta:

- Analiza s obzirom na dekarbonizaciju transportnog sektora RH
- Analiza s obzirom na učinkovitost i „obnovljivost“ samog procesa

Na kraju analize prikazani su Sankeyevi dijagrami energetske tokova koji dodatno pojašnjavaju proces u cjelini i njegovu učinkovitost, ali i objašnjavaju različitost procesa tijekom zime i ljeta.

### 5.1. Analiza s obzirom na dekarbonizaciju transportnog sektora RH

Simulacijom procesa u EnergyPLAN – u izračunato je da bi ukupne godišnje emisije CO<sub>2</sub> nastale proizvodnjom SNG – a iznosile ukupno 9104 tona. Također, važno je spomenuti da se u ukupne emisije ne ubraja CO<sub>2</sub> nastao izgaranjem u vozilima jer SNG sadržava CO<sub>2</sub> iz bioplina i u tom smislu je proces ugljično neutralan. S obzirom da je kao rezultat procesa ukupno dobiveno 110 GWh SNG – a, emisije prema tome iznose 83 g CO<sub>2</sub>/kWh proizvedene energije. Isto tako, uz pretpostavku da se po potrošenom kWh može prijeći 1,5 km, emisije CO<sub>2</sub>/km tada iznose nešto iznad 55 g CO<sub>2</sub>/km. Uspoređujući tu brojku s onima koja emitiraju današnja konvencionalna vozila, dolazi se do smanjenja od čak 68% ako se kao relevantna brojka uzme 170 g CO<sub>2</sub>/km, prema grafičkom prikazu iz uvoda. Također, kada bi se emisije izražene u g CO<sub>2</sub>/kWh, usporedile s onima koje se javljaju kod konvencionalnih goriva (255 g CO<sub>2</sub>/kWh), razlika u tom slučaju iznosi 172 g CO<sub>2</sub>/kWh. Množenjem te brojke s 100 GWh (količina SNG – a koji ulazi u transportni sektor), ukupno smanjenje ispuštenog CO<sub>2</sub> tada bi iznosilo 17 200 tona. Uzevši u obzir kako su ukupne emisije CO<sub>2</sub> u sektoru transporta u RH oko 6 Mt, godišnje smanjenje bi u tom sektoru za ovaj scenarij bilo oko 0,3%. S obzirom da navedenih 100 GWh SNG – a u transportu zapravo, relativno, gledano, nije velika brojka, ipak se može zaključiti da smanjenje emisija nije beznačajno. Radi preglednosti, dobiveni podaci prikazani su u sljedećoj tablici (Tablica 5-1.).



**Tablica 5-1.** Prikaz mogućeg smanjenja emisija CO<sub>2</sub> uvođenjem SNG – a umjesto konvencionalnih goriva u transportni sektor

	<b>Konvencionalno gorivo (prosjeak)</b>	<b>SNG</b>	<b>Razlika (konv.gorivo – SNG)</b>	<b>Ukupno smanjenje emisija (razlika × 100 GWh SNG – a)</b>
Emisije CO <sub>2</sub> (g/kWh)	255	83	-172 (-69,4%)	-17 200 tona/godišnje

Također, navedenih 100 GWh sintetskog prirodnog plina u transportu bi bilo približno dovoljno za 150 milijuna kilometara za cestovna vozila (uz pretpostavku da je za 1 prijeđeni km potreban 1,5 kWh (Natural Gas Vehicle, 2010). Prosječna godišnja kilometraža po automobilu u Hrvatskoj iznosi oko 12 000 km (Centar za vozila Hrvatske, 2020), pa bi u skladu s time 100 GWh SNG – a bilo dostatno za 12 500 cestovnih vozila. Tih 12 500 vozila sa SNG – om kao pogonskim gorivom činila bi tada oko 0,8% svih cestovnih vozila što ne bi bila zanemariva brojka s obzirom da se radi o procesu koji obuhvaća jednogodišnje razdoblje.

## 5.2. Analiza s obzirom na učinkovitost i „obnovljivost“ samog procesa

U procesu tri glavna izvora energije su bioplin, solarna energija i prirodni plin. Dakle dva od tri (bioplin i solarna energija) pripadaju obnovljivim izvorima, dok je prirodni plin, dakako, neobnovljivi, fosilni energent. Ta tri čimbenika EnergyPLAN još i naziva primarnim izvorima energije (engl. *Primary Energy Supply*, PES). Prvo što program izračunava je udio obnovljivih izvora energije u „PES – u“. Izračun je sljedeći:

$$\frac{\text{Bioplin (GWh)} + \text{El. energija iz PV – a (GWh)}}{\text{Bioplin (GWh)} + \text{El. energija iz PV – a (GWh)} + \text{Prirodni plin (GWh)}} = \frac{64,4 \text{ GWh} + 42,83 \text{ GWh}}{64,3 \text{ GWh} + 42,83 \text{ GWh} + 44,6 \text{ GWh}} = \frac{107,23 \text{ GWh}}{151,83 \text{ GWh}} = 70,6\%$$

Udio obnovljivih izvora energije u procesu ima prilično visok udio od 70,6% i može se reći da je u tom smislu proces relativno niskougljičnog karaktera.

Također, ono što se također izračunavalo jest udio tzv. „obnovljive“ električne energije koja se u procesu koristi. Način proračuna je nešto drugačiji, no sličan u odnosu na prethodni:

$$\frac{\text{El.energija iz PV-a (GWh)}}{\text{El.energija iz PV-a (GWh)+ El.energija iz PP-a (GWh)+ El.energija iz CHP-a (GWh)- Izvoz (GWh)}} = \frac{42,83 \text{ GWh}}{42,83 \text{ GWh}+23,79 \text{ GWh}+7,94 \text{ GWh}-0,29 \text{ GWh}} = 57,7\%$$

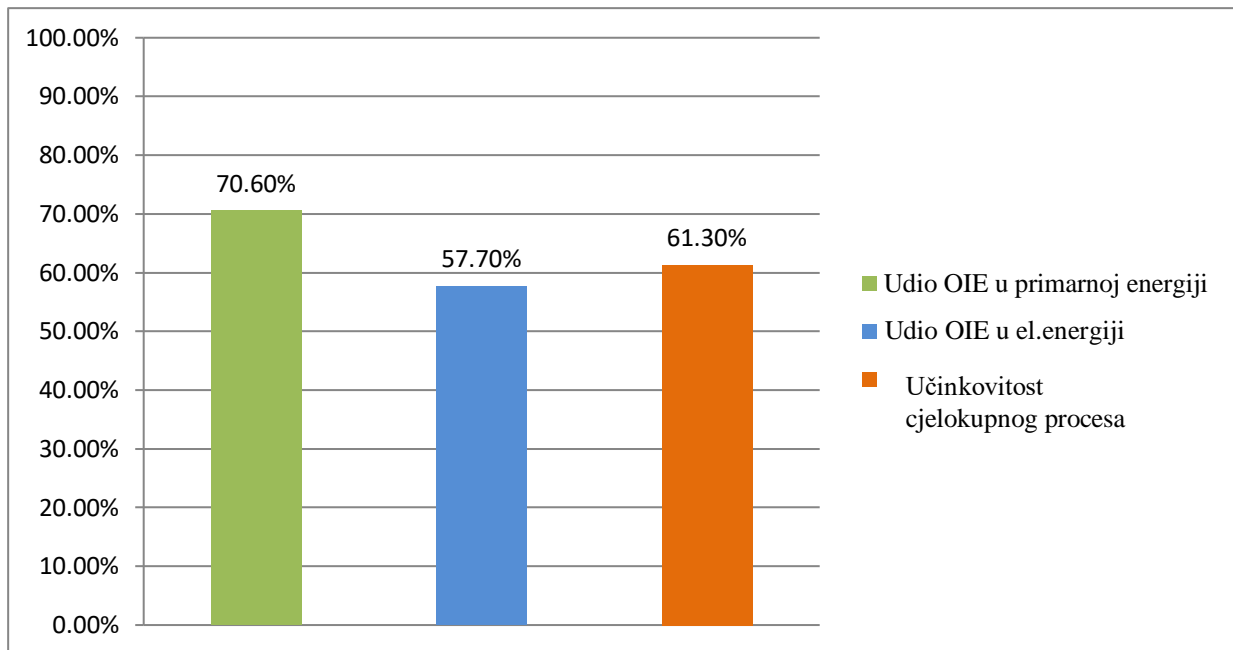
Električna energija potrebna za odvijanje procesa dominantno dolazi iz obnovljivih izvora energije. Iznos od 57,7% nešto je manji nego kod primarnih izvora energije, no i dalje se može reći da se i ovdje radi o visokom udjelu „obnovljive“ energije.

Učinkovitost cijeloga procesa izračunava se omjerom proizvedene i uložene energije. U ovom slučaju, finalna, proizvedena energija je sintetski prirodni plin. Energija koja je utrošena tijekom cijelog procesa uključuje električnu energiju iz PV – a, prirodni plin te biomasu iz anaerobnog digestora. Postavljanjem navedenih čimbenika u sljedeći omjer, dobiva se učinkovitost cjelokupnog procesa:

$$\frac{\text{Proizvedeni SNG (GWh)}}{\text{El.energija iz PV-a (GWh)+ Prirodni plin (GWh)+ Biomasa u digestoru (GWh)}} = \frac{110 \text{ GWh}}{42,83 \text{ GWh}+44,6 \text{ GWh}+91,9 \text{ GWh}} = 61,3\%$$

Na kraju, za simulaciju proizvodnje SNG – a može se reći da je, što se tiče učinkovitosti, vrlo učinkovit proces. Učinkovitost od 61,3% daje još prostora za napredak i poboljšanje, a s obzirom na činjenicu da je ova tehnologija relativno nova, za očekivati je da će se sofisticirana oprema dodatno razvijati i izvedba dodatno poboljšavati te da će stupanj učinkovitosti rasti, odnosno da će gubici biti sve manji.

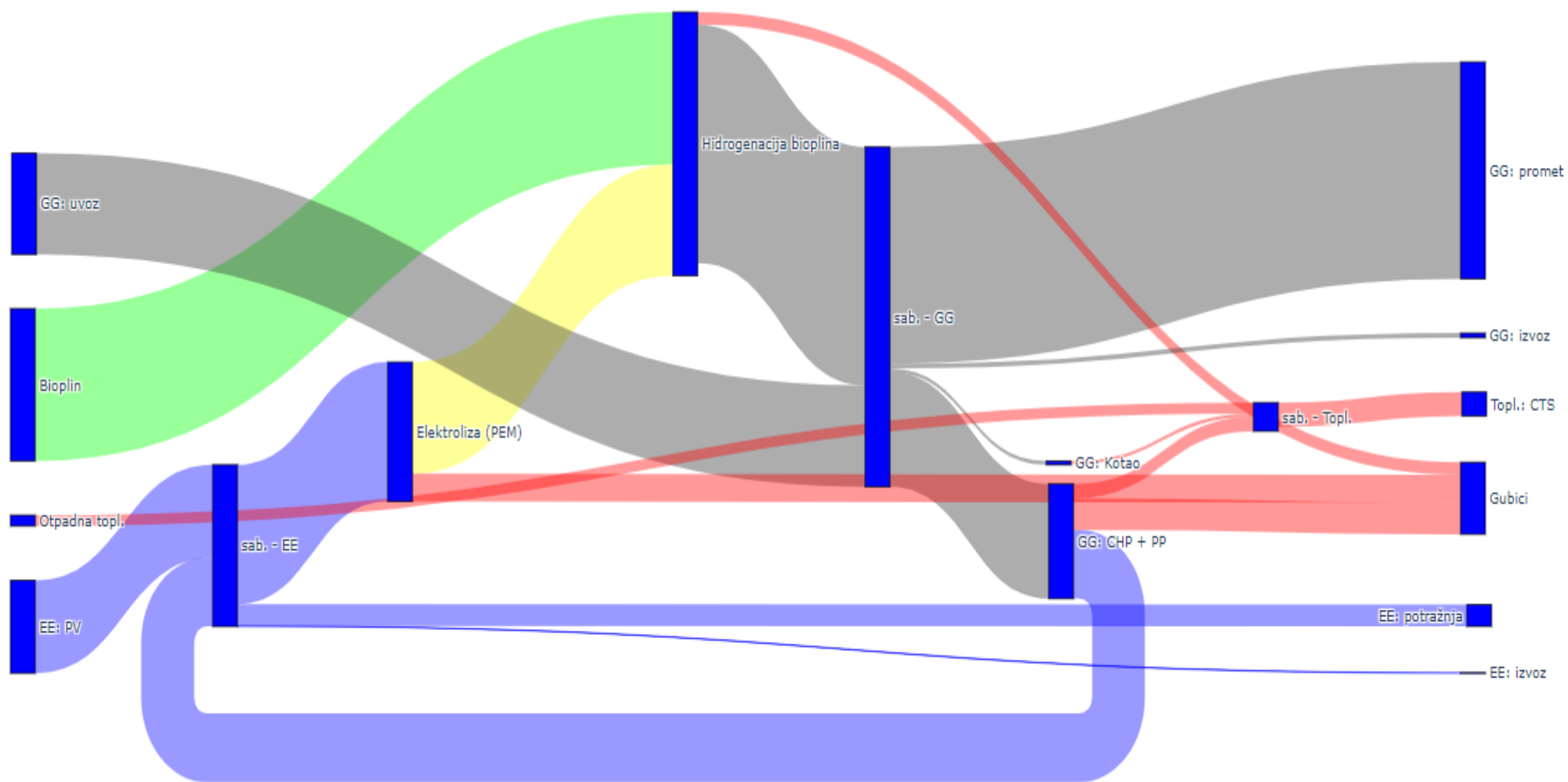
Radi usporedbe, na sljedećoj slici prikazana su sva tri postotka koji su prethodno izračunati (Slika 5-1.).



**Slika 5-1.** Usporedba udjela OIE u proizvodnji energije te prikaz učinkovitosti cijelog procesa

### 5.3. Sankeyevi dijagrami

Radi se o dijagramima koji prikazuju energetske tokove, u ovom slučaju prirodnog plina / SNG – a, bioplina i električne energije. Ulazi energije nalaze se s lijeve strane dijagrama te se onda granaju i usmjeravaju prema izlazima. Uz očekivane ulaze poput prirodnog plina, bioplina i električne energije, kao jedan od ulaza se smatra i otpadna toplina koja se oslobađa tijekom procesa. SNG se u dijagramima javlja nakon prve petlje gdje nastaje sintezom vodika i CO<sub>2</sub>. Ukupna električna energija dolazi iz ukupno dvije strujnice i nakon petlje gdje se strujnice spajaju, nastavlja prema petlji gdje se obavlja metanacija. Izlazi iz energetskog toka definirani su u obliku finalnog energenta koji odlazi u potrošnju, a u slučaju ovog rada su to, kao što je već spomenuto, SNG / prirodni plin u transport i manji dio u toplinske kotlove i izvoz. Osim toga, prikazan je i tok plina koji odlazi u PP / CHP postrojenja. Toplinska energija odlazi u sustave područnog grijanja, dok električna energija odlazi u mrežu te se u neznatnim količinama izvozi. Međutim, dijagram kao i jedan od izlaza prikazuje i gubitke energije koji su prisutni. Važno je još i napomenuti da su širine linija na dijagramu proporcionalne i količini energije koju ta linija simbolizira. Dijagram se može izraditi na temelju dana, mjeseca, godišnjeg doba i sl., dok je sljedeći dijagram napravljen na razini cijele godine (Slika 5-2.).

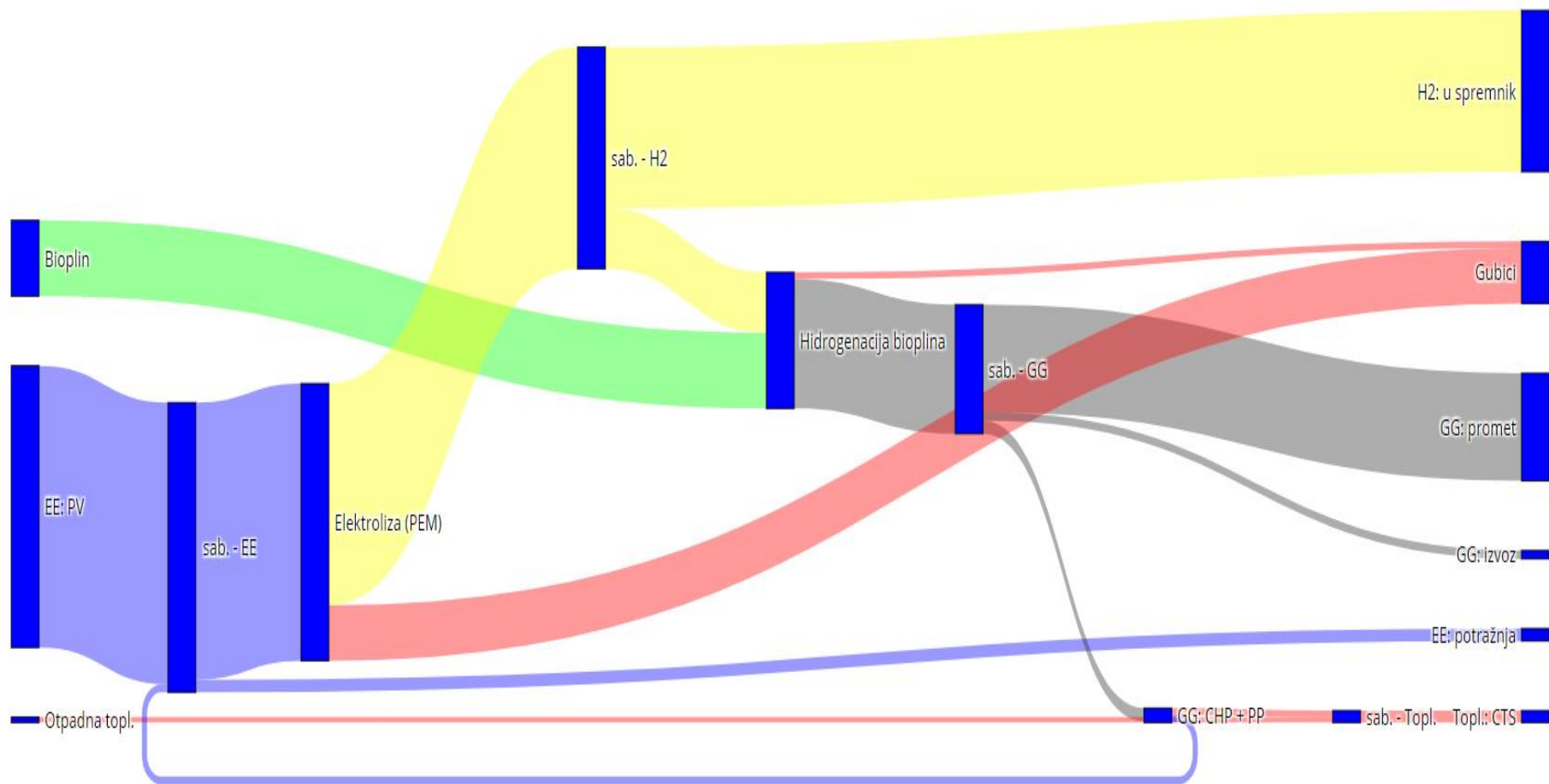


Slika 5-2. Sankeyev dijagram energetske tokova za cijelu godinu

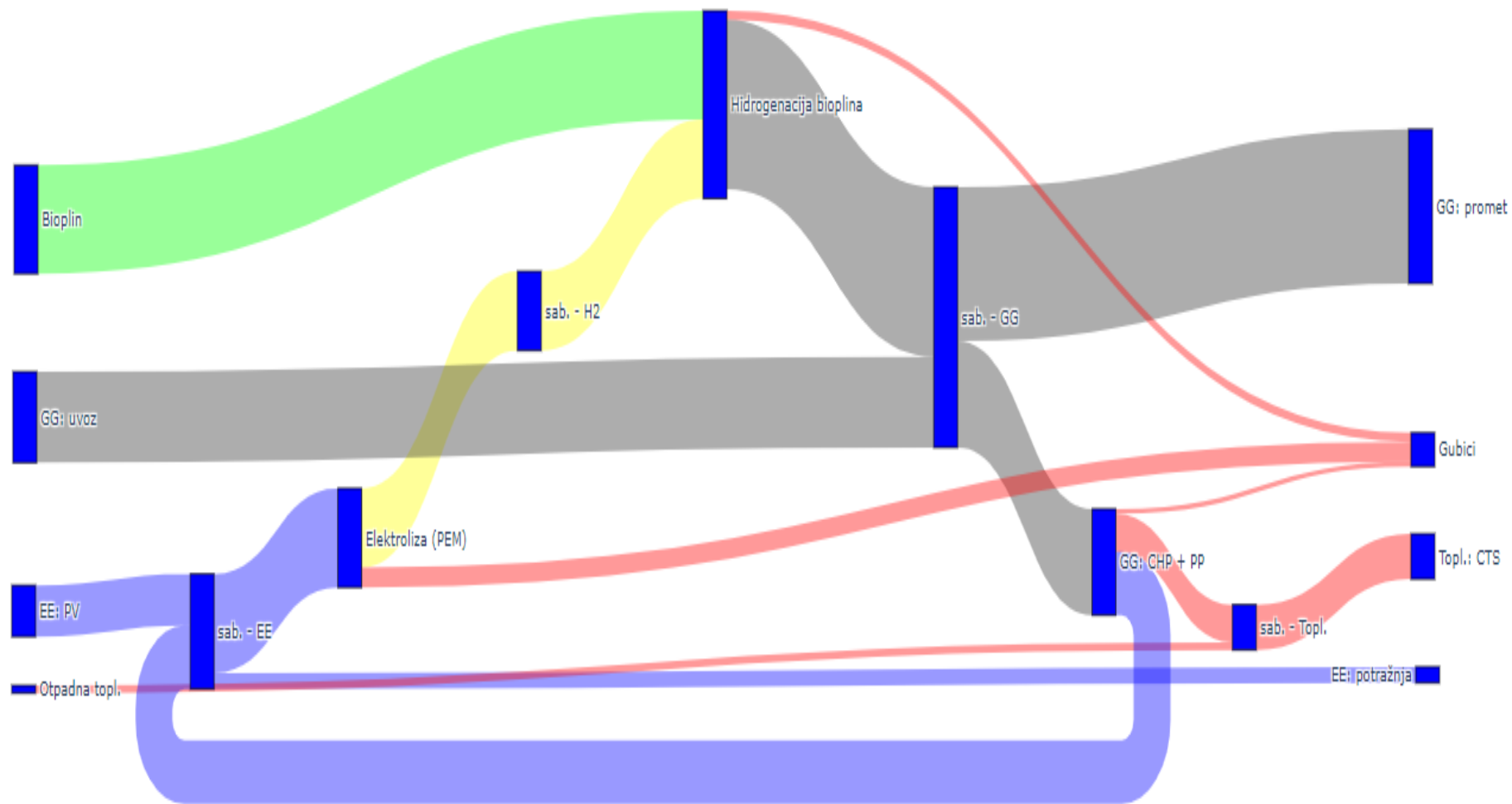
Kao što je već ranije spomenuto, distribucije energije se razlikuju na satnoj razini tijekom čitave godine. To prvenstveno ovisi o dostupnosti „zelene“ električne energije dobivene iz PV – a. Naravno, u ljetnim mjesecima PV je znatno dostupniji, dok se u vrijeme zimskih dana, kada je solarna energija manje dostupna, sustav oslanja na uvoz prirodnog plina. Također, važno je napomenuti da se vodik pojačano skladišti tijekom ljetnih mjeseci jer ga se elektrolizom dobiva više nego što je potrebno za proizvodnju SNG – a. Na sljedećim slikama prikazana su dva Sankeyeva dijagrama na razini jednog sata, jedan za vrijeme ljeta tijekom dana (4427. sat u godini) (Slika 5-3.), te drugi za vrijeme zime (372. sat u godini) (Slika 5-4).

Vidljivo je kako na slici 5-3. uvjerljivo najšira strujnica je ona koja predstavlja električnu energiju dobivenu iz PV – a, dok strujnice uvoza prirodnog plina u ovom slučaju niti nema. Osim toga, primjećuje se i značajna količina pohranjenog vodika tijekom tog sata.

S druge strane, slika 5-4. prikazuje jednu potpuno drugačiju situaciju. Ulaz električne energije iz PV – a je prisutan, no u znatno manjoj količini nego što je to bio slučaj tijekom 4427. sata. Također, na ovom dijagramu je prisutan ulaz prirodnog plina radi pokrivanja svih potreba za energijom, te zato i čvor CHP + PP ovdje igra puno veću ulogu nego na dijagramu ranije.



**Slika 5-3.** Sankeyev dijagram za 4427. sat u godini



**Slika 5-4.** Sankeyev dijagram za 372. sat u godini

## 6. ZAKLJUČAK

Integracija obnovljivih izvora energija i plinskih konvencionalnih energetske postrojenja je trenutno još relativno slabo zastupljena praksa u energetske sustavima Europe. Imajući na umu kako upravo na europskom kontinentu energetska tranzicija poduprta obnovljivim izvorima energije rapidno napreduje, a ulaganja u plinski sektor i dalje rastu, može se pretpostaviti kako će ovaj način proizvodnje i pohrane energije imati budućnost u desetljećima koja dolaze. PtSNG tehnologija se razlikuje od PtH<sub>2</sub> tehnologije jer se vodik u ovom slučaju koristi isključivo kao međuproizvod i omogućuje pohranu energije u obliku sintetskog prirodnog plina sve dok se ne javi potreba za vršnom potrošnjom energije kada se provodi reelektrifikacija ili se dobiveni energent koristi u druge svrhe. Što se tiče RH, u radu sam nastojao prikazati kako je transportni sektor najbolji kandidat za provedbu integracije OIE i plina. Prvenstveno je razlog taj što transportni sektor RH se vrlo sporo dekarbonizira i samim time nudi najviše prostora za poboljšanje. Rezultati su pokazali kako smanjenja emisija na godišnjoj bazi nisu zanemariva. Osim toga, potencijal za implementiranjem ove tehnologije uvelike osnažuje činjenica da je RH bogata solarnom energijom koja je u ovom radu polazište za razvoj PtSNG – a. Također, prikazanim izračunima je dokazano kako je cjelokupni proces, s preko 60%, energetske vrlo učinkovit što također igra vrlo bitnu ulogu. Proces, iako koristi OIE i prirodni plin, je dominantno „zelenog“ karaktera s oko 70% udjela OIE, uz pretpostavku da se eventualnim povećanjem kapaciteta fotonaponskog sustava, taj postotak može još znatno i povećati.



## 7. LITERATURA

1. BAILON ALLEGUE, L., HINGE, J., 2012. Biogas and Bio-syngas Upgrading
2. ENERGETSKI INSTITUT HRVOJE POŽAR, 2020. EIHP, Energija u Hrvatskoj, 2019., godišnji energetska pregled
3. GUILERA, J., MORANTE, J.R., ANDREU, T., 2018. Economic Viability of SNG Production From Power and CO<sub>2</sub>
4. BALAN, O. M., BUGA, M. R., BRUNOT, A., BADEA A., FROELICH, D., 2016. Technical and Economic Evaluation of Power-to-Gas in Link With a 50 MW Wind Park
5. JURGENSEN, L., 2015. Dynamic Biogas Upgrading for Integration of Renewable Energy from Wind, Biomass and Solar, Department of Energy Technology, Aalborg University
6. KUMAR, S., HIMABINDU, V., 2019. Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis – A review
7. LUND, H., 2020. EnergyPLAN: Advanced Energy Systems Analysis Computer Model
8. PICKERING, D., 2019. Bio-synthetic Natural Gas for Heating and Transport Applications: the UK Case
9. POESCHL, M., WARD, S., OWENDE, P., 2010. Evaluation of Energy Efficiency of Various Biogas Production and Utilization Pathways
10. SVEINBJÖRNSSON, D., MÜNSTER, E., 2017. Upgrading of Biogas to Biomethane with the Addition of Hydrogen from Electrolysis
11. ŠARČEVIĆ, F., 2020. Mogućnosti iskorištavanja vodika kao goriva, diplomski rad
12. VRANKIĆ, I., 2017. Procjena utjecaja integracije fotonaponskih modula u energetska sustav Republike Hrvatske pomoću programa EnergyPLAN, diplomski rad

Web izvori:

13. CENTAR ZA VOZILA HRVATSKE, 2020. Prosječno godišnje prijeđeni put po kategorijama vozila za 2020. godinu  
URL: [https://www.cvh.hr/media/3694/s10\\_prosjecno\\_godisnje\\_prijedeni\\_put\\_povv\\_za\\_2020.pdf](https://www.cvh.hr/media/3694/s10_prosjecno_godisnje_prijedeni_put_povv_za_2020.pdf)  
(21.08.2021.)
14. DHMZ, 2019. Srednje mjesečne vrijednosti i ekstremi, trajanje osunčavanja Split i Zagreb  
URL: [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_podaci&param=k1&Grad=splitmarjan](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci&param=k1&Grad=splitmarjan)  
(08.07.2021.)  
URL: [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_podaci&param=k1&Grad=zagrebmaksimir](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci&param=k1&Grad=zagrebmaksimir)  
(08.07.2021.)
15. ELMOK.HR, Sunčevo zračenje  
URL: [http://www.elmok.hr/sunceva\\_energija.html](http://www.elmok.hr/sunceva_energija.html) (12.07.2021.)
16. ENERGY.GOV, Solar Photovoltaic Technology Basics  
URL: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>  
(12.07.2021.)
17. IEA, 2018. Biogas production by region and by feedstock type, 2018,  
URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/biogas-production-by-region-andby-feedstock-type-2018> (17.07.2021.)
18. IEA, 2020. Carbon intensity of industry energy consumption, Croatia 1990-2018  
URL: <https://www.iea.org/countries/croatia> (03.07.2021.)
19. IEA, 2020. Electricity generation by source, Croatia, 2012. – 2019.  
URL: <https://www.iea.org/countries/croatia> (04.07.2021.)
20. IEA, 2020. Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth, IEA, Paris  
URL: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth> (17.07.2021.)

21. IEA, 2019. Renewables and Waste, Croatia, 2018  
URL: <https://www.iea.org/dataandstatistics/datatables?country=CROATIA&energy=Renewables%20%26waste&year=2018> (07.07.2021.)
22. IEA, 2020. Solar PV  
URL: <https://www.iea.org/reports/solar-pv> (10.07.2021.)
23. IEA, 2020. Total final consumption (TFC) by sector, Croatia 2000. – 2018.  
URL: <https://www.iea.org/countries/croatia> (03.07.2021.)
24. NATURAL GAS VEHICLES, 2010. The Future of Transport, Case Study  
URL: [https://www.gasnetworks.ie/business/natural-gas-in-transport/celtic-linen-case-study/CNG\\_Case\\_Study.pdf](https://www.gasnetworks.ie/business/natural-gas-in-transport/celtic-linen-case-study/CNG_Case_Study.pdf) (17.08.2021.)
25. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS), 2016.  
Daily Radiation, Zagreb  
URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/tools/daily-radiation> (10.07.2021.)
26. WINGAS, 2019. Mobility With Natural Gas  
URL: <https://www.wingas.com/en/raw-material-natural-gas/mobility-with-natural-gas.html> (17.08.2021.)

## IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Simulacija proizvodnje sintetskog prirodnog plina za potrebe dekarbonizacije energetskog sustava Republike Hrvatske“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko – geološko – naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*

*Franko Zgombić*

---

Franko Zgombić



KLASA: 602-04/21-01/215  
URBROJ: 251-70-12-21-2  
U Zagrebu, 15.9.2021.

**Franko Zgombić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/215, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 29.6.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### SIMULACIJA PROIZVODNJE SINTETSKOG PRIRODNOG PLINA ZA POTREBE DEKARBONIZACIJE ENERGETSKOG SUSTAVA REPUBLIKE HRVATSKE

Za voditelja 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

Voditelj:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastava i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)