

# Tehno-ekonomska analiza prelaska centralnog toplinskog sustava Grada Zagreba na sustav četvrte generacije korištenjem programa EnergyPLAN

---

Vicelja, Josip

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:169:009122>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-28**



Repository / Repozitorij:

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



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

**TEHNO – EKONOMSKA ANALIZA PRELASKA CENTRALNOG TOPLINSKOG  
SUSTAVA GRADA ZAGREBA NA SUSTAV ČETVRTE GENERACIJE  
KORIŠTENJEM PROGRAMA ENERGYPLAN**

Diplomski rad

Josip Vicelja  
N322

Zagreb, 2021

TEHNO – EKONOMSKA ANALIZA PRELASKA CENTRALNOG TOPLINSKOG  
SUSTAVA GRADA ZAGREBA NA SUSTAV ČETVIRTE GENERACIJE  
KORIŠTENJEM PROGRAMA ENERGYPLAN

JOSIP VICELJA

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Dekarbonizacija sektora zgradarstva imati će ključnu ulogu u budućim strategijama smanjenja emisija stakleničkih plinova. Kako bi se omogućila provedba dekarbonizacije zastarjelog centraliziranog toplinskog sustava Grada Zagreba, potrebna je obnova postojeće distribucijske mreže i energetska obnova ovojnica priključenih zgrada. Obnova toplinske mreže na zahtjeve četvrte generacije centraliziranih toplinskih sustava predstavlja značajan potencijal u ostvarivanju nižih razina emisija stakleničkih plinova. U ovome radu analizira se referentni scenarij toplinskog sustava Grada Zagreba izrađenog prema podacima za 2018. godinu i četiri scenarija integracije različitih obnovljivih izvora energije. Simulacija odabranih scenarija provodi su u računalnom programu EnergyPLAN. Računalni program EnergyPLAN nudi pomoć pri izradi strategija za razvoj energetske sustava.

Ključne riječi: centralizirani toplinski sustav, centralizirani toplinski sustav četvrte generacije, EnergyPLAN.

Diplomski rad sadrži: 43 stranica, 9 tablica, 20 slika i 52 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNF

Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNF

Datum obrane: 17. rujna 2021., Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

TECHNO – ECONOMIC ANALYSIS OF TRANSITIONING TO FOURTH  
GENERATION DISTRICT HEATING PROSPECTS IN ZAGREB USING ENERGYPLAN  
SOFTWARE

JOSIP VICELJA

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy,  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

Decarbonization of the district heating sector will play a key role in future greenhouse gases emission reduction strategies. To enable decarbonization of the outdated Zagreb district heating system, refurbishment of the district heating grid is required, as is refurbishment of connected building envelopes. In this thesis, analysis is done on a 2018. reference scenario of the thermal system of Zagreb, and on four scenarios of implementation of varied renewable energy sources. Simulation of the theoretical scenarios is performed using the EnergyPLAN software. The EnergyPLAN software offers help in creating strategies for the development of energy systems.

Keywords: district heating systems, fourth generation district heating systems, EnergyPLAN

Thesis contains: 43 pages, 9 tables, 20 figures and 52 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited 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 Tomislav Kurevija, PhD  
Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Date of defense: September 17th, 2021., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Zagreb

## ZAHVALE

Iako je ovaj rad plod vlastitog rada i truda, pisanje istog omogućila mi je podrška velike količine ljudi. Ti ljudi zaslužuju da im se najsrčanije zahvalim.

Najveću pomoć pri izradi ovoga rada dobio sam od svojeg mentora, profesora Luke Perkovića. Zahvaljujem mu na neumornim satima podrške te trudu i strpljenju kojim se posvetio mentorstvu ovoga rada.

Također, zahvaljujem se i asistentima i profesorima na znanju prenesenom tijekom školovanja.

Zahvalio bih svojoj obitelji i prijateljima na skrbi i ljubavi koju su mi pružali tijekom cijelog trajanja ove moje akademske avanture.

Konačno, zahvalio bih se i svim čitateljima ovoga rada. Ispred sebe imate rad koji predstavlja moje sveučilišno obrazovanje.

Nadam se da ćete uživati u njemu.

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>II</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH SKRAĆENICA .....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH JEDINICA .....</b>	<b>IV</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI .....</b>	<b>2</b>
2.1. Centralizirani toplinski sustavi.....	2
2.2. Povijest centraliziranih toplinskih sustava .....	3
<b>3. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI ČETVRTE GENERACIJE (4GDH) 5</b>	<b>5</b>
3.1. Centralizirani toplinski sustavi četvrte generacije (4GDH) .....	5
3.2. Temperaturni zahtjevi 4GDH sustava .....	5
3.2.1. <i>Niža povratna temperatura</i> .....	5
3.2.2. <i>Temperaturna ograničenja</i> .....	6
3.3. Pametni energetske sustavi .....	7
3.4. Proizvodnja topline .....	7
3.4.1. <i>Kogeneracijska postrojenja</i> .....	7
3.4.2. <i>Dizalice topline</i> .....	8
3.4.3. <i>Solarna energija</i> .....	8
3.4.4. <i>Geotermalna energija</i> .....	8
3.4.5. <i>Biomasa</i> .....	13
3.4.6. <i>Otpadna toplina iz procesa spaljivanja otpada i industrijskih procesa</i> .....	13
3.4.7. <i>Potrošači kao proizvođači toplinske energije</i> .....	14
3.5. Spremnici topline .....	14
3.6. Distribucija toplinske energije .....	15

3.6.1. <i>Toplinska stanica</i> .....	16
<b>4.    MODELIRANJE I SIMULACIJA ENERGETSKIH SUSTAVA U PROGRAMU ENERGYPLAN</b> .....	<b>18</b>
<b>5.    ANALIZA SLUČAJA ZA GRAD ZAGREB</b> .....	<b>20</b>
5.1.    Centralni toplinski sustav Grada Zagreba .....	20
5.1.1. <i>EL – TO Zagreb</i> .....	21
5.1.2. <i>TE – TO Zagreb</i> .....	22
5.2.    Geotermalni potencijal Grada Zagreba .....	24
5.3.    Potencijal solarnih kolektora u Gradu Zagrebu.....	25
5.4.    Potencijal spaljivanja komunalnog otpada u Gradu Zagrebu.....	27
5.5.    Izrada referentnog modela Grada Zagreba u EnergyPLAN – u.....	28
5.5.1. <i>Potražnja za toplinskom energijom</i> .....	28
5.5.2. <i>Proizvodnja toplinske energije</i> .....	30
5.6.    Razmatrani scenariji dekarbonizacije s pogledom na CTS četvrte generacije.....	30
5.6.1. <i>Scenarij S1</i> .....	31
5.6.2. <i>Scenarij S2</i> .....	31
5.6.3. <i>Scenarij S3</i> .....	32
5.6.4. <i>Scenarij S4</i> .....	32
5.7.    Troškovi vezani uz implementaciju razmatranih scenarija .....	32
5.7.1. <i>Troškovi vezani uz proizvodnju geotermalne energije</i> .....	33
5.7.2. <i>Troškovi vezani uz proizvodnju toplinske energije iz solarnih kolektora</i> .....	33
5.7.3. <i>Troškovi vezani uz proizvodnju toplinske energije spaljivanjem otpada</i> .....	33
5.7.4. <i>Troškovi vezani uz primjenu dizalica topline</i> .....	33
5.7.5. <i>Troškovi vezani uz skladištenje toplinske energije</i> .....	33
5.8.    Analiza rezultata simulacija provednih u programu EnergyPLAN .....	34
<b>6.    ZAKLJUČAK</b> .....	<b>38</b>
<b>7.    LITERATURA</b> .....	<b>39</b>

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Centralizirani toplinski sustav.....	2
<b>Slika 2-2.</b> Četvrta generacija CTS - a u odnosu na prijašnje generacije .....	4
<b>Slika 3-1.</b> Primjena geotermalne energije .....	9
<b>Slika 3-2.</b> Shema CTS - a s izravnom proizvodnjom geotermalnog fluida u distribucijsku mrežu .....	10
<b>Slika 3-3.</b> Shema geotermalnog CTS - a u izvedbi zatvorene petlje .....	10
<b>Slika 3-4.</b> Shema geotermalnog CTS - a s primjenom dizalica topline.....	11
<b>Slika 3-5.</b> Grafički prikaz decentraliziranog GSHP sustava .....	12
<b>Slika 3-6.</b> Decentralizirana toplinska stanica (IHEU) .....	16
<b>Slika 3-7.</b> DHSU toplinska stanica.....	17
<b>Slika 4-1.</b> Početno sučelje programa .....	18
<b>Slika 5-1.</b> Podjela mreže CTS-a grada Zagreba .....	21
<b>Slika 5-2.</b> Karta potencijala proizvodnje toplinske energije solarnim kolektorima postavljenim na krovovima .....	26
<b>Slika 5-3.</b> Potencijal proizvodnje toplinske energije solarnim kolektorima za odabrano područje.....	27
<b>Slika 5-4.</b> Shematski prikaz energetskega toka Grada Zagreba za 2018. godinu .....	28
<b>Slika 5-5.</b> Satna distribucija potražnje za toplinskom energijom CTS – a.....	30
<b>Slika 5-6.</b> Proizvodnja toplinske energije CTS – a scenarija S2 .....	35
<b>Slika 5-7.</b> Satna ispunjenost sezonskog spremnika topline scenarija S2.....	35
<b>Slika 5-8.</b> Proizvodnja toplinske energije CTS – a scenarija S3 .....	36
<b>Slika 5-9.</b> Satna ispunjenost sezonskih spremnika toplina scenarija S3 kroz cijelu godinu ...	36
<b>Slika 5-10.</b> Satna ispunjenost sezonskih spremnika topline scenarija S3 za mjesec siječanj..	37



## POPIS TABLICA

<b>Tablica 3-1.</b> Značajke sezonskih spremnika topline .....	15
<b>Tablica 5-1.</b> Osnovni podaci proizvodnih jedinica postrojenja EL – TO Zagreb.....	22
<b>Tablica 5-2.</b> Osnovni podaci proizvodnih jedinica postrojenja TE – TO Zagreb.....	23
<b>Tablica 5-3.</b> Bušotine na području geotermalnog polja Zagreb s osnovnim karakteristikama .....	24
<b>Tablica 5-4.</b> Proizvodnja energenata u energetske transformacijama .....	29
<b>Tablica 5-5.</b> Struktura oblika energije u neposrednoj potrošnji Grada Zagreba u 2018. godini .....	29
<b>Tablica 5-6.</b> Modelirani scenariji .....	32
<b>Tablica 5-7.</b> Učinak pojedinačnih scenarija na dekarbonizaciju CTS - a .....	34
<b>Tablica 5-8.</b> Tablični prikaz godišnjih troškova simuliranih scenarija.....	37

## POPIS KORIŠTENIH SKRAĆENICA

4GDH – centralizirani toplinski sustav četvrte generacije (engl. *4<sup>th</sup> generation district heating*)

ATES - toplinski spremnik u obliku vodonosnika (engl. *Aquifer thermal energy storage*)

BTES - bušotinski toplinski spremnik (engl. *Borehole thermal energy storage*)

CTS – centralizirani toplinski sustav

DHSU – toplinska stanica sa spremnikom topline na primaru (engl. *DH storage tank unit*)

EL – TO - Elektrana – Toplana Zagreb

GSHP – geotermalne dizalice topline (engl. *ground-source heat pumps*)

IEA - Međunarodna energetska agencija (eng. *International Energy Agency*)

IHEU – decentralizirana toplinska stanica (engl. *Instantaneous Heat Exchanger Unit*)

K – visokotlačni parni kotao

KKE – kombi kogeneracijska elektrana

KU – kotlovi na ispušne plinove

OiE – obnovljivi izvori energije

PAT – parne turbine i generatori

PK – parni kotao

PP – prirodni plin

PU – plinsko ulje

PT – plinske turbine i generatori

PTES - toplinski spremnik u obliku jame (engl. *Pit thermal energy storage*)

TE – TO - Termoelektrana – Toplana Zagreb

TTES - čelični toplinski spremnik (engl. *Tank thermal energy storage*)

VK – vrelovodni kota

## **POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH JEDINICA**

P – snaga [kW]

q – protok [m<sup>3</sup>/s]

ρ – gustoća [kg/m<sup>3</sup>]

c<sub>p</sub> – specifični toplinski kapacitet [kJ/kgK]

ΔT – temperaturni pad [K]

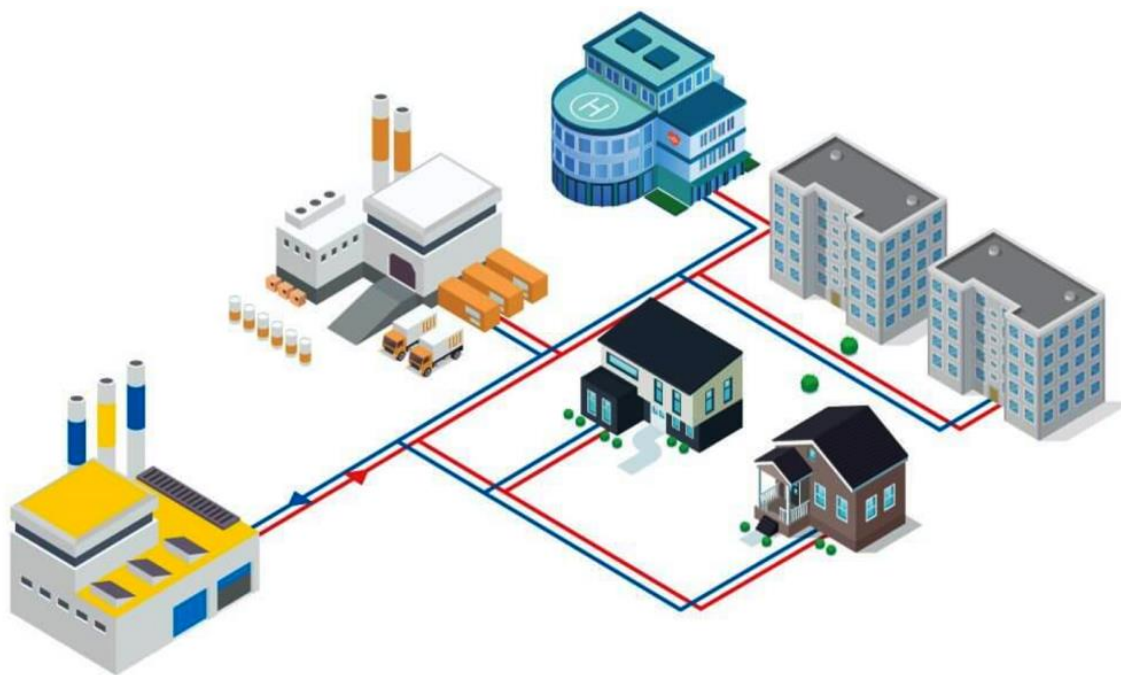
## 1. UVOD

Sektor grijanja i hlađenja predstavlja polovinu ukupne potrošnje energije u Europi, dok se 27% te potrošnje zauzima za grijanje prostora. Čak 66% te potrošnje pokriva toplinska energija pridobivena iz fosilnih goriva (47% iz plina, 12% iz nafte, 12% iz ugljena), dok se centraliziranim toplinskim sustavima pokriva samo 9% (Heat Roadmap Europe, 2017). U borbi protiv negativnih posljedica globalnog zatopljenja 2016. godine na snagu je stupio Pariški sporazum. Države ovoga sporazuma obvezale su se da će djelovati s ciljem zadržavanja rasta prosječne globalne temperature na maksimalnoj razini od 2 °C, s mogućim snižavanjem te razine na 1,5 °C do kraja stoljeća (Službeni list Europske unije, 2016). Europska Unija donijela je paket mjera „Čista energija za sve Europljane“ s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova za 40%, povećanjem udjela obnovljivih izvora energije na 32% i povećanjem efikasnosti na 32,5% do 2030. godine (Glavna uprava za energetiku - Europska komisija, 2019). Donošenjem europskog zelenog plana, Europska Unija planira smanjiti emisije stakleničkih plinova za minimalno 55% u odnosu na 1990. godine do 2030 (European Commission, 2021). Obzirom na visoki udio potrošnje energije koju zahtjeva sektor grijanja i hlađenja, centralizirani toplinski sustavi, zahvaljujući svojoj izrazitoj učinkovitosti u gusto naseljenim područjima i sposobnosti iskorištavanja toplinskih izvora nižih energetske vrijednosti, od ključne su važnosti u tranziciji na čisti i održivi energetski sustav Unije. Ovaj rad posvetiti će se opisivanju koncepta četvrte generacije centraliziranog toplinskog sustava, te će se analizirati učinci implementacije takvog sustava na slučaju grada Zagreba. Posebna pažnja posvetiti će se mogućnostima iskorištavanja potencijala obnovljivih izvora energije prisutnih na području grada.

## 2. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI

### 2.1. Centralizirani toplinski sustavi

Centralizirani toplinski sustavi (CTS) opskrbljuju stambene ili poslovne zgrade termalnom energijom u obliku vodene pare, ili tople vode iz nekog središnjeg mjesta u svrhu grijanja prostora, grijanja vode, kuhanja, industrijskih procesa i sl. Potrebe za toplinskom energijom ne zadovoljavaju se radom kotlova na mjestu potrošnje, čime se smanjuju emisije i troškovi proizvodnje toplinske energije. Izvori toplinske energije su mnogobrojni, a uključuju spaljivanje fosilnih goriva, biomase i otpada; obnovljive izvore energije poput solarne energije ili geotermalnih izvora; te otpadnu toplinu iz procesa proizvodnje električne energije. Navedeni proces korištenja otpadne topline iz procesa proizvodnje električne energije zove se kogeneracijski proces, čijom se primjenom u centraliziranim toplinskim sustavima dodatno povećava učinkovitost sustava. Slika 2-1 grafički prikazuje izgled tipičnog CTS – a.



**Slika 2-1.** Centralizirani toplinski sustav (Solarthermalworld, 2019)

## 2.2. Povijest centraliziranih toplinskih sustava

Najstariji primjer CTS - a, koji je još uvijek u pogonu, nastao je u 14. stoljeću u Chaude - Aiguesu u Francuskoj gdje se topla voda iz geotermalnih izvora distribuirala drvenim cijevima i toplinom opskrbljivala tridesetak nastambi. No, prvi komercijalni CT sustav čija se izgradnja uzima kao početak razvoja ove tehnologije izgrađen je 1877. u Lockportu u američkoj saveznoj državi New York. Taj sustav opskrbljivao je nekolicinu tvornica i kućanstava toplinskom energijom distribucijom pare cjevovodima. Izvanredni rast primjene ove tehnologije u Sjedinjenim Američkim Državama vezan je uz izgradnju nebodera u velikim američkim gradovima koja je započela u 1880. – ima. Izgrađeni sustavi koristili su vodenu paru kao medij prijenosa topline. Najpoznatiji primjer je CTS Manhattana u New Yorku, koji je započeo s radom 1882. godine, te je još uvijek uporabi.

Za razliku od SAD – a, CTS – i u Europi razvijali su se neovisno o izgradnji nebodera, te su se prvi put pojavili početkom 20. stoljeća. Prvi među europskim gradovima s CTS – ima su Dresden (1900), Frederiksberg (1903), Manchester (1911) i Bergen (1918) (Gallo, 2003). Ovi sustavi nisu bili primjenjivani u komercijalne svrhe, već su često služili za smanjenje rizika od požara, kao i pružanje topline određenim prioritetnim zgradama. 20. – ih godina 21. stoljeća u pogon su pušteni prvi komercijalni CT sustavi u Europi. U tom periodu od 1920. do 1935. centralizirani toplinski sustavi razvili su se u gradovima Belgije, Čehoslovačke, Danske, Francuske, Nizozemske, Njemačke, Norveške, Sovjetskog Saveza, Švicarske i Ujedinjenog Kraljevstva. Dominantna tehnologija ovih sustava bila je distribucija niskotlačne vodene pare na temperaturama iznad 100 °C, te predstavlja prvu generaciju centraliziranih toplinskih sustava (Lund et al., 2014).

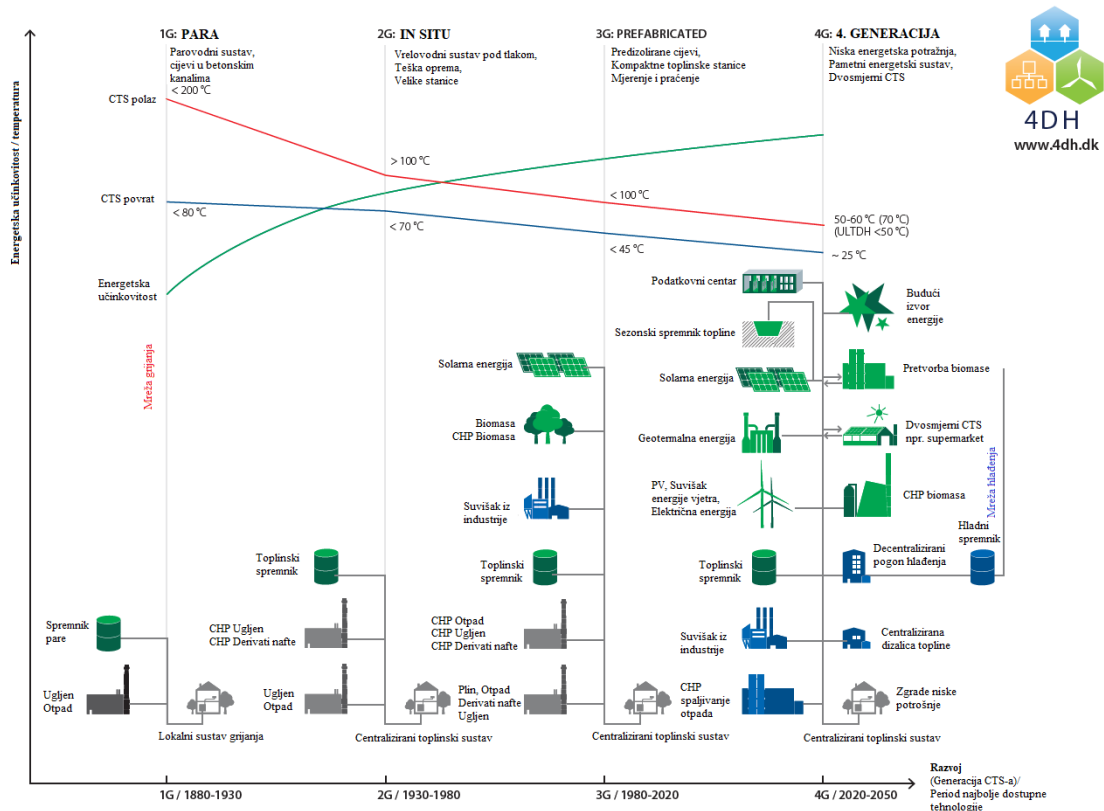
Širenjem postojećih, te izgradnjom novih CT sustava tijekom obnove i širenja gradova nakon Drugog svjetskog rata, u pitanje se dovela učinkovitost uporabe niskotlačne vodene pare naspram vrele vode kao radnog medija. U Europskim gradovima se tako kao radni medij počela upotrebljavati stlačena vrela voda pri temperaturama višim od 100 °C, čime je obilježena druga generacija centraliziranih toplinskih sustava. Ova tehnologija prevladavala je u novoizgrađenim sustavima do 1970. – ih (Lund et al., 2014).

Treća generacija centraliziranih toplinskih sustava razvila se je kao direktna posljedica naftnih šokova 1970. – ih. Daljnje povećanje korisnosti CT sustava predstavilo je sredstvo smanjenja ovisnosti o uvozu fosilnih goriva. U tu svrhu, stručnjaci Europskih država (pogotovo oni iz skandinavskih zemalja Danske, Finske i Švedske) zagovarali su uporabu

nižih temperatura (ispod 100 °C) vode u opskrbi sustava. Smanjenjem temperature otvara se mogućnost proizvodnje toplinske energije kogeneracijskim postrojenjima, te iz jeftinijih izvora energije poput biomase, otpada, kao i geotermalnih izvora i sunčevog zračenja. Također, povećanje korisnosti sustava ove generacije postiže se i uporabom predizoliranih cijevi, te kompaktnih podstanica s ugrađenim pločastim izmjenjivačima topline (Lund et al., 2014).

Predviđeno smanjenje potražnje za toplinskom energijom u sektoru zgradarstva, kao i nužnost tranzicije s fosilnih goriva na ekološki prihvatljivije izvore energije potiču daljnji razvoj CTS – a. Trenutno je u razvoju četvrta generacija centraliziranih toplinskih sustava koja nudi dodatno smanjenje temperatura distribucijskog medija. Smanjenjem temperature opskrbe smanjuju se toplinski gubici u distribuciji, te se pruža mogućnost iskorištavanja dosad neiskoristivih izvora energije. Uporabom spremnika topline, te integracijom toplinske mreže u sustav pametnih energetskih mreža također se očekuje povećanje iskoristivosti i održivosti ovih sustava (Lund et al., 2014).

Razvoj centraliziranih toplinskih sustava slikovito prikazuje slika 2-2.



Slika 2-2. Četvrta generacija CTS - a u odnosu na prijašnje generacije (Thorsen et al., 2018.)

### 3. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI ČETVRTE GENERACIJE (4GDH)

#### 3.1. Centralizirani toplinski sustavi četvrte generacije (4GDH)

Temeljni koncept 4GDH sustava je razvoj pametnih toplinskih mreža. Prema (Lund et al., 2014) pametne toplinske mreže definirane su kao sustav umreženih cijevi čija je svrha predaja toplinske energije korisnicima iz centralnog mjesta proizvodnje toplinske energije, ali i iz više rasprostranjenih mjesta proizvodnje i spremnika topline, što uključuje i same građevine spojene na mreži. Razvojem ovih sustava očekuje se rješavanje sljedećih izazova:

1. Sposobnost snabdijevanja CTS – a niskotemperaturnom toplinskom energijom za grijanje prostora i potrošne tople vode.
2. Sposobnost distribucije toplinske energije s niskim mrežnim gubicima
3. Sposobnost prerade i ponovne uporabe toplinske energije iz izvora nižih temperatura
4. Sposobnost integracije toplinske mreže u sklop pametnog energetskog sustava
5. Sposobnost osiguravanja primjerenih struktura planiranja, troškova i motivacije, što uključuje razvoj organizacijskih i institucionalnih strategija s prikladnim strukturama subvencioniranja.

Za razliku od prve tri generacije centraliziranih sustava grijanja, razvoj 4GDH uključuje uravnoteženje opskrbe energije s očuvanjem energije. Time se rješava problem opskrbljivanja sve više energetski učinkovitijih građevina toplinskom energijom, te se otvara mogućnost uporabe više obnovljivih izvora energije. Smanjenjem temperaturnih režima unutar CTS – a ostvaruju se korisni učinci u distribuciji i u proizvodnji toplinske energije. U distribuciji se ostvaruju niži toplinski gubici unutar toplinske mreže, te se smanjuju toplinska naprezanja u cijevima i opasnost od opekline. Niže temperature također imaju pozitivan utjecaj na povećanje omjera snage i topline i uporabu otpadne topline kondenzacijom dimnih plinova, omogućuju postizanje viših koeficijenata učinkovitosti (COP) dizalica topline, te omogućuje primjenu šireg spektra niskotemperaturnih izvora toplinske energije (Lauenburg, 2016).

#### 3.2. Temperaturni zahtjevi 4GDH sustava

##### 3.2.1. Niža povratna temperatura

Temperaturni režimi u 4GDH sustavima definirani su u razmjeru od 50 °C do 70 °C polazne vode, te od 25 °C do 40 °C povratne vode. Postojeće zgrade s tradicionalnim grijačima



zahtijevaju više temperature, dok za zgrade s podnim grijanjem temperatura polazne vode može biti i par stupnjeva iznad sobne, a temperatura povratne vode oko 20 °C. Temperaturni režim može biti fleksibilan u periodima vršne potrošnje, povremenim povisivanjem temperature za vrijeme najveće potražnje (Lund et al., 2014).

Količina toplinske energije predana krajnjem korisniku može se regulirati na dva načina: promjenom protoka radnog medija, ili promjenom temperaturne razlike polaza i povrata radnog medija. Što su veći protok i temperatura polazne vode, to su veći gubici tlaka i toplinski gubici u mreži. Niža temperatura polazne vode u sustavu rezultirati će višom temperaturom povratne vode. Razlog tome je što se teoretski za istu količinu predane topline pri nižoj temperaturi mora povećati protok radnog medija, što rezultira kraćim vremenom prolaza radnog medija kroz izmjenjivače topline i grijače. U praksi to nije nužno slučaj zbog postojanja grešaka u izvedbi mrežnih instalacija i nenamjernih miješanja polaznog i povratnog toka vode. Kako količina predane energije ovisi o razlici temperatura polazne i predane vode, smanjenjem povratne temperature omogućuje se korištenje niže polazne temperature pri istom masenom protoku, čime se smanjuju toplinski gubici i povećava efikasnost (Lauenburg, 2016).

### 3.2.2. Temperaturna ograničenja

Minimalna temperatura polazne vode za svrhe grijanja prostora ograničena je toplinskom potražnjom sektora zgradarstva i industrije, koja ovisi o energetske učinkovitosti zgrada i izvedbi kućnih instalacija. CTS krajnjem korisniku mora tokom cijele godine osiguravati dostatnu temperaturu u sustavu koja jamči toplinsku ugodnost, ovisno o vanjskoj temperaturi.

Topla potrošna voda mora zadovoljavati minimalne temperaturne uvjete radi prevencije razmnožavanja bakterije *Legionella pneumophilla*. *Legionella pneumophilla* uzročnik je legionarske bolesti koja se očituje kao upala pluća te može rezultirati smrću zaraženoga. Ova bakterija razmnožava se u toploj vodi između 20 – 45 °C, idealno na 38 °C. Osim temperature, na razmnožavanje bakterije utječe i izvedba instalacija za pripremu tople potrošne vode (materijal, dimenzije i način postavljanja cijevi; spremnici potrošne vode), starost sustava za pripremu potrošne tople vode i prisutnost bio filma. Iz praktičkih razloga razmnožavanje ove bakterije u većini slučajeva sprječava se održavanjem minimalne temperature polazne vode iznad 50 °C. Za slučajeve nižih temperatura polazne vode, postoji mogućnost zagrijavanje potrošne vode na mjestu konzumacije uporabom manjih dizalica

topline, električnih grijača, kabela za grijanje cijevi, te uporabom decentraliziranih toplinskih stanica u svakom domu. Također postoji mogućnost uporabe kemijskih, termalnih i mehaničkih metoda sterilizacije vode (Yang et al., 2016).

### 3.3. Pametni energetske sustavi

Pametni energetske sustavi podrazumijevaju integraciju električne, toplinske i plinske mreže u jedan cjelokupni energetske sustav u kojem se mogu koordinirano i međusobno usklađivati u svrhu povećanja učinka cjelokupnog sustava. Povezivanjem električnog i toplinskog sektora, na primjer omogućiti će se primjena električne energije za stvaranje toplinske energije dok postoji suvišak električne energije (power to heat). Ta toplinska energija može se pohraniti u spremnicima topline, koji su efikasniji i jeftiniji od spremnika električne energije, čime se postiže učinkovitije korištenje energije. Dodatnu fleksibilnost sustava omogućiti će i mogućnost razmjene energetskih kapaciteta među sustavima, iako u manjoj mjeri za CTS – e, obzirom da su u pravilu lokalizirani sustavi (Lund, 2014). Pametni sustavi upravljanja potražnjom također će biti ključan dio sustava, kao i omogućavanje potrošačima da kupuju i prodaju energiju unutar sustava (Schleicher - Tappeser, 2012).

### 3.4. Proizvodnja topline

Jedna od prednosti niskih temperatura pri kojima rade 4GDH sustavi je mogućnost iskorištavanja dosada tehnički neupotreblijivih i ekonomski neisplativih izvora toplinske energije. Upravo ta značajka doprinosi povećanja fleksibilnosti sustava i diverzifikacije proizvodnje toplinske energije, što uvjetuje većoj pouzdanosti i sigurnosti opskrbe sustava. Snižene temperature također imaju pozitivan učinak na rad većinu konvencionalnih procesa proizvodnje toplinske energije, poput kogeneracijskih postrojenja.

#### 3.4.1. Kogeneracijska postrojenja

Kogeneracija je istodobna proizvodnja električne i toplinske energije korištenjem otpadne topline iz procesa proizvodnje električne energije za zagrijavanje vode, ili proizvodnju pare. Niže polazne temperature 4GDH sustava omogućavaju kogeneracijskim postrojenjima da proizvedu više električne energije pri istom toplinskom opterećenju. Nadalje, niže povratne temperature imale bi pozitivan učinak na rad postrojenja s procesima kondenzacije dimnih plinova, poput postrojenja na biomasu i spaljivanje otpada, gdje je najniža temperatura dimnih plinova određena temperaturom povrate vode CTS – a (Lund et al., 2014).

### 3.4.2. Dizalice topline

Efikasnost dizalice topline ovisi o razini podizanja temperature. Za niže vrijednosti razina podizanje temperature, efikasnost dizalica raste. Stoga, niže temperature polazne vode povećale bi isplativost uporabe dizalica topline (Zajacs et al., 2020).

Prema predviđanjima (David et al., 2017), do 2050. godine dizalice topline velikih snaga opskrbljivati će 25 – 30 % centraliziranih toplinskih sustava.

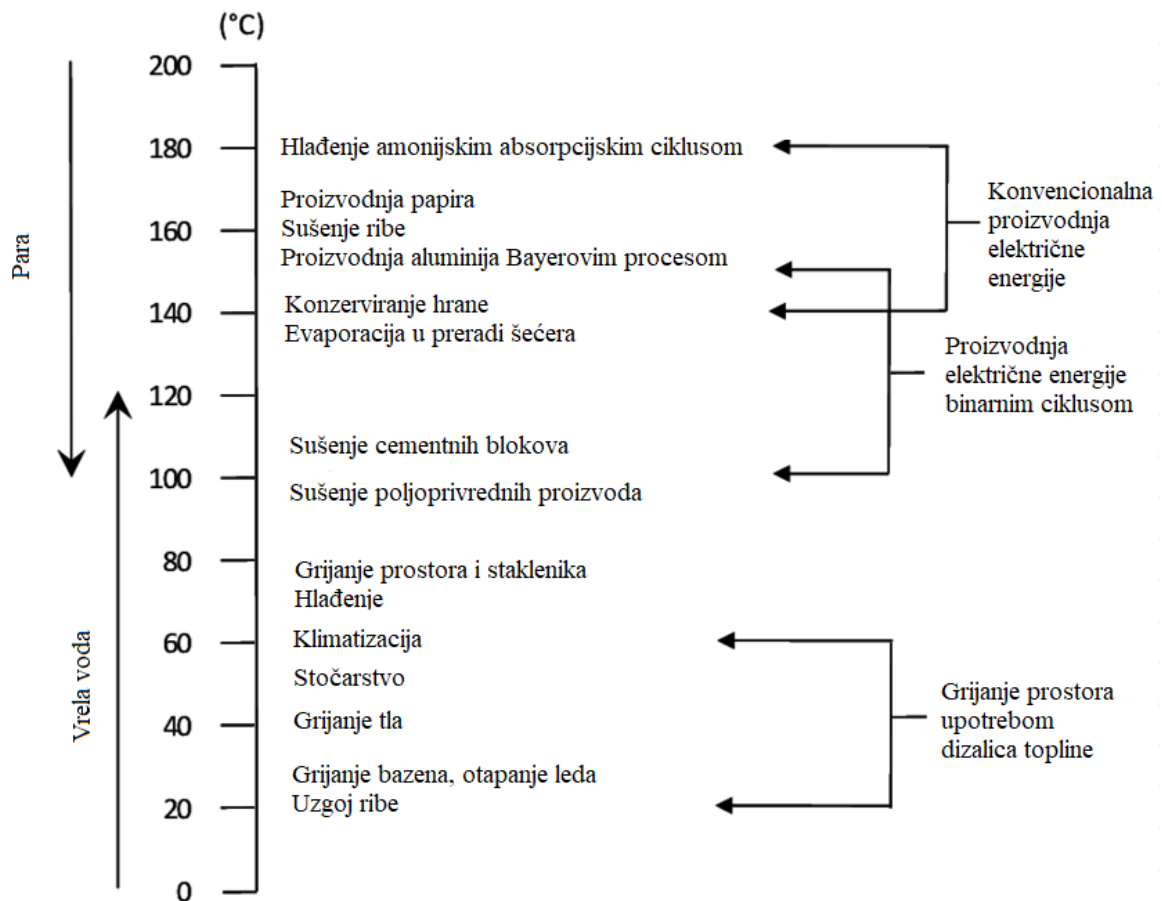
### 3.4.3. Solarna energija

Solarni toplinski sustavi koriste toplinsku energiju dobivenu iz energije Sunca za opskrbljivanje centraliziranog sustava grijanja, te zajedno sa sezonskim spremnicima topline nude značajan potencijal proizvodnje toplinske energije. Niže polazne temperature 4GDH sustava omogućavaju isplativije implementacije solarnih toplinskih sustava. Solarni kolektori rade učinkovitije s nižim mrežnim gubicima ako su temperature polaza i povrata niže. Obzirom da je proizvodnja toplinske energije solarnih kolektora ljeti, koriste se zajedno sa sezonskim spremnicima topline, gdje se višak toplinske energije ljeti pohranjuje za potrošnju tokom perioda više potražnje zimi. U tipičnom solarnom toplinskom sustavu toplina dobivena iz solarnih kolektora bez uporabe sezonskog spremnika topline iznosi 20% ukupne topline predane sustavu (Trier et al., 2018). Integracijom sezonskih spremnika topline, taj udio može se povisiti na 30 – 50% (Tian et al., 2019).

Vodeća zemlja po veličini i količini projekata u području solarnih toplinskih sustava je Danska s preko 1,3 milijuna m<sup>2</sup> postrojenja solarnog sustava grijanja. Nadalje, preko 70% većih solarnih toplinskih sustava u svijetu izgrađeni su Danskoj (Tian et al., 2019).

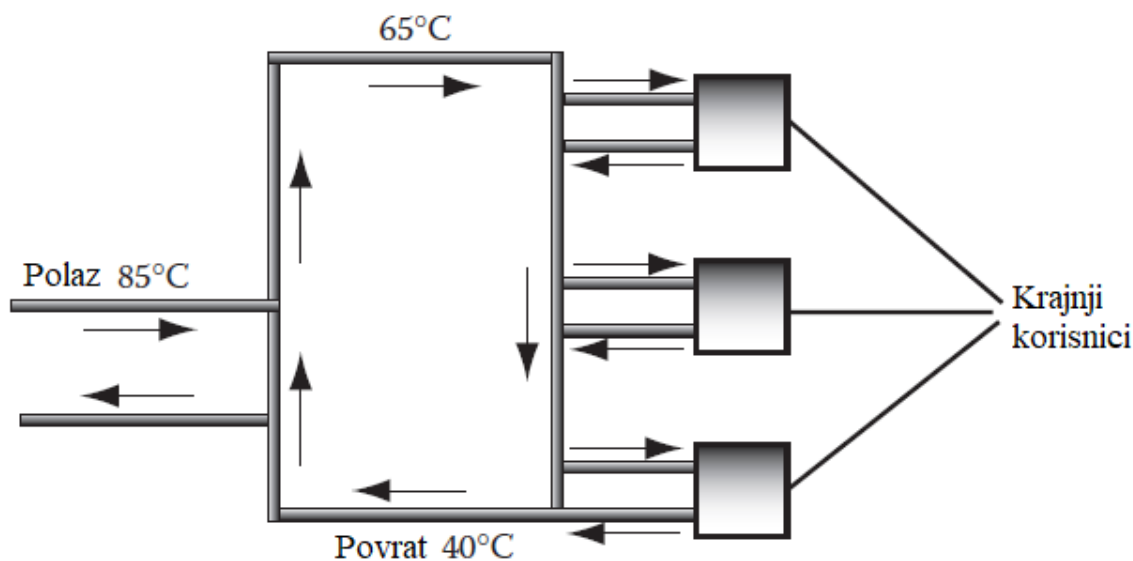
### 3.4.4. Geotermalna energija

Geotermalni toplinski sustavi koriste toplinsku energiju pohranjenu u unutrašnjosti Zemlje, te predstavljaju čist i obnovljivi izvor toplinske energije koji se ne oslanja dostupnost određenih čimbenika poput solarnog zračenja, ili vjetra. U načelu, plitka ležišta s temperaturama fluida između 40 – 150 °C prikladna su za potrebe CTS – a. Ležišta s višim temperaturama mogu se koristiti za proizvodnju električne energije. Moguće primjene geotermalnih izvora prikazuje slika 3-1.



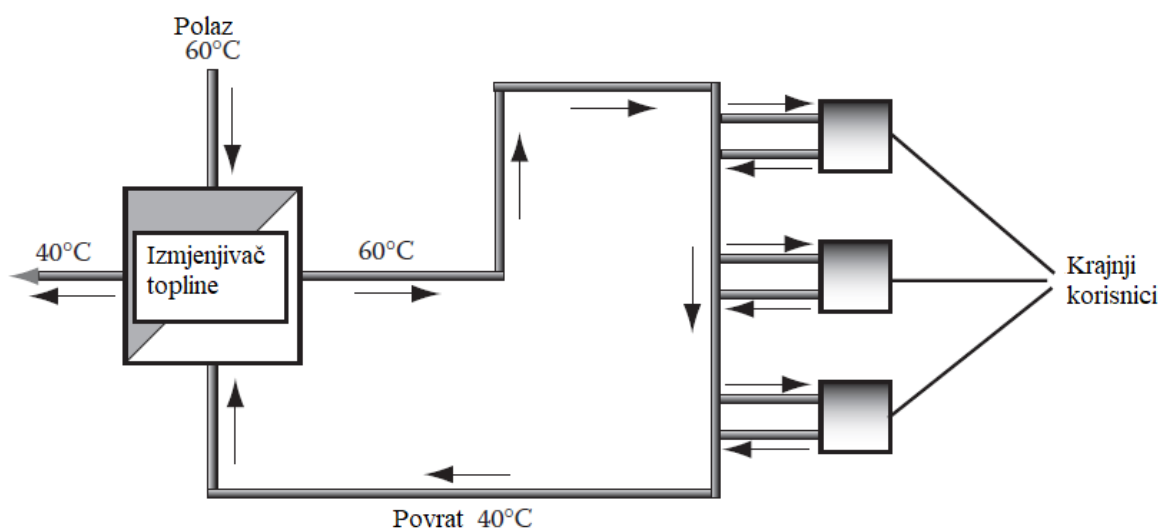
**Slika 3-1.** Primjena geotermalne energije (Sveinbjörnsson, 2016)

Ovisno o temperaturi i izdašnosti izvora geotermalne vode postoje različite izvedbi klasičnih CTS – a. Za geotermalne izvore visoke temperature fluida (85 °C) i velike izdašnosti, geotermalni fluid može se izravno proizvoditi iz bušotine u distribucijski sustav, gdje se miješa s povratnim fluidom i odvodi krajnjim korisnicima. Kod ovakve izvedbe, također je bitan i kemijski sastav ležišnog fluida, radi njegovog utjecaja na cijevi distribucijskog sustava. Ovakav sustav ilustrira slika 3-2 (Glassley, 2014).



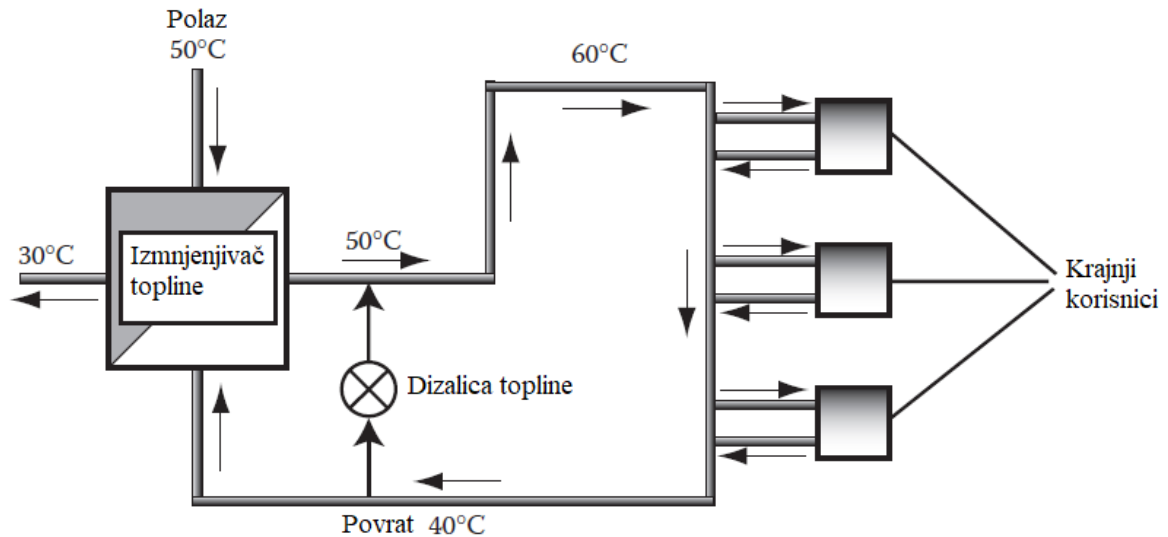
**Slika 3-2.** Shema CTS - a s izravnom proizvodnjom geotermalnog fluida u distribucijsku mrežu (Glassley, 2014)

Geotermalni izvori energije srednjih temperatura fluida (60 °) toplinsku energiju fluida distribucijskom sustavu predaju putem izmjenjivača topline. Ovakva izvedba je zatvorenog tipa i proizvedeni geotermalni fluid ne miješa se s fluidom unutar distribucijskog sustava. Slika 3-3 prikazuje shemu ovakve izvedbu CTS – a (Glassley, 2014).



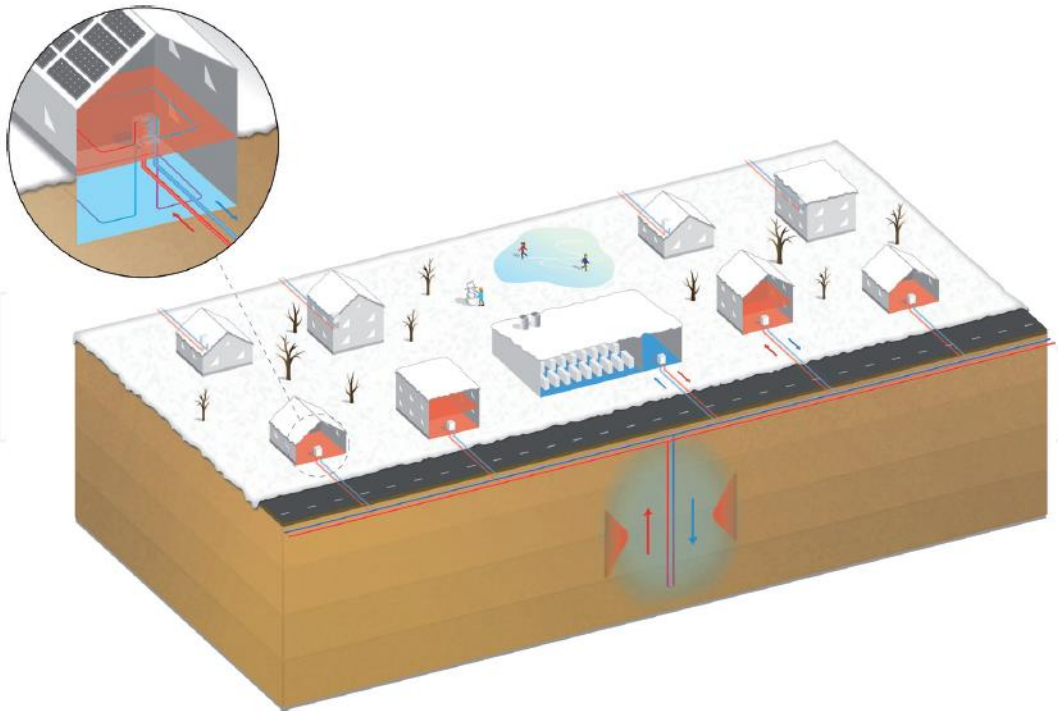
**Slika 3-3.** Shema geotermalnog CTS - a u izvedbi zatvorene petlje (Glassley, 2014)

Za niže temperature fluida razvijeni sustavi koji uporabom dizalica topline dižu temperaturu fluida u distribucijskoj mreži. Ovakvi sustavi zahtijevaju dodatan unos energije uz toplinu geotermalnog fluida za rad dizalica topline. Shemu ovakvoga sustava prikazuje slika 3-4 (Glassley, 2014).



**Slika 3-4.** Shema geotermalnog CTS - a s primjenom dizalica topline (Glassley, 2014)

Nedavna istraživanja predstavila su i mogućnost uporabe ležišta temperatura nižih od 30 °C (Schmidt, 2018). Takvi geotermalni sustavi proizvodili bi toplinsku energiju iz manjih dubina uporabom bušotinskih izmjenjivača topline u plitkim bušotinama, ili uporabom geotermalnih dizalica topline, skraćeno GSHP (engl. *ground-source heat pumps*). Slika 3-5 prikazuje shemu decentraliziranog GSHP sustava.



**Slika 3-5.** Grafički prikaz decentraliziranog GSHP sustava (Termonet, 2017.)

Izrada geotermalnih toplinskih sustava zahtjeva značajna kapitalna ulaganja, od čega su najviša potrebna ulaganja za izradu bušotina s udjelom i do 50% ukupnih troškova. Niže polazne temperature 4GDH sustava omogućavaju niža kapitalna ulaganja i operativne troškove ovih sustava, te ih čine kompetitivnima (Averfalk i Werner, 2020). Također, kako je već prije navedeno u ovome radu, učinkovitost dizalica topline, što dalje povećava isplativost primjene geotermalnih dizalica topline.

U današnje vrijeme uporaba geotermalne energije za direktnu proizvodnju toplinske energije ima primjenu u 88 država, sa značajnim rastom GSHP sustava na tržištu. U 2019. godini ugrađeno je oko 6,46 milijuna GSHP jedinica, što je porast od 54% u odnosu na broj novih ugrađenih jedinica u 2015. godini (Lund i Toth, 2020). Međutim, kako je prema podacima Međunarodne energetske agencije (engl. *International Energy Agency (IEA)*) udio topline predan iz centraliziranih toplinskih sustava u 2019. porastao za 18% u odnosu na 2015. godinu (IEA, 2019), može se zaključiti da većina novih GHSP jedinica nije ugrađeno u CTS – e, već se koriste na osnovi pojedinačnih kućanstava.

Ukupni trenutni geotermalni proizvodni kapacitet Republike Hrvatske iznosi  $81 \text{ MW}_t$ , od čega je  $42,3 \text{ MW}_t$  za potrebe centraliziranih sustava grijanja,  $24 \text{ MW}_t$  za potrebe grijanja

kupališta i bazena, 6,5 MW<sub>t</sub> za potrebe grijanja staklenika. Te 12,6 MW<sub>t</sub> za individualnu potrošnju toplinske energije u grijanju prostora (Živković et al., 2019).

#### 3.4.5. *Biomasa*

Toplinska energija u kogeneracijskim postrojenjima može se pridobiti i spaljivanjem materije biljnog ili životinjskog porijekla. Paljenje drvnih ostataka i drvnih paleta najstarija je metoda zagrijavanja kućanstva. Biomasa kao gorivo može se koristiti u krutom, tekućem i plinovitom stanju. Tekuća goriva uključuju alkohole, poput biometanola, te ulja, poput biodizela. Plinovita goriva uključuju bioplin, deponijski plin, te sintetski plin. Trenutno toplinska energija dobivena iz biomase predstavlja najveći udio energije pridobivene iz obnovljivih izvora. Obzirom da je primjena biomase izvediva unutar postojeće infrastrukture CTS – a, biomasa se ističe kao logičan korak zamjene fosilnih goriva (Sipilä, 2016). Međutim, zaliha biomase nema dovoljno za potpunu zamjenu uporabe fosilnih goriva, naročito u Europi (Ericsson i Nilsson, 2006). Stoga su neka istraživanja pokazala da su emisije stakleničkih plinova manje kada se biomasa koristi u sektoru transporta umjesto u CTS – ima (Ilic et al., 2014). Niže povratne temperature 4GDH sustava pospješiti će iskorištavanje latentne topline dimnih plinova kogeneracijskih postrojenja na biomasu s velikim udjelom vlage (Lund et al., 2014).

#### 3.4.6. *Otpadna toplina iz procesa spaljivanja otpada i industrijskih procesa*

Upotreba otpadne topline iz procesa spaljivanja otpada zrela je tehnologija s primjenom u mnogim CTS – ima. Prema (Persson i Münster, 2016), do 2030. godine 294 Mt komunalnog otpada moglo bi biti dostupno, od čega bi jedna četvrtina mogla biti dostupna kao otpadna energija za uporabu u CTS – ima. No, nedostatak potrebne infrastrukture upravljanja otpadom predstavljaju značajan izazov razvoju ove tehnologije. Pravilna kategorizacija komunalnog otpada potrebna je za sprječavanje mogućih negativnih učinaka ispušnih plinova iz procesa spaljivanja otpada.

Otpadna toplina iz industrijskih procesa predstavlja popriličan energetski potencijal. Teoretski, otpadna toplina mogla bi zadovoljiti 90% ukupne toplinske potražnje u sektoru zgradarstva Europe. Izazov razvoju ove tehnologije predstavljaju izrazito visoki troškovi ulaganja povezivanja proizvođača industrijske otpadne topline s CTS mrežom (Persson i Werner, 2012). 4GDH sustavi omogućavaju iskorištavanje i izvore otpadne topline nižih temperatura zahvaljujući kombinaciji niskih temperatura u distribucijskoj mreži i spremnika topline (Lund et al., 2014).



#### 3.4.7. *Potrošači kao proizvođači toplinske energije*

4GDH također će i omogućiti potrošačima kupovinu i prodaju toplinske energije iz CTS – a. U literaturi termin za takve potrošače je „*prosumers*“ (engl. *Producer + consumer*) i prvotno je ustanovljen u sektoru električne energije (Schleicher - Tappeser, 2012). Princip ovog mehanizma je da će potrošači imati mogućnost prodaje viška toplinske energije iz decentraliziranih izvora (npr. solarna energija, dizalice topline) mreži CTS – a (Brange et al., 2016).

#### 3.5. Spremnici topline

Uporaba spremnika topline imati će ključnu ulogu u postupku integracije fluktuirajućih obnovljivih izvora energije poput energije vjetra i sunčeve energije u buduće energetske sustave. Spremnici topline mogu pohraniti i višak toplinske energije za vrijeme niske potražnje u svrhu uporabe iste za vrijeme vršne potražnje. Najčešće se spremnike topline dijeli na spremnike za kratkotrajnu pohranu energije i spremnike za dugotrajnu pohranu energije, odnosno sezonske spremnike topline (Thomsen i Overbye, 2016). Za potrebe ovoga rada razmatrati će se sezonski spremnici topline za opskrbljivanje 4GDH sustava zimi. Postoje četiri izvedbe sezonskih spremnika toplinske energije:

- Čelični toplinski spremnik (engl. *Tank thermal energy storage - TTES* )
- Toplinski spremnik u obliku jame (engl. *Pit thermal energy storage - PTES*)
- Bušotinski toplinski spremnik (engl. *Borehole thermal energy storage - BTES*)
- Toplinski spremnik u obliku vodonosnika (engl. *Aquifer thermal energy storage - ATES*)

U ovome radu pri modeliranju koristiti će se isključivo PTES spremnici radi njihovog niskog troška izgradnje. Usporedbu nekih značajki različitih spremnika topline prikazuje tablica 3-1.

**Tablica 3-1.** Značajke sezonskih spremnika topline

	TTES	PTES	BTES	ATES
Medij pohrane	Voda	Voda / šljunčana voda	Pribušotinska zona	Podzemna voda unutar vodonosnika
Specifični kapacitet (kWh/m <sup>3</sup> )	60 - 80	60 – 80 30 – 50 za šljunčanu vodu	15 - 30	30 - 40
Količina vode	1 m <sup>3</sup> spremnika = 1 m <sup>3</sup> vode	1 m <sup>3</sup> spremnika = 1 m <sup>3</sup> vode	3 - 5 m <sup>3</sup> spremnika = 1 m <sup>3</sup> vode	2 - 5 m <sup>3</sup> spremnika = 1 m <sup>3</sup> vode
Temperature spremnika (°C)	5 – 95	5 – 95	5 – 90	7 - 18
Specifični troškovi ulaganja (EUR/m <sup>3</sup> )	110 – 200 (za volumen TTES iznad 2000 m <sup>3</sup> )	20 – 40 (za volumen PTES iznad 50.000 m <sup>3</sup> )	20 – 40 (za volumen BTES iznad 50.00 m <sup>3</sup> pohrane vode)	50 – 60 (za volumen ATES iznad 10.00 m <sup>3</sup> pohrane vode)

Toplinski spremnici također će biti jedan od značajnih čimbenika integracije toplinskog sustava u pametni energetske sustav i povećanja prilagodljivosti sustava na promijene potražnje za energijom (Østergaard, 2012).

### 3.6. Distribucija toplinske energije

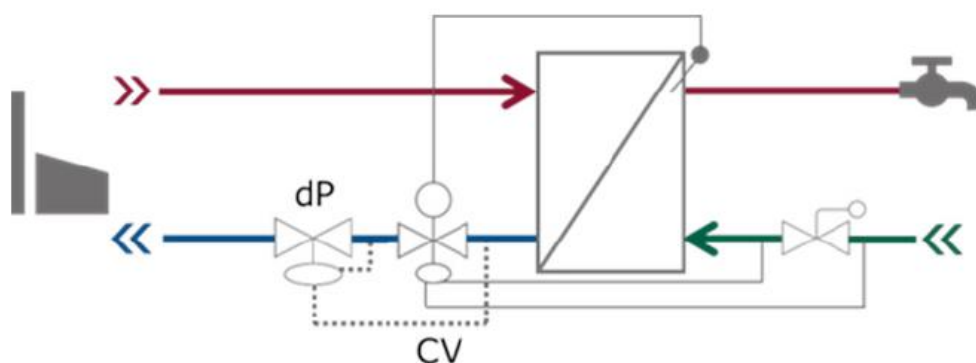
Toplinska energija unutar CTS – a prenosi se iz centralnog, ili više distribuiranih mjesta proizvodnje toplinske energije mrežom vrelovoda i parovoda do krajnjeg potrošača. Toplovodni sustav potrošača povezan je s mrežnim sustavom CTS – a preko toplinskih stanica. Zagrijana voda od mjesta zagrijavanja do mjesta potrošnje teče polaznom cijevi, dok ohlađena voda od mjesta potrošnje do mjesta zagrijavanja teče povratnom cijevi. U izvedbama cjevovoda toplinskih mreža postoji mogućnost uporabe niza različitih vrsta cijevi: od čvrstih čeličnih, do fleksibilnih plastičnih cijevi; izoliranih do predizoliranih (Nilsson, 2016). Za potrebe 4GDH sustava preporučuje se upotreba predizoliranih fleksibilnih jednostrukih ili dvostrukih cijevi (Lund et al., 2014). Dvostruka cijev objedinjuje polaznu i povratnu cijev unutar jedne cijevi (Nilsson, 2016). Vrelovod se može polagati kao

radijalna mreža cijevi, kao razgranata mreža cijevi, ili kao radijalna mreža cijevi. Razgranata mreža cijevi prikladna je sustavima s jednim središnjim mjestom proizvodnje toplinske energije, a podložna je ograničenjima kapaciteta kada se toplinska energija proizvodi iz više distribuiranih mjesta (Lund et al., 2018).

### 3.6.1. Toplinska stanica

Toplinska stanica prenosi toplinsku energiju s mreže vrelovoda na primaru, na toplovodnu mrežu potrošača na sekundaru. Dvije su izvedbe priključka toplinskih stanica na CTS: direktni i indirektni priključak. Kod direktnog priključka voda iz vrelovoda izravno protječe kroz grijače u sustavu potrošača. Sustav potrošača dizajniran je za maksimalan tlak u mreži. U indirektnoj izvedbi priključka tok vode u mreži vrelovoda fizički je odvojen od toka vode u toplovodu potrošača. Prijenos energije toplinske stanice postižu regulacijom toka vode u izmjenjivaču topline (Skagestad i Mildenstein, 2002).

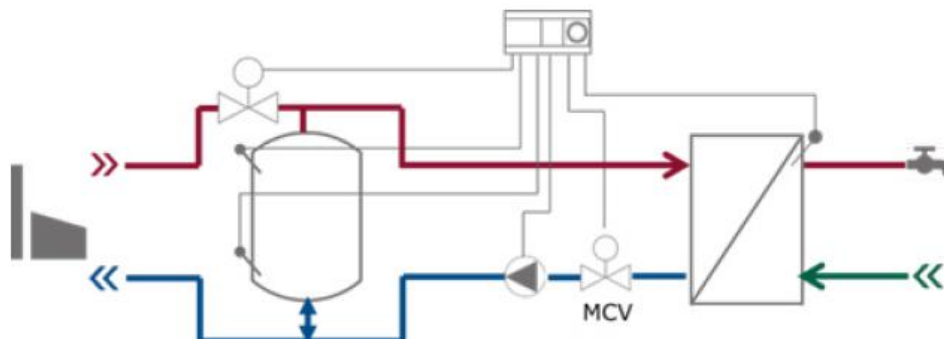
Kako je prije navedeno, za potrebe 4GDH sustava predlaže se prelazak na individualne decentralizirane toplinske stanice kako bi se uklonio problem legionarske bolesti pri nižim temperaturama ovih sustava. Decentralizirana toplinska stanica - IHEU (engl. *Instantaneous Heat Exchanger Unit*) smanjuje volumen tople vode u sustavu potrošne vode potrošača, čime se umanjuje higijenski rizik koji se javlja kod sustava niskih temperatura. Za razliku od tradicionalne toplinske stanice, u sklop IHEU nije uključen spremnik potrošne tople vode. Potrošna topla voda priprema se izmjenjivačima topline zasebno za svaki stan unutar građevine (Yang et al., 2016). Slika 3-6 prikazuje shemu decentralizirane toplinske stanice.



**Slika 3-6.** Decentralizirana toplinska stanica (IHEU) (Schmidt et al., 2017)

Prednost uporabe spremnika potrošne tople vode je mogućnost uporabe cijevi manjih dimenzija, čime se postižu manji toplinski gubici u sustavu. Jedna implementacija toplinskih stanica je tzv. DHSU (engl. *DH storage tank unit*). Umjesto na sekundaru, spremnik potrošne

tope vode DHSU stanice nalazi se na primaru, čime se umanjuju higijenski rizici, uz pogodnosti gore navedenih nižih toplinskih gubitaka (Schmidt et al., 2017). Slika 3-7 prikazuje shemu DHSU toplinske stanice.



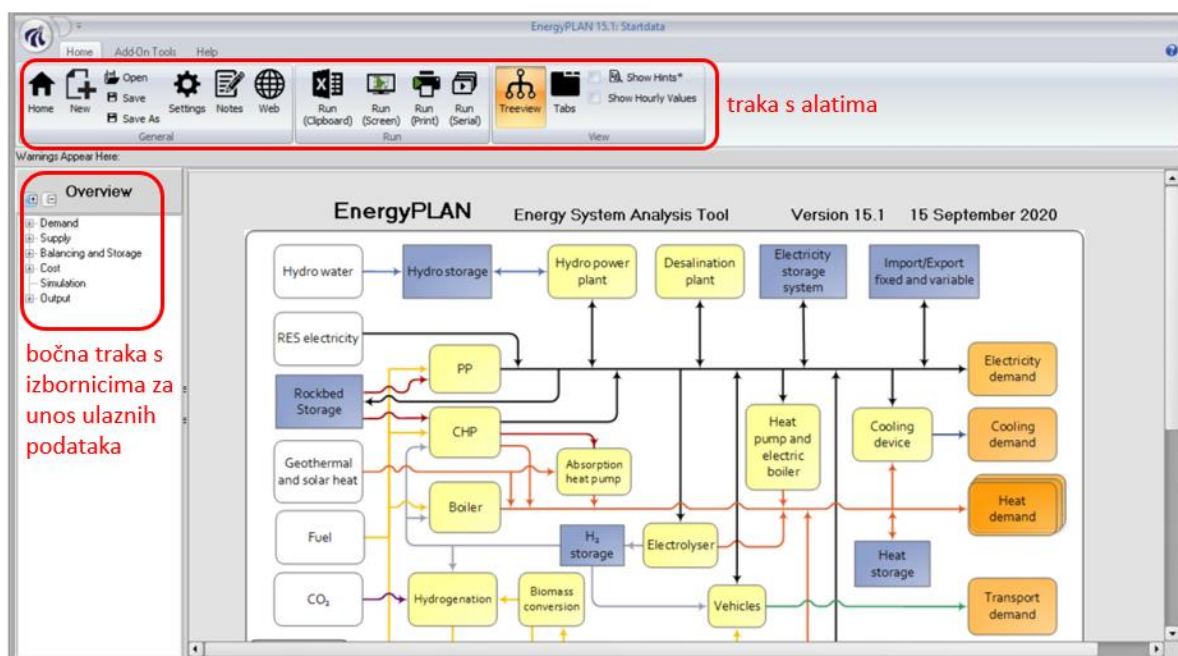
**Slika 3-7.** DHSU toplinska stanica (Schmidt et al., 2017)

#### 4. MODELIRANJE I SIMULACIJA ENERGETSKIH SUSTAVA U PROGRAMU ENERGYPLAN

EnergyPLAN je računalni program za modeliranje i simulaciju energetskih sustava. Naglasak u modelu je dan na bilanciranju tokova električne i toplinske energije, kao i tzv. mrežnog plina (GridGas). Energetski sustavi u ovom programu nisu modelirani s velikom točnošću u pretvorbi oblika energija u samim postrojenjima za proizvodnju energije, kao niti u enereskim trošilima, već je naglasak dan na sveobuhvatnosti cjelokupne bilance svih energetskih tokova kako bi se predočila izvedivost, iskoristivost i isplativost pojedinih scenarija.

EnergyPLAN ima detaljne korisničke upute na engleskom jeziku unutar svoje web stranice, a ovdje je dan samo načelni prikaz i struktura. Struktura radnih mapa je sljedeća: svi scenariji (ASCII datoteke) su pohranjeni u radnoj mapi Data, a distribucije u mapi Distributions.

Slika 4-1 pokazuje osnovno sučelje nakon pokretanja:



Slika 4-1. Početno sučelje programa

Sam program izvodi simulaciju u trajanju od jedne godine (8784 sati) u rezoluciji od jednog sata. To omogućuje da se u simulaciji sustava u obzir uzme i promjenjivost (intermitencija) obnovljivih izvora energije na satnoj razini. Ulazni podaci o, primjerice, potražnji električne i toplinske energije, energije iz vjetro- ili fotonaponskih elektrana se zadaju preko satnih distribucija (ASCII datoteke) i ukupnih godišnjih energija koje množe jedinične distribucije čime se dobiva satna distribucija samih energija. Program omogućava i da se u energetske sustave integriraju i pohrane energije. Kao rezultat se u tehničkom smislu dobivaju godišnje, mjesečne i satne vrijednosti svih energetske tokova, podatak o ukupnoj emisiji CO<sub>2</sub>, a moguće je provesti i izv. ekonomsku analizu koja kao rezultat daje godišnji trošak sustava koji uključuje nivelirani troškove investicija, fiksne i varijabilne operativne troškove, troškove emisija CO<sub>2</sub>, porezi, razmjene el. energije s vanjskim tržištem itd (Perković, 2021).

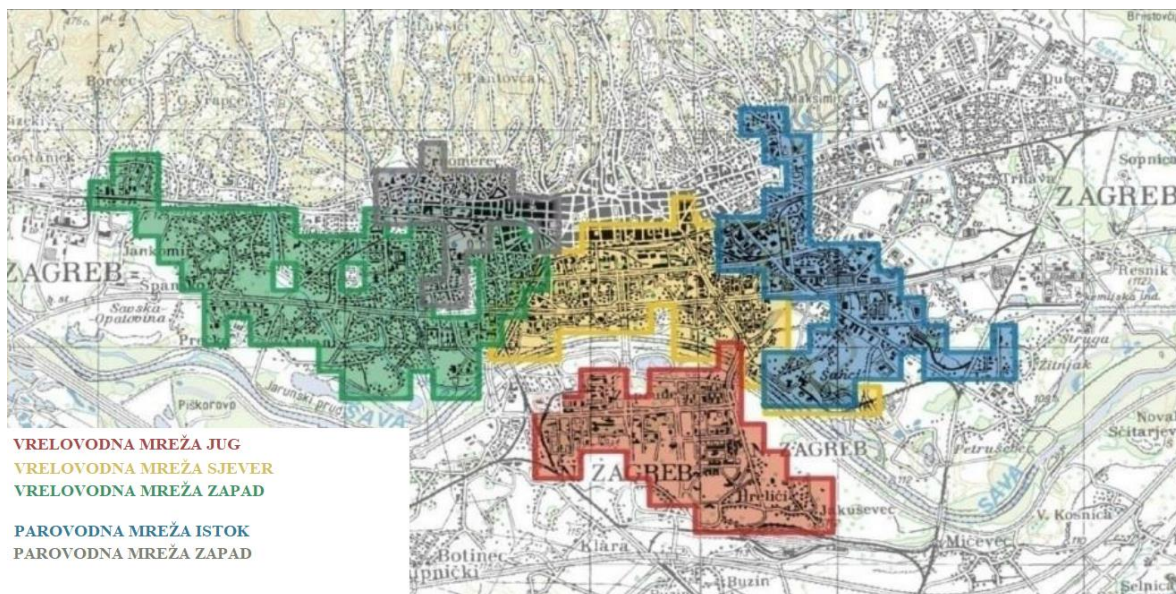
Svi scenariji su detaljno opisani u poglavljima u kojima se razmatraju scenariji dekarbonizacije.

## 5. ANALIZA SLUČAJA ZA GRAD ZAGREB

### 5.1. Centralni toplinski sustav Grada Zagreba

Toplifikacija grada Zagreba započela je 1954. godine izgradnjom toplinske stanice snage 14,7 MW u sklopu pogona Elektrane – Toplane Zagreb (skraćeno EL - TO). Danas CTS grada Zagreba toplinskom energijom opskrbljuje preko 94.000 kućanstava i poslovnih subjekata (Ekoenerg d.o.o., 2018). . Sustavom upravljaju dva poduzeća HEP Grupe: HEP Proizvodnja d.o.o. za proizvodnju toplinske energije i HEP Toplinarstvo d.o.o. za distribuciju i isporuku toplinske energije. U 2019. godini HEP Proizvodnja d.o.o. isporučila je HEP Toplinarstvu d.o.o. 2.092,19 GWh toplinske energije (Hrvatska energetska regulatorna agencija, 2020).

CTS Zagreba sastoji se od 227,326 km vrelovoda podijeljenog na istočnu i zapadnu vrelovodnu mrežu. Istočna mreža duljine je 139,566 km i opskrbljuje se iz pogona Termoelektrane – Toplane Zagreb (skraćeno TE - TO), dok je zapadna mreža ukupne duljine 87,760 km, a opskrbljuje se iz pogona EL – TO. Predizolirane cijevi u sastavu su 34,4% cjevovoda, dok su 65,6% kanalno položene cijevi. Temperaturni režim vode u vrelovodu (polaz/povrat) je 130/70 °C, a tlak 16 bar. Unutar mreže je 2725 toplinskih stanica, a toplinski gubici u sustavu vrelovodne mreže se procjenjuju na 14,4% (Ekoenerg d.o.o., 2018). Slika 5-1 prikazuje mrežu CTS – a grada Zagreba.



**Slika 5-1.** Podjela mreže CTS-a grada Zagreba (Ekoenerg d.o.o., 2018)

### 5.1.1. EL – TO Zagreb

Postrojenje EL – TO nalazi se na lokaciji zagrebačke Trešnjevke i započelo je s radom 1907. godine. Početna namjena ovog postrojenja bila je proizvodnja električne energije za rad vodovoda, javne rasvjete, industrije i gradskog električnog tramvaja. Energetsku osnovu postrojenja u početku predstavljao je ugljen.

Danas postrojenje EL – TO Zagreb prije svega proizvodi toplinsku energiju u spojnom procesu s proizvodnjom električne energije (kogeneracija). Električna energija proizvodi se bloku B, te u dva plinsko – turbinska kogeneracijska bloka H i J. Toplinska energija se izravno proizvodi u vršnim vrelovdnim kotlovima VK3 i VK4, te u niskotlačnim parnim kotlovima NTK1 i NTK2. Također, u procesu izgradnje je novi kombi kogeneracijski (KKE) blok predviđene električne snage  $150 \text{ MW}_e$  i  $114 \text{ MW}_t$  (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Uprava za procjenu utjecaja na okoliš i održivo gospodarenje otpadom, sektor za procjenu utjecaja na okoliš, 2021). Tablica 5-1 prikazuje specifikacije blokova.



**Tablica 5-1.** Osnovni podaci proizvodnih jedinica postrojenja EL – TO Zagreb (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Uprava za procjenu utjecaja na okoliš i održivo gospodarenje otpadom, sektor za procjenu utjecaja na okoliš, 2021)

Proizvodne jedinice		Gorivo	Nazivno opterećenje	Toplinska snaga goriva	Godina puštanja u rad
Blok B	K-8 (K-4)	PP/TLU	100 t/h (115 bara/520°C)	86 MW	1980.
	K-9 (K-5)	PP/TLU	100 t/h (115 bara/520°C)	86 MW	
	TA2	-	30 MWe	-	
Blok H	PTA-1	PP	25,2 MWe	91 MW	1998.
	KU-1	-	7,6 MWt + 64 t/h (17 bara/240°C)	-	
Blok J	PTA-2	PP	25,2 MWe	91 MW	1998.
	KU-2	-	7,6 MWt + 64 t/h (17 bara/240°C)	-	
NTK-1		PP	39 t/h (17 bara/235°C)	32 MW	2016.
NTK-2		PP	39 t/h (17 bara/235°C)	32 MW	2018.
VK-3		PP/TLU	116 MWt	129 MW	1991.
VK-4		PP	116 MWt	122 MW	2013.
		TLU	93 MWt	100 MW	

K-8, K-9 – visokotlačni parni kotlovi, TA1 – protutlačna plinska turbina, TA2 – kondenzatorska plinska turbina, NTK – 1. NTK – 2 - niskotlačni parni kotlovi, VK-3 i VK-4 – vrelovodni kotlovi, PTA-1 i PTA-2 – plinske turbine, KU-1 i KU-2 – kotlovi na ispušne plinove, PP – prirodni plin, TLU – teško loživo ulje

### 5.1.2. TE – TO Zagreb

Termoelektrana – toplana Zagreb puštena je u pogon 1962. godine kao kogeneracijsko postrojenje, u početku na lignit iz Hrvatskog Zagorja, a od 1965. godine na plin i teško loživo ulje.

TE – TO danas opskrbljuje 140 km vrelovoda istočne mreže i 23 km parovoda (Ekoenerg d.o.o., 2018). U postrojenje su uključena tri kogeneracijska bloka (blokovi C, K i L), te sedam blokova za izravnu proizvodnju toplinske energije: pomoćna kotlovnica Blok D, parni kotlovi M1 i M2, te vrelovodne kotlovnice Blok E, F, G i H. Parametre blokova prikazuje tablica 5-2.

**Tablica 5-2.** Osnovni podaci proizvodnih jedinica postrojenja TE – TO Zagreb (HEP d.d., 2018.)

Proizvodne jedinice		Gorivo	Nazivno opterećenje	Toplinska snaga goriva	Godina puštanja u rad
Blok E	VK-3	PP / PU	58 MWt	64 MW	1977.
Blok F	VK-4	PP / PU	58 MWt	64 MW	1978.
Blok G	VK-5	PP / PU	116 MWt	129 MW	1982.
Blok H	VK-6	PP / PU	116 MWt	129 MW	1990.
Blok D	PK-3	PU	80 t/h (20 bar/280°C)	58 MW	1985.
Blok C	Blok C		120 MWe + 200 MWt		1979.
	K-3	PP	500 t/h (140 bar / 560°C)	384 MW	
	PAT3/G-3	-	120 MWe	-	
Blok K	Blok K		208 MWe + 140 MW		2001.
	PT1/G-4	PP / PU	71 MWe	205 MW	
	KU-1	-	109 t/h (95 bar/539°C) 12 t/h (10 bar/287°C)	-	
	PT2/G-5	PP / PU	71 MWe	205 MW	
	KU-2	-	109 t/h (95 bar/539°C) 12 t/h (10 bar/287°C)	-	
	PAT4/G-6	-	66 MWe	-	
Blok L	Blok L		112 MWe + 110 MWt		2009.
	PT3/G-7	PP	75 MWe	214 MW	
	KU-3	-	107 t/h (95 bar/540°C) 25 t/h (11 bar/280°C)	-	
	PAT5/G-8	-	37 MWe	-	
Blok M	Blok M		47,4 MWt		2018.
	M1	PP	23,7 MWt, 35 t/h	24,9 MW	
	M2	PP	23,7 MWt, 35 t/h	24,9 MW	

VK-3, VK-4, VK-5, VK-6 – vrelovodni kotlovi, PK-3 – parni kotao, K-3 – visokotlačni parni kotao, PT1/G-4, PT2/G-5, PT3/G-7 – plinske turbine i generatori, PAT3/G-3, PAT4/G-6, PAT5/G-8 – parne turbine i generatori, KU-

1, KU-2, KU-3 – kotlovi na ispušne plinove, PP – prirodni plin, PU – plinsko ulje

## 5.2. Geotermalni potencijal Grada Zagreba

Najveći geotermalni potencijal na području Grada Zagreba predstavlja Geotermalno polje Zagreb. Određena površina geotermalnog polja je 54 km<sup>2</sup>, nalazi se na jugozapadnom dijelu grada, s geotermalnom vodom na dubinama od 730 do 1406 m. Polje je otkriveno 1977. nakon hidrodinamičkih ispitivanja u negativnoj naftnoj bušotini Stupnik-1 koja je izrađena još 1964. Prema Elaboratu o rezervama geotermalne vode, zalihe geotermalne vode polja uvrštene su u „B“ kategoriju s predviđenim crpljenjem i utiskivanjem geotermalne vode nazad u ležište. Prosječna temperatura u ležištu je 80 °C, što je dostatno za uporabu u 4GDH sustavima. Na polju je izrađeno 16 bušotina. Trenutna upotreba geotermalne energije polja odvija se kroz: tehnološki sustav na lokalitetu Mladost, tehnološki sustav na lokalitetu Blato (Klinička bolnica Novi Zagreb), te tehnološki podsustav na lokalitetu Lučko. Geotermalnom vodom griju se objekti Športskog parka Mladost, skladišni prostori Kliničke bolnice Novi Zagreb i poslovni objekti unutar poslovne zone Lučko (Cazin, 2019). Tablica 5-3 prikazuje bušotine geotermalnog polja Zagreb zajedno s njihovim osnovnim karakteristikama.

**Tablica 5-3.** Bušotine na području geotermalnog polja Zagreb s osnovnim karakteristikama (Energetski institut Hrvoje Požar, 2017)

Bušotina	Kratica	Lokacija	Protok (l/s)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Namjena
<b>Mladost-1</b>	Mla-1	Mladost	3,1	70,0	Nije u funkciji
<b>Mladost-2</b>	Mla-2	Mladost	74,0	64,0	Utisna
<b>Mladost-3</b>	Mla-3	Mladost	80,0	80,0	Proizvodna
<b>KBNZ-1</b>	KBNZ-1	Blato	-	-	Likvidirana
<b>KBNZ-1A</b>	KBNZ-1A	Blato	6,9	68,0	Utisna
<b>KBNZ-1B</b>	KBNZ-1B	Blato	88,0	82,0	Proizvodna
<b>KBNZ-1C</b>	KBNZ-1C	Blato	-	-	Likvidirana
<b>KBNZ-2</b>	KBNZ-2	Blato	0,6	51,0	Mjerna
<b>KBNZ-2A</b>	KBNZ-2A	Blato	25,0	64,0	Nije u funkciji
<b>KBNZ-3</b>	KBNZ-3	Blato	-	-	Likvidirana
<b>KBNZ-3B</b>	KBNZ-3B	Blato	0,6	27,0	Nije u funkciji
<b>KBNZ-3 alfa</b>	KBNZ-3 alfa	Blato	25,6	57,0	Nije u funkciji

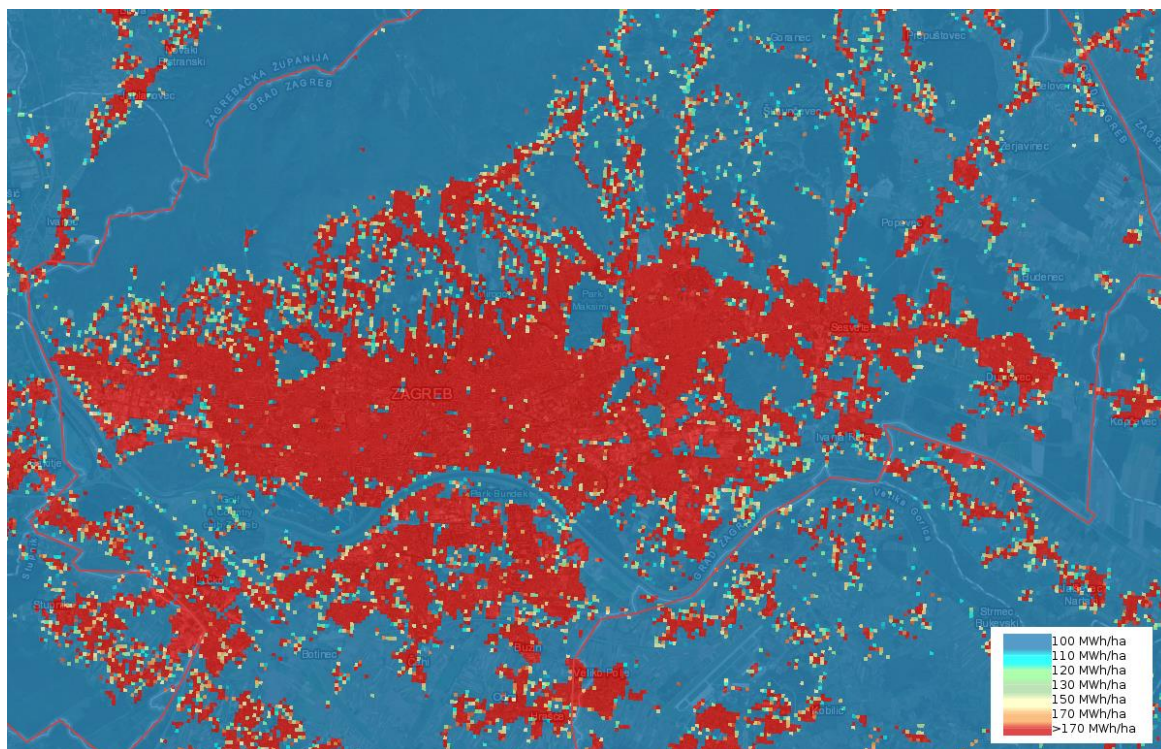
<b>Stupnik-1</b>	Stu-1	Lučko	8,1	57,0	Nije u funkciji
<b>Lučanka-1</b>	Luč-1	Lučko	5,6	55,0	Proizvodna
<b>Jarun-1</b>	Jrn-1	Jarun	0,8	38,0	Nije u funkciji
<b>Sava-1</b>	Sava-1	Savski nasip	5,0	58,0	Mjerna

Stupanj iskorištenosti geotermalne energije iz polja manji je od 2%. Koristi se 0,34 MW<sub>t</sub> od 17,7 MW<sub>t</sub> ukupne snage uz iskoristivost temperature do 20 °C uz proizvodnju od 77 l/s ili 6.652 m<sup>3</sup>/d geotermalne vode temperature 75 °C na ušću bušotine. Maksimalna teoretska količina proizvodnje geotermalne vode iznosi 65 l/s, odnosno 2.050.000 m<sup>3</sup>/god (Getliher i Horvat, 2008).

### 5.3. Potencijal solarnih kolektora u Gradu Zagrebu

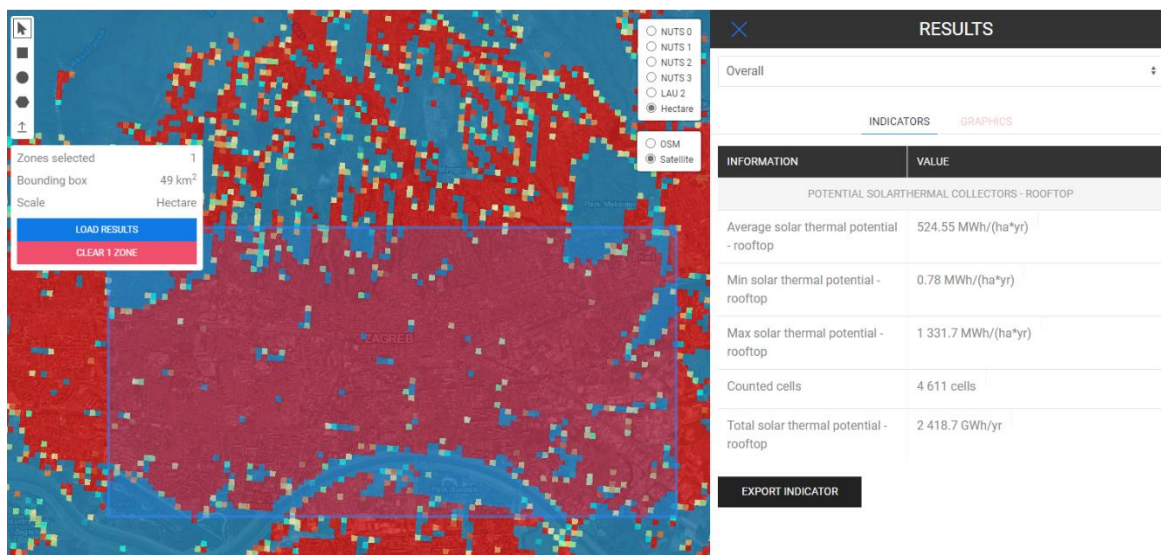
Za procjenu potencijala korištenja energije solarnog zračenja u svrhu pridobivanja toplinske energije za CTS Grada Zagreba koristio se je projekt Hotmaps. Hotmaps je računalni alat otvorenog koda zasnovan na GIS - u čija je namjena pružanje okvirnih procjena potražnji za grijanjem i hlađenjem u regijama Europe. Dozvoljava promatranje podataka na razini NUTS regija, županija i gradova, te dozvoljava promatranje označenih područja površine 1 ha. Ovaj alat također ima sposobnost prikazivanja raznih ostalih svojstava nekog područja vezanih za područje energetike. U ovome radu koristiti će se karta vrijednosti potencijala solarnih kolektora montiranih na krovove zgrada (Hotmaps, 2020.).

Kao jedan od izvora toplinske energije koji imaju koristi od nižih temperatura 4GDH, u ovome radu koristiti će se proizvodnja toplinske energije solarnim kolektorima sa sezonskim spremnikom topline. Preciznije, modelirati će se s pretpostavkom postavljanja solarnih kolektora na krovove zgrada Grada Zagreba. Slika 5-2 zorno prikazuje raspoložive krovne površine, kao i energetske potencijal postavljanja solarnih kolektora. Iz slike je vidljivo da najveći potencijal krovno postavljenih kolektora predstavlja urbano središte grada, upravo gdje postoji i najveća potražnja za toplinom CTS – a.



**Slika 5-2.** Karta potencijala proizvodnje toplinske energije solarnim kolektorima postavljenim na krovovima (Hotmaps, 2020.)

Za svrhe ovoga rada odabrana je površina grada 49 km<sup>2</sup>. Kako se radi kulturnih vrijednosti pojedinih zgrada ne mogu postaviti solarni kolektori na sve zgrade, kao što i samo određeni dijelovi krova omogućavaju proizvoljnu orijentaciju kolektora, program Hotmaps uzima pretpostavku da je 12,5% krova raspoloživo za postavljanje kolektora pri proračunu. Ukupni potencijal solarnih kolektora za označeno područje iznosi 2,4187 TWh godišnje. U modeliranim scenarijima pretpostavlja se ugradnja kolektora na 10% krovova u odabranom području, što označava proizvodnju od 0,24 TWh godišnje. Slika 5-3 prikazuje odabrano područje, te izračunate vrijednosti za to područje u sučelju programa.



**Slika 5-3.** Potencijal proizvodnje toplinske energije solarnim kolektorima za odabrano područje (Hotmaps, 2020.)

Također, u ovome radu podrazumijeva se izrada sezonskog spremnika toplinske energije za pohranjivanje energije za vrijeme višaka proizvodnje. Za svrhe ovoga modela koristiti će se sezonski spremnik topline u obliku jame (PTES) s kapacitetom pohrane 380 GWh.

#### 5.4. Potencijal spaljivanja komunalnog otpada u Gradu Zagrebu

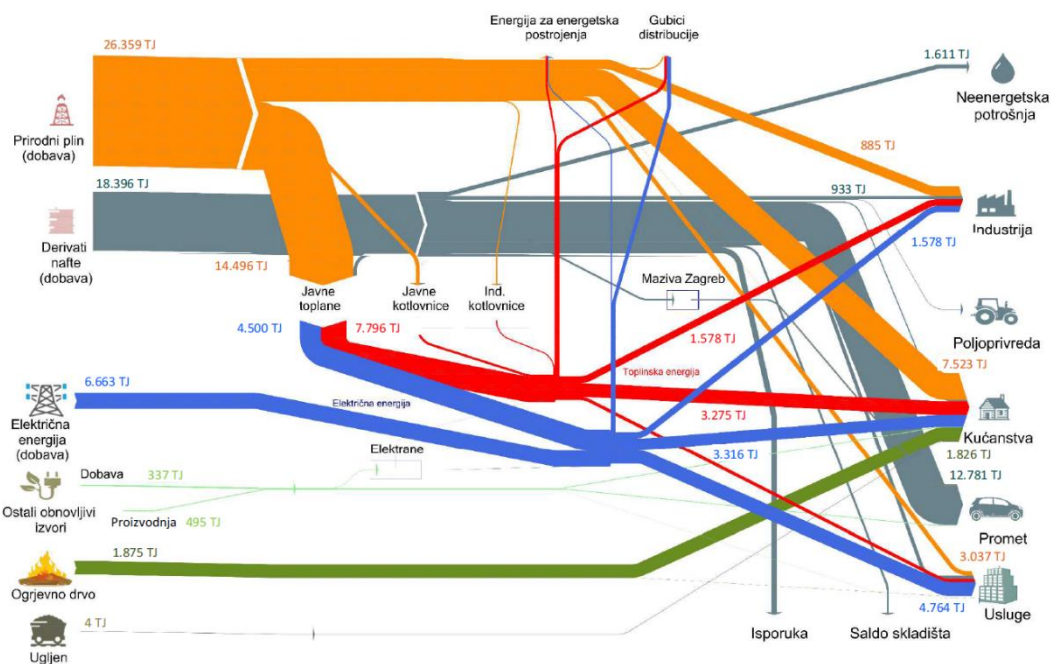
Prema podacima iz izvješća o komunalnom otpadu za 2018. godinu Ministarstva zaštite okoliša i energetike, u Gradu Zagrebu je 2018. godine prikupljeno 216.631,28 tona miješanog komunalnog otpada (Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, Zavod za zaštitu okoliša i prirode, 2019). Za svrhe proračuna, u ovome radu pretpostaviti će se izgradnja kogeneracijskog postrojenja za termičku obradu otpada s kapacitetom obrade 230.000 tona otpada.

Prema izvještajima IEA, ogrjevna vrijednost miješanog komunalnog otpada u rasponu je od 8 do 12 MJ/kg (IEA Bioenergy, 2003). U ovom radu koristiti će se ogrjevna vrijednost od 10 MJ/kg, prema čemu bi snaga, čime bi energetski unos miješanog komunalnog otpada u pretpostavljeno postrojenje za termičku obradu otpada iznosio 0,64 TWh godišnje. Uz učinkovitost postrojenja od 30% (Fruergaard et al., 2010), proizvodnja toplinske energije za CTS pretpostavljenog postrojenja za termičku obradu komunalnog otpada iznosila bi 0,19 TWh godišnje.

## 5.5. Izrada referentnog modela Grada Zagreba u EnergyPLAN – u

### 5.5.1. Potražnja za toplinskom energijom

Prema podacima iz energetske bilance Grada Zagreba za 2018. godinu, koju je izradio Energetski institut Hrvoje Požar, izrađen je referentni model Grada Zagreba za 2018. godinu. Tok energije unutar Grada Zagreba slikovito prikazuje slika 5-4.



**Slika 5-4.** Shematski prikaz energetske bilance Grada Zagreba za 2018. godinu (Energetski institut Hrvoje Požar, 2019)

Kako bi se bolje predočili utjecaji predviđenih scenarija na dekarbonizaciju CTS - a, koristiti će se model koji uključuje samo toplinski sustav Grada Zagreba. Iako je jedan od koncepata 4GDH pametna integracija toplinske mreže s pametnim mrežama ostalih segmenata energetske sustava, posebna pažnja posvetiti će se isključivo utjecaju sniženja temperatura unutar CTS – a. U ovome radu također se neće pažnja posvetiti 4GDH konceptu prosumer – a , kao ni konceptu uporabe samih građevina spojenih na CTS kao spremnike topline.

Proizvodnja toplinske energije u Gradu Zagrebu 2018. godine iznosila je 2,17 TWh, dok je neposredna potrošnja toplinske energije iznosila 1,59 TWh, kako prikazuju tablica 5-4 i tablica 5-5 (Energetski institut Hrvoje Požar, 2019).

**Tablica 5-4.** Proizvodnja energenata u energetskim transformacijama (Energetski institut Hrvoje Požar, 2019)

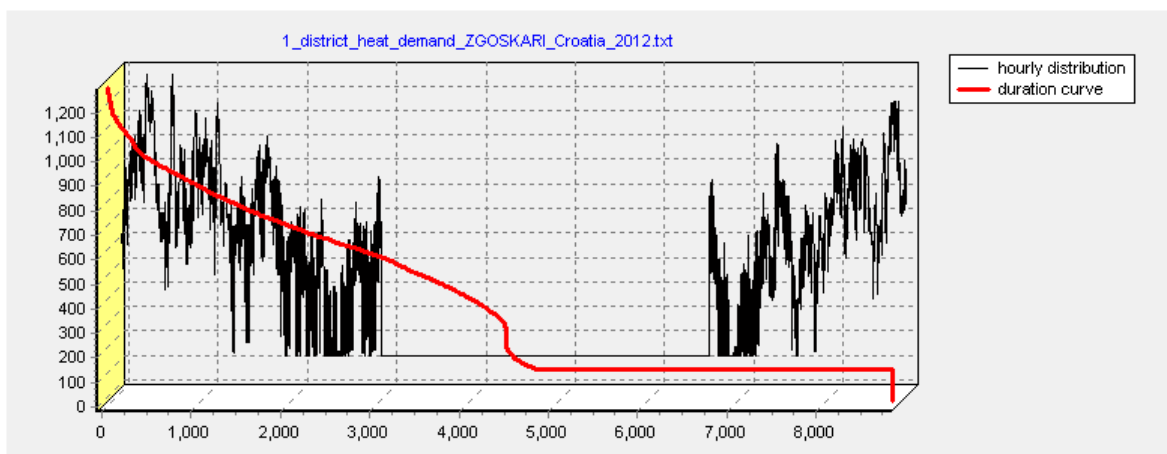
	Jedinica	2018.	2018.	
			TJ	%
Derivati nafte	10 <sup>3</sup> t	10,8	362	2,9%
Toplinska energija	TJ	7.796,3	7.796	61,6%
Električna energija	GWh	1249,9	4.500	35,5%
<b>UKUPNO</b>			<b>12.658</b>	<b>100,0%</b>
Gubici transformacija			2.758	17,9%

**Tablica 5-5.** Struktura oblika energije u neposrednoj potrošnji Grada Zagreba u 2018. godini (Energetski institut Hrvoje Požar, 2019)

	Jedinica	2018.	2018.	
			TJ	%
Ugljen	10 <sup>3</sup> t	0,2	44.845	100,0%
Prirodni plin	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	332,5	44.845	100,0%
Ogrjevno drvo	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	5.746,1	44.845	100,0%
Ostali obnovljivi	TJ	5.746,1	44.845	100,0%
Derivati nafte	10 <sup>3</sup> t	5.746,1	44.845	100,0%
Toplinska energija	TJ	5.746,1	44.845	100,0%
Električna energija	GWh	2.779,1	44.845	100,0%
<b>UKUPNO</b>			<b>44.845</b>	<b>100,0%</b>

Pri modeliranju korištena je satna distribucija potražnje za toplinskom energijom za velike gradove Republike Hrvatske koja se nalazi u sklopu EnergyPLAN programa. Grafički prikaz satne potrošnje u sučelju programa EnergyPLAN ilustrativno predočava slika 5-5.





**Slika 5-5.** Satna distribucija potražnje za toplinskom energijom CTS – a

### 5.5.2. *Proizvodnja toplinske energije*

Kako je već navedeno u ovome radu, CTS Grada Zagreba toplinskom energijom opskrbljuju kogeneracijska postrojenja EL – TO i TE – TO. Pri modeliranju referentnog modela Grada Zagreba u programu EnergyPLAN, zbroj ukupnih proizvodnih kapaciteta ovih dvaju postrojenja unosi se u odjeljak opskrbe toplinske i električne energije pod grupom 3 koja predstavlja CTS – e s većim kogeneracijskim postrojenjima. Koristeći podatke iz tablice 5-1 i tablice 5-2, određeni su sveukupni kapaciteti postrojenja koji iznose 774 MJ/s izravne proizvodnje toplinske energije, te 490,4 MW električne proizvodnje i 465,2 MJ/s toplinske proizvodnje u kogeneracijskom režimu proizvodnje. Radi pojednostavljenja zadatka, pretpostavka je da se u postrojenjima kao gorivo isključivo koristi prirodni plin.

### 5.6. Razmatrani scenariji dekarbonizacije s pogledom na CTS četvrte generacije

Promatrana su četiri scenarija u ovome radu. Prilikom izrade scenarija korištene su predviđene cijene za 2030. godinu. Cijena CO<sub>2</sub> emisija predviđa se na 100 eura po toni CO<sub>2</sub>, dok se cijena prirodnog plina predviđa na 19,4 eura po GJ. U obzir nije uzet porast broja korisnika priključenih na CTS. Iako prema se prema dugoročnoj strategiji obnove nacionalnog fonda zgrada do 2050. godine predviđa energetska obnova 25% zgrada na državnoj razini do 2030. godine (Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine, 2020), u ovome radu pretpostavlja se da je do 2030. godine izvršena obnova zgrada i CTS – a na razinu kompatibilnu s uporabom nižih temperatura 4GDH – a. Lapidaran prikaz modeliranih scenarija dan je u tablici 5-6.

### 5.6.1. Scenarij S1

U ovome scenariju proučava se utjecaj smanjenja toplinskih gubitaka uslijed nižih temperatura toka tople vode za istu potražnju za toplinskom energijom. Pretpostavlja se da su toplinski gubici u sustavu smanjeni na 10%. U programu EnergyPLAN se pod odjeljkom grijanja unutar potražnje pod proizvodnju grupe 3 CTS – a stavlja vrijednost od 1,77 TWh godišnje, dok se pod gubitke u mreži stavlja vrijednost od 0,1.

### 5.6.2. Scenarij S2

Mogućnost uporabe izvora toplinske energije nižih temperatura, otvara mogućnost primjeni dosad neiskorištenih potencijala. Ovaj scenarij obuhvaća dodatak prije navedene geotermalne energije, kao i proizvodnju iz solarnih kolektora sa sezonskim spremnikom topline, te izgradnju kogeneracijskog postrojenja za termičku obradu otpada.

Za proizvodnju toplinske energije iz geotermalnih izvora zamišljena je izrada 10 proizvodno – utisnih parova bušotina, s ukupnom proizvodnjom toplinske energije od 0,9 TWh godišnje, uz pretpostavku izdašnosti proizvodne bušotine od 77,14 l/s, temperature 60 °C. Pretpostavlja se da je voda proizvedena iz ovih bušotina dostatne temperature za izravnu primjenu u 4GDH sustavu bez potrebe uporabe dizalica topline, te da u sustavu postigne temperaturni pad od 30 °C. Proizvodni kapaciteti jednog para bušotina dobiva se prema jednadžbi (5-1.):

$$P = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5-1.)$$

- gdje su:

P – toplinska snaga geotermalne vode, kW

q – protok, m<sup>3</sup>/s

ρ – gustoća vode, 1000 kg/m<sup>3</sup>

c<sub>p</sub> – specifični toplinski kapacitet vode, 4,199 kJ/kgK

ΔT – temperaturni pad, K

Pretpostavljena je i ugradnja solarnih kolektora na krovovima zgrada s ukupnom proizvodnjom 0,24 TWh toplinske energije godišnje. U sklopu ugradnje kolektora pretpostavljena je i izgradnja sezonskog spremnika toplinske energije toplinskog kapaciteta 380 GWh.

U kogeneracijskom postrojenju za termičku obradu otpada proizvodilo bi se 0,19 TWh toplinske energije godišnje.

### 5.6.3. Scenarij S3

U ovome scenariju razmatra se dodavanje kompresijskih dizalica topline i sezonskog spremnika topline sustavu opisanom u scenariju S2. Sustavu je dodano 10 MW<sub>e</sub> dizalica topline s omjerom učinka 3. Sezonski spremnik toplinskog je kapaciteta 100 GWh.

### 5.6.4. Scenarij S4

Scenarij 4 razmatra potpunu zamjenu uporabe prirodnog plina za proizvodnju toplinske energije bioplinom. Sustavu se dodaje 0,53 TWh bioplina godišnje. Pretpostavka je da se bioplin ne proizvodi na području grada, nego uvozi.

**Tablica 5-6.** Modelirani scenariji

		S1	S2	S3	S4
Gubici	%	10%	10%	10%	10%
Geotermalna energija	TWh/god	0	0,9	0,9	0,9
Solarni kolektori	TWh/god	0	0,24	0,24	0,24
Sezonski spremnik topline za solarne kolektore	GWh	0	380	380	380
Spaljivanje otpada	TWh/god	0	0,64	0,64	0,64
Dizalice topline	MW <sub>e</sub>	0	0	10	10
Sezonski toplinski spremnik	GWh	0	0	100	100
Bioplin	TWh/god	0	0	0	0,53

### 5.7. Troškovi vezani uz implementaciju razmatranih scenarija

Pri izradi ovoga rada korišteni su katalozi podataka Danske energetske agencije, s projekcijama cijena za 2030. godinu. Katalozi su objavljeni u razdoblju od 2016. godine do 2018. godine, te se dijelovi kataloga redovito ažuriraju. U obzir je uzeta diskontna stopa od 5%.

#### *5.7.1. Troškovi vezani uz proizvodnju geotermalne energije*

Uz pretpostavku cijene izrađivanja kanala bušotine od 1900 eura po metru procijenjeni trošak ulaganja u ovu tehnologiju iznosi 2,47 milijuna eura po MW. U cijenu nisu uključeni troškovi razvoja projekta poput izvedbi geofizičkih istraživanja i izrade geoloških modela, koji se procjenjuju u razmjeru od 1,5 do 3 milijuna eura po projektu. Fiksni operativni troškovi iznose 21.100 eura po MW po godini, dok varijabilni iznose 5,8 eura po MWh (Danish Energy Agency, 2016). Za period otplate pretpostavlja se 50 godina.

#### *5.7.2. Troškovi vezani uz proizvodnju toplinske energije iz solarnih kolektora*

Predviđena kapitalna ulaganja izvedbe integracije solarnih kolektora za 2030. godinu iznose 362 eura po MWh po godini, uz fiksne godišnje operativne troškove od 0,08 eura po MWh po godine i varijabilne operativne troškove od 0,3 eura po MWh (Danish Energy Agency, 2016). Zamišljeno je da ugrađeni kolektori imaju vijek trajanja 30 godina.

#### *5.7.3. Troškovi vezani uz proizvodnju toplinske energije spaljivanjem otpada*

Nominalni troškovi ulaganja u postrojenje za termičku obradu otpada iznose 1,71 milijuna eura po MW toplinske proizvodnje. Fiksni godišnji operativni troškovi iznose 73.900 eura po MW<sub>t</sub>, dok varijabilni operativni troškovi iznose 8,2 eura po MWh toplinske energije (Danish Energy Agency, 2016). Period otplate ulaganja odredio se je na 25 godina.

Pri izračunu troškova goriva postrojenja pretpostavila se je cijena otpada od 8,33 eura po GJ u 2030. godini. Ovaj trošak u analizi se je postavio kao negativan trošak, jer postrojenje zapravo ostvaruje prihode iz naknada za zbrinjavanje otpada. Trošak uvoza bioplina pretpostavljen je da iznosi 15 eura po GJ.

#### *5.7.4. Troškovi vezani uz primjenu dizalica topline*

Prema procjeni za 2030. godinu uzet je nominalni trošak ulaganja od 0,57 milijuna eura po MJ/s. Godišnji fiksni operativni troškovi iznose 2000 eura po MJ/s, dok varijabilni operativni troškovi iznose 2 eura po MWh (Danish Energy Agency, 2016). Određen je period otplate 5 godina.

#### *5.7.5. Troškovi vezani uz skladištenje toplinske energije*

Za izradu sezonskog spremnika topline u obliku jame za pohranu viška proizvodnje toplinske energije solarnih kolektora u 2030. godini predviđa se trošak od 0,54 milijuna eura po GWh. Fiksni godišnji operativni troškovi procjenjuju se na 3 eura po MWh, dok varijabilnih

troškova nema (Danish Energy Agency, 2018). Za spremnike topline odabran je period otplate od 30 godina.

#### 5.8. Analiza rezultata simulacija provednih u programu EnergyPLAN

Svi scenariji izvedeni su programom EnergyPLAN kao tehnička simulacija s uravnoteženjem toplinskog sustava, ne i električnog. Iz toga razloga se u ovome modelu ne vidi potpuni utjecaj prelaska na 4GDH, poput npr. mogućnosti punjenja spremnika topline radom električnih grijača i dizalica topline za vrijeme viška proizvodnje električne energije. Ipak, ovaj pristup omogućuje nam procijeniti učinak trenutno dostupnih izvora energije Grada Zagreba dekarbonizaciju toplinske mreže. Koncizan pregled učinaka pojedinog scenarija na dekarbonizaciju CTS – a prikazuje tablica 5-7.

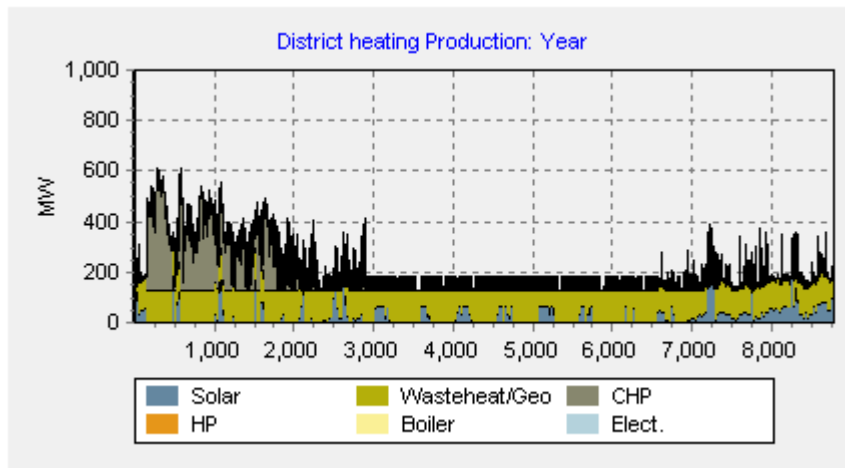
**Tablica 5-7.** Učinak pojedinačnih scenarija na dekarbonizaciju CTS - a

		<b>BAU</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>
CO2	MtCO2	0.877	0.722	0.254	0.183	0.075
Udio OiE	%	0.3	0	49.7	62	100
Potrošnja PP	TWh	4.26	3.54	0.88	0.53	0

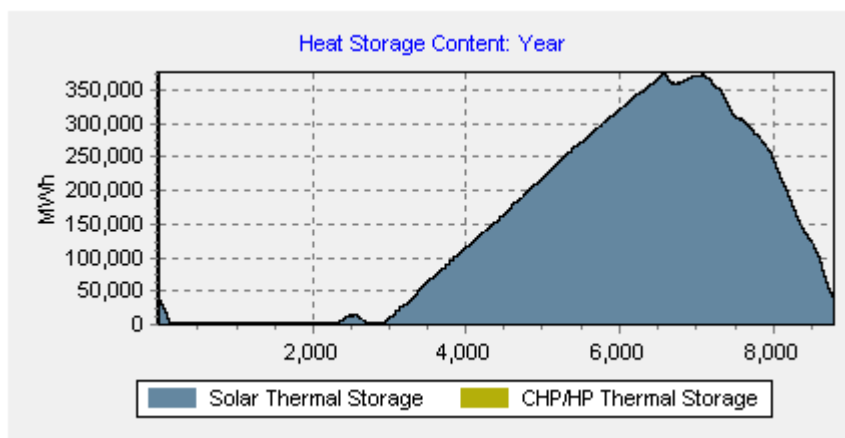
Kako je vidljivo u rezultatima prvog scenarija, smanjenje gubitaka u sustavu na 10% omogućilo je zadovoljavanje iste potražnje za toplinskom energijom spaljivanjem 17% manje količine prirodnog plina u odnosu na referenti scenarij trenutnoga stanja CTS – a Zagreba. Time je ostvareno smanjenje emisija od 17,7%. Rezultat manje potrošnje prirodnog plina također su i niži prihodi od prodaje električne energije, a iznose 367 milijuna eura u odnosu na 437 milijuna eura prihoda u referentom scenariju. Uzimanjem u obzir i niže troškove kupovine prirodnog plina, dobit u referentom scenariju veća je za 9,7% od dobiti scenarija S1, koja iznosi 47 milijuna eura.

Dodavanjem obnovljivih izvora energije u scenariju S2 može se primijetiti drastičan pad emisija CO<sub>2</sub> od 64,8% u odnosu na scenarij S1, što je i glavna odlika ovakvih oblika energije. Daljnjim dodavanjem 10 MW<sub>e</sub> dizalica topline u scenariju, te u konačnici potpunom zamjenom prirodnog plina u kogeneracijskoj proizvodnji električne i toplinske struje bioplinom, emisije CO<sub>2</sub> mogu se spustiti na svega 0,075 Mt, koje su isključivo rezultat sagorijevanja otpada u postrojenju za termičku obradu otpada.

Udio pokrivanja satne potražnje pojedinog izvora toplinske energije za scenarij S2 detaljno prikazuje slika 5-6. Kako se iz slike može uočiti, u ranijim zimskim mjesecima potražnju za toplinskom energijom mogu zadovoljiti geotermalni izvori, te toplinska energija solarnih kolektora. Ispražnjavanjem sezonskog spremnika topline u siječnju, kako prikazuje slika 5-6, kogeneracijska postrojenja preuzimaju najveći dio proizvodnje toplinske energije.

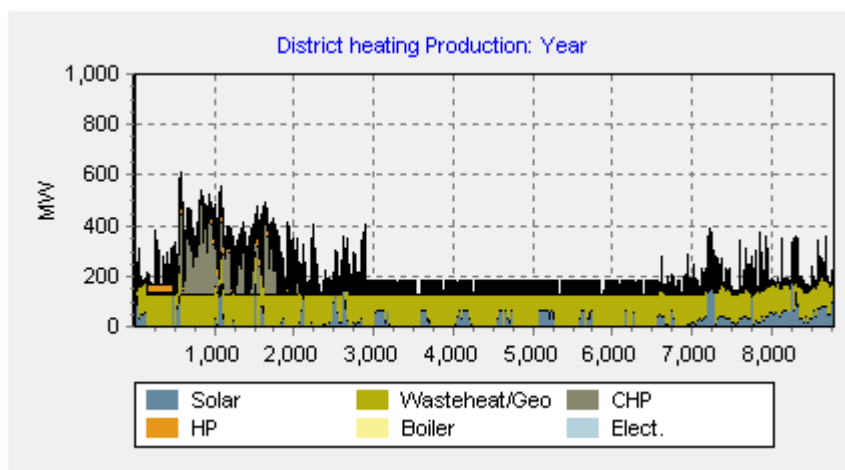


**Slika 5-6.** Proizvodnja toplinske energije CTS – a scenarija S2



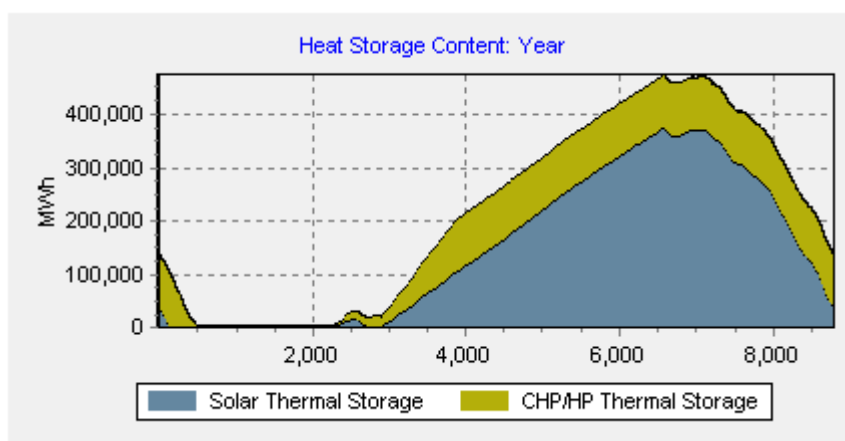
**Slika 5-7.** Satna ispunjenost sezonskog spremnika topline scenarija S2

Proizvodnju toplinske energije za CTS scenarija S3 detaljno prikazuje slika 5-6. Iz slike je vidljivo da se dodatkom 10 MWe dizalica topline i 100 GWh sezonskih spremnika topline najveći učinak imaju u ranijem dijelu godine, kada dolazi do potpunog ispražnjavanja sezonskog spremnika topline solarnih kolektora.



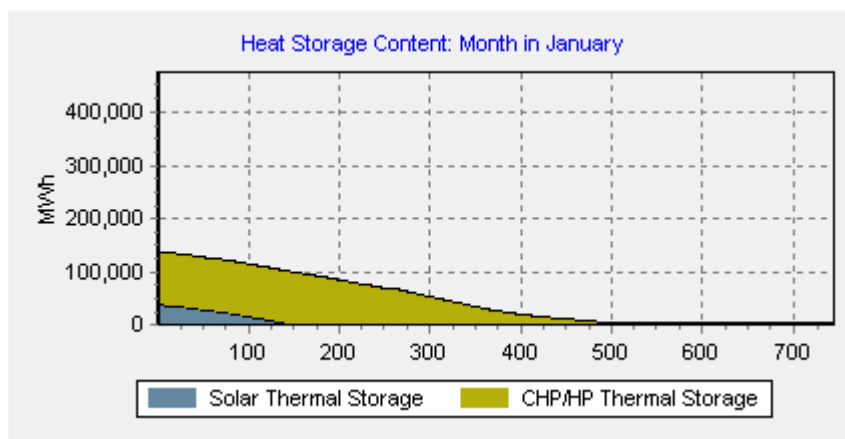
**Slika 5-8.** Proizvodnja toplinske energije CTS – a scenarija S3

Slika 5-9 prikazuje ispunjenost sezonskih spremnika topline tokom trajanja jedne godine. Iz slike se vidi da odabrani spremnici pohrane maksimalne količine toplinske energije tokom ciklusa punjenja. Toplinski kapaciteti spremnika nisu dostatni za uporabu tokom cijele sezone grijanja, no pokrivaju potražnju rane zime.



**Slika 5-9.** Satna ispunjenost sezonskih spremnika toplina scenarija S3 kroz cijelu godinu

Kako prikazuje slika 5-10, zajedničkim djelovanjem dizalica topline i toplinskog spremnika potreba za radom kogeneracijskog postrojenja odgađa za 20 – ak dana. Emisije CO<sub>2</sub> za 28% su manje u odnosu na scenarij S2. No, za to smanjenje emisija povećanje ukupnih godišnjih gubitaka za 9 milijuna eura, odnosno 14,8%, uz diskontnu stopu od 5%.



**Slika 5-10.** Satna ispunjenost sezonskih spremnika topline scenarija S3 za mjesec siječanj

Tablica 5-8 prikazuje godišnje troškove modeliranih toplinskih sustava u milijunima eura. U tablici se vidi da su troškovi implementacije scenarija S2 najveći, te iznose 52 milijuna eura godišnje. Ukupnim godišnjim troškovima najviše doprinosi priključivanje geotermalnih izvora energije sustavu, s ukupnim troškovima 282,45 milijuna eura, odnosno s godišnjim troškom od 15 milijuna eura. Slijede sezonski spremnici toplinske energije s ukupnih 17 milijuna eura godišnje, te postrojenje za termičku obradu otpada s 9 milijuna eura godišnje. Može se zaključiti da bi implementacija ovih scenarija, uz pretpostavku prethodno adaptiranog CTS – a na zahtjeve 4GDH -a, zahtijevala poprilične investicijske troškove.

**Tablica 5-8.** Tablični prikaz godišnjih troškova simuliranih scenarija

		<b>BAU</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>
Godišnji investicijski troškovi	M€	0	0	42	47	47
Godišnji varijabilni operativni troškovi	M€	-52	-47	52	61	53
Godišnji fiksni operativni troškovi	M€	0	0	15	15	15
Godišnji trošak CO2 emisija	M€	88	72	25	18	18
Godišnji trošak goriva	M€	298	247	61	37	29
Trošak izmjene električne energije	M€	-437	-367	-93	-57	-57
Ukupni godišnji troškovi	M€	-52	-47	52	61	53



## 6. ZAKLJUČAK

U ovome radu izrađen je referenti model centralnog toplinskog sustava Grada Zagreba, te su razrađena četiri scenarija dekarbonizacije centralnog toplinskog sustava. Obrađeni scenariji podrazumijevaju smanjenje gubitaka u distribucijskom sustavu, kao i dodavanje novih izvora toplinske energije čija je primjena omogućena niskim temperaturama 4GDH sustava. Simulacijom scenarija računalnim alatom EnergyPLAN, pokazano je da se smanjenjem gubitaka u toplinskoj mreži CTS – a Grada Zagreba ostvaruje smanjenje emisija CO<sub>2</sub> iz toplinskog sustava od 17,7%. Pokazano je i implementacijom kojih tehnologija unutar teoretskog 4GDH sustava Grada Zagreba bi se postigao udio obnovljivih izvora energije od 100% unutar CTS – a, s emisijama CO<sub>2</sub> od svega 0,075 Mt CO<sub>2</sub>.

Ekonomskom analizom obrađenih scenarija ustanovljeno je da bi implementacija predloženih scenarija bila kapitalno intezivan proces. Cijene odabranih tehnoloških rješenja trenutno su previsoke za ekonomski isplativu integraciju u toplinski sustav. Pri analizi predloženih scenarija u obzir nisu uzeta ulaganja u samu obnovu i adaptaciju CTS – a na sustav 4GDH, kao ni ulaganja energetske obnovu fonda zgrada koja je nužna za mogućnost uspješnog zagrijavanja prostora na ugodnu temperaturu pri nižim polaznim temperaturama distribucijske mreže. Također, u obzir nije uzeto ni smanjivanje potražnje za toplinskom energijom uslijed navedene obnove fonda zgrada, što je još jedan od izazova s kojima će se centralizirani toplinski sustavi budućnosti suočiti. Stoga, prelazak postojećeg sustava na onaj četvrte generacije predstavlja značajan izazov, te se trenutno ne čini vjerojatnim.

Ipak, uzimajući gore navedeno u obzir, Gradu Zagrebu dostupan je značajan neiskorišten energetske potencijal, prvenstveno iz solarnih i geotermalnih izvora, koji će svakako imati primjenu u budućim strategijama dekarbonizacije energetske sustava grada.

## 7. LITERATURA

1. AVERFALK, H., WERNER, S., 2020. Economic benefits of fourth generation district heating. *Energy*, Svezak 193.
2. BRANGE, L., ENGLUND, J., LAUENBURG, P., 2016. Prosumers in district heating networks – A Swedish case study. *Applied Energy*, Svezak 164, pp. 492 - 500.
3. CAZIN, V., 2019. Eksploatacijsko polje geotermalne vode Zagreb i mogućnosti njezinog korištenja. *Nafta i plin*, 38(156), pp. 62 - 73.
4. DAVID, A., MATHIESEN, B. V., AVERFALK, H., WERNER, S., LUND, H., 2017. Heat roadmap Europe: large-scale electric heat pumps in district heating systems. *Energies*, 10(4), p. 578.
5. EKOENERG D.O.O., 2018. *Elaborat zaštite okoliša - Zahvat: Zamjena toplinske mreže za područje Zagreba*, Zagreb: an.
6. ENERGETSKI INSTITUT HRVOJE POŽAR, 2017. *Analiza sektora toplinarstva i iskorištavanja potencijala geotermalnih izvora na području Urbane aglomeracije Zagreb*, Zagreb: an.
7. ENERGETSKI INSTITUT HRVOJE POŽAR, 2019. *Energetska bilanca Grada Zagreba za 2018. godinu s procjenama potrošnje za 2019. i 2020.*, Zagreb: Energetski institut Hrvoje Požar.
8. ERICSSON, K., NILSSON, L. J., 2006. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. *Biomass and bioenergy*, 30(1), pp. 1 - 15.
9. FRUERGAARD, T., CHRISTENSEN, T. H., ASTRUP, T., 2010. Energy recovery from waste incineration: Assessing the importance of district heating networks. *Waste Management*, Svezak 30, pp. 1264 - 1272.
10. GALLO, E., 2003. Skyscrapers and District Heating, an inter-related History 1876-1933. *Construction History*, Svezak 19, pp. 87-106.
11. GETLIHER, A., HORVAT, S., 2008. *Uporaba geotermalnih resursa na području grada Zagreba u cilju gospodarskog razvitka*, Zagreb: INA - Industrija nafte d.d.

12. GLASSLEY, W. E., 2014. *Geothermal energy: renewable energy and the environment*. s.l.:CRC press.
13. GLAVNA UPRAVA ZA ENERGETIKU - EUROPSKA KOMISIJA, 2019. *Clean energy for all Europeans*, s.l.: an.
14. HEAT ROADMAP EUROPE, 2017. *Profile of heating and cooling demand in 201*, s.l.: an.
15. HRVATSKA ENERGETSKA REGULATORNA AGENCIJA, 2020. *Godišnje izvješće o radu Hrvatske energetske regulatorne agencije za 2019. godinu*, Zagreb: an.
16. IEA BIOENERGY, 2003. *Municipal Solid Waste and its Role in Sustainability*, s.l.: IEA Bioenergy.
17. ILIC, D. D., DOTZAUER, E., TRYGG, L., BROMAN, G., 2014. Introduction of large-scale biofuel production in a district heating system—an opportunity for reduction of global greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*, Svezak 64, pp. 552 - 561.
18. LAUENBURG, P., 2016. Temperature optimization in district heating systems. U: R. Wiltshire, ur. *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*. s.l.:Woodhead Publishing, pp. 223-240.
19. LUND, H., 2014. *A smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions*. 2nd ur. Oxford: Elsevier Inc..
20. LUND, H. ØSTERGAARD, P. A., CHANG, M., WERNER, S., SVENDSEN, S., SORKNÆS, P., THORSEN, J. E., HVELPLUND, F., MORTENSEN, B. O. G., MATHIESEN, B. V., BOJESSEN, C., DUIC, N., ZHANG, X., MÖLLER, B., 2018. The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, Svezak 164, pp. 147 - 159.
21. LUND, H., WERNER, S., WILTSHIRE, R., SVENDSEN, S., THORSEN, J. E., HVELPLUND, F., MATHIESEN, B. V., 2014. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, Issue 68, pp. 1-11.

22. LUND, J. W., TOTH, A. N., 2020. *Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review*. Reykjavik, World Geothermal Congress 2020.
23. MINISTARSTVO GOSPODARSTVA I ODRŽIVOG RAZVOJA, UPRAVA ZA PROCJENU UTJECAJA NA OKOLIŠ I ODRŽIVO GOSPODARENJE OTPADOM, SEKTOR ZA PROCJENU UTJECAJA NA OKOLIŠ, 2021. *Rješenje o izmjeni i dopuni uvjeta okolišne dozvole*, Zagreb: an.
24. MINISTARSTVO PROSTORNOG UREĐENJA, GRADITELJSTVA I DRŽAVNE IMOVINE, 2020. *Dugoročna strategija obnove nacionalnog fonda zgrada do 2050. godine*, s.l.: Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine.
25. MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ENERGETIKE, ZAVOD ZA ZAŠTITU OKOLIŠA I PRIRODE, 2019. *Izješće o komunalnom otpadu za 2018. godinu*, Zagreb: Ministarstvo zaštite okoliša i energetike.
26. NILSSON, S. F., 2016. New developments in pipes and related network components for district heating. U: R. Wiltshire, ur. *Advanced district heating and cooling (DHC) systems*. s.l.:Woodhead Publishing, pp. 191 - 214.
27. ØSTERGAARD, P. A., 2012. Comparing electricity, heat and biogas storages' impacts on renewable energy integration. *Energy*, 37(1), pp. 255 - 262.
28. PERKOVIĆ, L., 2021. *Planiranje i tehno-ekonomsko analiziranje energetske sustava korištenjem programa EnergyPLAN*. Zagreb: Interna skripta iz kolegija "Distribucija i korištenje energije".
29. PERSSON, U., MÜNSTER, M., 2016. Current and future prospects for heat recovery from waste in European district heating systems: A literature and data review. *Energy*, Svezak 110, pp. 116 - 128.
30. PERSSON, U., WERNER, S., 2012. District heating in sequential energy supply. *Applied Energy*, Svezak 95, pp. 123 - 131.
31. SCHLEICHER - TAPPESER, R., 2012. How renewables will change electricity markets in the next five years. *Energy policy*, Svezak 48, pp. 64 - 75.
32. SCHMIDT, D., 2018. Low Temperature District Heating for Future Energy Systems. *Energy Procedia*, Svezak 149, pp. 595 - 604.

33. SCHMIDT, D., KALLERT, A., BLES, M., SVENDSEN, S., LI, H., NORD, N., SIVILÄ, K., 2017. Low temperature district heating for future energy systems. *Energy Procedia*, Svezak 116, pp. 22 - 38.
34. SIVILÄ, K., 2016. Cogeneration, biomass, waste to energy and industrial waste heat for district heating. U: R. Wiltshire, ur. *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*. s.l.:Woodhead Publishing, pp. 45 - 73.
35. SKAGESTAD, B., MILDENSTEIN, P., 2002. *District heating and cooling connection handbook*. Paris: Netherlands Agency for Energy and the Environment.
36. SVEINBJÖRNSSON, B. M., 2016. *Medium Enthalpy Geothermal Systems in Iceland - Thermal and Electric Potential*, s.l.: Icelandic Geosurvey, prepared for the National Energy Authority of Iceland.
37. THOMSEN, P. D. I OVERBYE, P. M., 2016. Energy storage for district energy systems. U: R. Wiltshire, ur. *In Advanced district heating and cooling (DHC) systems*. s.l.:Woodhead Publishing, pp. 145 - 166.
38. THORSEN, J. E., LUND, H., MATHIESEN, B. V., 2018. *Progression of District Heating – 1st to 4th generation*, s.l.: an.
39. TIAN, Z. ZHANG, S., DENG, J., FAN, J., HUANG, J., KONG, W., PERERS, B., FURBO, S., 2019. Large-scale solar district heating plants in Danish smart thermal grid: Developments and recent trends. *Energy conversion and management*, Svezak 789, pp. 67 - 80.
40. TRIER, D., SKOV, C. K., SØRENSEN, S. S., 2018. *Potentials for Ground-Mounted SDH in Europe*. Graz, International Solar District Heating Conference.
41. YANG, X., LI, H., SVENDSEN, S., 2016. Alternative solutions for inhibiting Legionella in domestic hot water systems based on low-temperature district heating. *Building Services Engineering Research and Technology*, 37(4), pp. 468-478.
42. ZAJACS, A., BOGDANOVICS, R., BORODINECS, A., 2020. Analysis of low temperature lift heat pump application in a district heating system for flue gas condenser efficiency improvement. *Sustainable Cities and Society*, Svezak 57.

43. ŽIVKOVIĆ, S., KOLBAH, S., ŠKRLEC, M., TUMARA, D., 2019. *Geothermal Energy Use, Country Update for Croatia*. s.l., Proceedings of the European Geothermal Congress.

- **WEB IZVORI:**

44. HEP d.d., 2018. URL:

[https://www.hep.hr/proizvodnja/UserDocsImages/dokumenti/tehnicki\\_podaci\\_termoelektrane/TE-TO\\_Zagreb.pdf](https://www.hep.hr/proizvodnja/UserDocsImages/dokumenti/tehnicki_podaci_termoelektrane/TE-TO_Zagreb.pdf) (28.7.2021.)

45. HOTMAPS, 2020. *Hotmaps*. URL: <https://www.hotmaps.eu/map> (29.8.2021.)

46. IEA, 2019. *Heat supplied through DHD and % of renewables, 2007-2024*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/heat-supplied-through-dhd-and-of-renewables-2007-2024> (22.7.2021.)

47. SLUŽBENI LIST EUROPSKE UNIJE, 2016. *Pariški sporazum*. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)ifrom=HR](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:22016A1019(01)ifrom=HR) (20.7.2021.)

48. SOLARTHERMALWORLD, 2019. *Support for renewable district heating in Slovenia*. URL: <https://www.solarthermalworld.org/news/support-renewable-district-heating-slovenia> (20.7.2021.)

49. TERMONET, 2017. *Termonet*. URL: <https://termonet.dk/> (10.08.2021.)

50. DANISH ENERGY AGENCY, 2016. *Energistyrelsen*. URL: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-generation-electricity-and> (27.8.2021.)

51. DANISH ENERGY AGENCY, 2018. *Energistyrelsen*. URL: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-energy-storage> (27.8.2021.)

52. EUROPEAN COMMISSION, 2021. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0550ifrom=EN> (20.7.2021.)

## IZJAVA

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

A handwritten signature in black ink, written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to read 'Josip Vicelja'.

Josip Vicelja



KLASA: 602-04/21-01/233  
URBROJ: 251-70-12-21-2  
U Zagrebu, 15.9.2021.

Josip Vicelja, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/233, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 6.9.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### TEHNO – EKONOMSKA ANALIZA PRELASKA CENTRALNOG TOPLINSKOG SUSTAVA GRADA ZAGREBA NA SUSTAV ČETVIRTE GENERACIJE KORIŠTENJEM PROGRAMA ENERGYPLAN

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 nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)