

# Usporedba rada solarnog centraliziranog toplinskog sustava u Danskoj i Hrvatskoj

---

**Vučković, Mirko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:395146>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-18**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Mirko Vučković**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv.prof. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Mirko Vučković

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru Izv.prof. dr. sc. Goranu Krajačiću na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada. Također velika zahvala i asistentu Goranu Stunjeku na stručnim savjetima i pomoći bez kojih izrada ovoga rada ne bi bila moguća.

Zahvaljujem se projektu KeepWarm sufinanciranom iz programa za istraživanje i razvoj Obzor 2020., (broj ugovora o sufinanciranju 784966) na ustupljenim podacima i informacijama, u sklopu kojeg je izrađen i ovaj završni rad.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima, kolegama i profesorima koji su mi bili potpora za vrijeme studiranja.

Za kraj posebno se zahvaljujem roditeljima: majci Kati i ocu Marinu na velikom razumijevanju i bezuvjetnoj potpori kako za vrijeme studiranja tako i kroz cijeli život. Veliko hvala i baki Janji koja se posebno brinula oko svakog ispita.

Mirko Vučković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mirko Vučković** Mat. br.: 0035200848

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba rada solarnog centraliziranog toplinskog sustava u Danskoj i Hrvatskoj**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of solar district heating system operation in Denmark and Croatia**

Opis zadatka:

Centralizirani toplinski sustavi (CTS) omogućuju povećanje udjela obnovljivih izvora energije (OIE) u sektoru grijanja i hlađenja, što spada pod energetske ciljeve koje je definirala Europska unija. U sklopu konceptualnog okvira „Pametnih toplinskih mreža“ centralizirani toplinski sustavi mogu igrati glavnu ulogu kroz održivu i učinkovitu proizvodnju toplinske energije.

U Danskom gradu Gramu 2005. godine uzrok povećanja troškova grijanja zbog liberalnog tržišta električne energije rezultirao je promjenom razmišljanja oko načina proizvodnje toplinske energije i razmatranja iskorištavanja energije sunca. Postojećem postrojenju koje se sastoji od plinskog motora, električnog i plinskog kotla te kogeneracijskog bloka dodani su solarni kolektori, dizalica topline i sezonski spremnik topline. Godine 2015. polje solarnih kolektora prošireno je na sadašnjih 44 800 m<sup>2</sup> s ciljem pokrivanja 60% od ukupnih 30 GWh zahtjeva za toplinskom energijom.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. Napraviti pregled literature na temu rada, te detaljnije istražiti i prikupiti podatke o toplani u Gramu, Danska.
2. Opisati rad toplane u Gramu i njenih komponenti s posebnim naglaskom na rad solarne toplane i sezonskog spremnika.
3. Provjeriti primjenjivost rješenja iz Grama na primjeru grada Zaprešića.
4. Napraviti tehno-ekonomsku analizu primjene rješenja u gradu Zaprešiću u nekom od dostupnih računalnih programa.

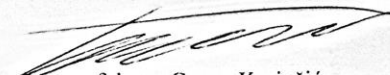
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

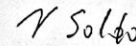
Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
1. rok: 18. veljače 2021.  
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.  
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.  
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.  
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

  
Izv.prof.dr.sc. Goran Krajačić

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Hrvatski klimatski plan .....	2
1.1.1. Ciljevi za obnovljive izvore energije .....	3
1.2. Cilj rada.....	4
2. Centralizirani toplinski sustav (CTS) .....	5
2.1. Razvoj centraliziranog toplinskog sustava.....	6
2.2. Centralizirani toplinski sustav u Hrvatskoj .....	7
2.3. Centralizirani solarni toplinski sustav (CSTS).....	9
2.3.1. Solarni kolektori.....	10
2.3.2. Sezonski spremnici topline .....	11
2.4. Centralizirani solarni toplinski sustav u Hrvatskoj .....	13
3. Centralizirani solarni toplinski sustav u Danskoj .....	14
3.1. Primjeri centraliziranog solarnog toplinskog sustava u Danskoj.....	15
3.1.1. Silkeborg .....	15
3.1.2. Vojens .....	16
3.1.3. Dronninglund .....	17
4. Gram .....	19
4.1. Opis dijelova .....	20
4.1.1. Dizalica topline .....	20
4.1.2. Solarni kolektori.....	20
4.1.3. Sezonski spremnik topline .....	21
4.2. Opis rada toplane .....	21
4.2.1. Proizvodnja solarnih kolektora .....	24
4.2.2. Sezonski spremnik topline (PTES) .....	25
4.2.2.1. Usporedba PTES-a u Gramu i Dronninglundu .....	26
5. Zaprešić.....	27
5.1. Opis postojećeg toplinskog sustava .....	27
5.2. Plan za budući centralizirani toplinski sustav .....	29
6. Opis zadatka i postupak rješavanja.....	31
6.1. F-easy.....	31
6.2. Sunstore 4 Feasibility Evaluation Tool.....	32
6.2.1. Organski Rankinov ciklus (ORC).....	34
6.3. Podaci o cijenama i troškovima .....	35

---

6.3.1. Investicijski trošak solarnih kolektora i sezonskog spremnika topline (PTES)..	35
6.3.2. Iznosi investicije za Scenarij 1 i 2.....	37
6.3.3. Cijena toplinske energije prema Scenariju 1 i 2 .....	38
6.4. Tehno-ekonomska analiza i analiza osjetljivosti .....	38
7. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44
PRILOZI.....	46

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Ciljevi smanjenja emisija stakleničkih plinova Europske unije do 2050. godine. [2] .....	1
Slika 2.	Procjena rasta OIE za grijanje i hlađenje do 2030. godine [5].....	4
Slika 3.	Shema CTS-a [7] .....	5
Slika 4.	Razvoj CTS-a s vremenom [10].....	7
Slika 5.	Prikaz gradova u Hrvatskoj u kojima postoje toplinski sustavi [12].....	8
Slika 6.	Energetska bilanca u CTS u Hrvatskoj [11].....	9
Slika 7.	Shematski prikaz SCTS-a [14] .....	10
Slika 8.	Jednostavna shema pripreme potrošne tople vode iz solarnih kolektora [16].....	11
Slika 9.	Tipovi sezonskih spremnika topline [17] .....	12
Slika 10.	Polje solarnih kolektora u Vukovaru [18] .....	13
Slika 11.	CSTS u Danskoj prema površini solarnih kolektora i broju instaliranih toplana [20] .....	14
Slika 12.	Polje solarnih kolektora u Silkeborgu [21].....	16
Slika 13.	Polje kolektora i sezonski spremnik u Vojensu [23].....	16
Slika 14.	Solarni kolektori u Dronninglundu [24].....	17
Slika 15.	Tok energije PTES-a u Drunnglundu u MWh 2017 godine [25].....	17
Slika 16.	Polje solarnih kolektora sa sezonskim spremnikom u Gamu [29] .....	19
Slika 17.	Shema toplane u Gramu [28].....	20
Slika 18.	Shema rada CSTS-a u Gramu (pit-sezonski spremnik; SC-solarni kolektori; HP-dizalica topline) [30] .....	21
Slika 19.	Mjesečna proizvodnja topline u MWh u 2017. godini [10] .....	23
Slika 20.	Mjesečna proizvodnja topline solarnih kolektora 2017. godine [30].....	24
Slika 21.	Mjesečna proizvodnja topline solarnih kolektora i ostala toplina za pokrivanje ukupnih zahtjeva 2020. godine [31] .....	25
Slika 22.	Tok energije PTES-a u MWh 2017. godine [30] .....	25
Slika 23.	Prikaz kotlovnica, podstanica i distributivne mreže u Zaprešiću [34] .....	28
Slika 24.	Cijena solarnih kolektora postavljenih na zemlju po m <sup>2</sup> [39] .....	36
Slika 25.	Troškovi PTES-a u ovisnosti o volumenu [39] .....	36
Slika 26.	Cijena toplinske energije u Zaprešiću prema HEP-Toplinarstvu [38] .....	38
Slika 27.	Ovisnost IRR-a o trošku investicije za Scenarij 1 .....	40
Slika 28.	Ovisnost IRR-a o trošku investicije za Scenarij 2 .....	40
Slika 29.	Shematski prikaz postrojenja u prostoru [37].....	41
Slika 30.	Ovisnost IRR-a o cijeni toplinske energije za Scenarij 1 .....	42
Slika 31.	Ovisnost IRR-a o cijeni toplinske energije za Scenarij 2 .....	42



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Ostvarena smanjenja emisije 2017. i ciljevi do 2030. godine [5] .....	2
Tablica 2. Udio obnovljivih izvora energije 2020. godine i ciljevi za 2030. godinu [5] .....	3
Tablica 3. Tehničke karakteristike SCTS-a u Silkeborgu [22] .....	15
Tablica 4. Tehničke karakteristike PTES-a u Dunninglundu 2017. godine [25] .....	18
Tablica 5. Proizvodnja pojedinih dijelova CSTS-a za 2016. i 2017. godinu [30].....	22
Tablica 6. Podaci o toplinskom sustavu u Zaprešiću [34].....	29
Tablica 7. Ulazni parametri za F-easy .....	32
Tablica 8. Ulazni parametri uneseni u Sunstore 4 .....	34
Tablica 9. Izlazni podaci za Scenarij 1 .....	35
Tablica 10. Izlazni podaci za Scenarij 2 .....	35
Tablica 11. Troškovi investicije i godišnjeg rada za Scenarij 1 i 2 .....	37
Tablica 12. Ekonomski podaci .....	39
Tablica 13. IRR i NPV .....	39

## POPIS KRATICA

<b>Naziv kratice</b>	<b>Puni naziv</b>
ETS	Sustav trgovanja emisijskim jedinicama
OIE	Obnovljivi izvori energije
CTS	Centralizirani toplinski sustav
CSTS	Centralizirani solarni toplinski sustav
HERA	Hrvatska energetska regulativna agencija
TTS	Toplinski čelični spremnik
PTES	Toplinski spremnik u obliku izolirane jame
BTES	Toplinski spremnik u obliku bušotine
ATES	Toplinski spremnik u obliku vodonosnika
COP	Koeficijent grijanja dizalice topline
HEP	Hrvatska elektroprivreda
ZTS	Zatvoreni toplinski sustav
STS	Samostani toplinski sustav
ORC	Organski Rankineov ciklus
LCOH	Nivelirani trošak toplinske energije
NPV	Neto sadašnja vrijednost novca
IRR	Unutarnja stopa povrata
PTV	Potrošna topla voda

## SAŽETAK

Put prema čistoj energiji u svijetu i Europi vodi na prelazak s tradicionalnih izvora energije na obnovljive izvore energije. U Europi u sektoru zgradarstva troši se oko 40% finalne energije i emitira 36% stakleničkih plinova. Za grijanje zgrada i pripremu potrošne tople vode kao najbolje rješenje pokazuje se centralizirani toplinski sustav te je cilj u takve sustave implementirati obnovljive izvore energije. U ovom radu napravljena je analiza centraliziranog solarnog toplinskog sustava u Danskoj te kao primjer takovog sustava detaljna analiza rada centraliziranog solarnog toplinskog sustava u gradu Gramu. Pokazano je kako je moguće skladištiti Sunčevu energiju preko ljeta i koristi je zimi uz pomoć solarnih kolektora, sezonskog toplinskog spremnika i dizalice topline.

Drugi dio rada temelji se na implementaciji takovog sustava u gradu Zaprešiću. Prvo je napravljena analiza postojećeg stanja, a zatim tehno-ekonomska analiza budućeg centraliziranog solarnog toplinskog sustava pomoću alata F-easy i Sunstore 4 Feasibility Evaluation alata. Napravljena je analiza za 2 moguća scenarija i odabran je sustav koji uključuje polje solarnih kolektora, sezonski spremnik topline, kotao na biomasu i dizalicu topline. Na kraju je pokazan utjecaj promjene investicijskih troškova i cijene toplinske energije na isplativost ovakvog projekta.

Ključne riječi: centralizirani solarni toplinski sustav, Gram, solarni kolektori, toplinski spremnik, dizalica topline, Zaprešić, tehno-ekonomska analiza

## **SUMMARY**

On the way to clean energy in the world and Europe, we have to switch from traditional energy sources to renewable ones. Building sector is the largest energy consumers, accounting for 40% of final energy consumption and 36% of greenhouse gas emissions in Europe. A centralized heating system is proving to be the best solution for heating and hot water preparation, and the goal is to implement renewable energy sources in such systems. In the proposed thesis, an analysis of the solar district heating system in Denmark is made, and as an example of such a system, a detailed analysis of the operation of the centralized solar district heating system in the city of Gram is made. It has been shown that it is possible to store solar energy over the summer and use it in the winter with the help of solar collectors, a seasonal heat storage tank and a heat pump.

The second part of the thesis is about the implementation of such a system in Zaprešić. First, an analysis of the current situation was made, followed by a techno-economic analysis of the future centralized solar district heating system using the F-easy tool and the Sunstore 4 Feasibility Evaluation Tool. A comparison of the two scenarios was conducted, and the second scenario was selected as optimal, which includes a solar collector field, a seasonal heat storage, biomass boiler, and a heat pump. Finally, the impact of changes in investment costs and heat prices on the profitability of such a project is shown.

Key words: solar district heating, Gram, solar collectors, seasonal heat storage, heat pump, Zaprešić, techno-economic analysis

## 1. UVOD

Globalno zatopljenje postalo je jedan od većih problema današnjeg društva. Klimatske promjene koje se događaju su posljedica djelovanja ljudi i modernog načina života. Najveći problem predstavlja zagađenje koje nastaje izgaranjem fosilnih goriva. Hrvatska se kao članica Europske unije obvezala da će provoditi mjere za usporavanje klimatskih promjena. U prosincu 2015. godine postignut je Pariški sporazum kojim su se države obvezale da će zajedničkim djelovanjem smanjivati emisije stakleničkih plinova s ciljem ograničavanja porasta prosječne globalne temperature do najviše 2°C do kraja stoljeća, a ukoliko bude moguće do 1.5°C. Ostvarenje toga cilja moguće je ako se do 2030. godine uspoređujući s 1990. godinom postigne smanjenje emisije stakleničkih plinova od 40%, poveća udio obnovljivih izvora energije na 27% te se poveća energetska učinkovitost za 30% [1]. Cilj za 2050. godinu je bio smanjenje emisija od 80% do 95% što je prikazano na Slika 1. [2].



**Slika 1. Ciljevi smanjenja emisija stakleničkih plinova Europske unije do 2050. godine. [2]**

U narednim godinama doneseni su novi paketi mjera kako bi se postigli ciljevi iz Pariškog sporazuma. U paketu mjera Čista energija za sve Europljane („Clean energy for all Europeans“) donesenom u svibnju 2019. cilj za smanjenje emisije stakleničkih plinova do 2030. godine ostao je 40% dok se cilj za udio obnovljivih izvora energije povećao na najmanje 32% te se želi povećati energetska učinkovitost na 32,5%. Povećanje energetske učinkovitosti najviše se očekuje u sektoru zgradarstva jer se u Europi u tom sektoru troši oko 40% finalne energije i emitira 36% stakleničkih plinova [3]. Daljnje povećanje ciljeva bilo je u prosincu 2020. godine kada je kao cilj postavljeno smanjenja emisija stakleničkih plinova

do 2030. godine od 55% u odnosu na 1990 godinu te se očekuje da Europska unija bude klimatski neutralna do 2050. godine što znači postizanje gotovo 100 postotne proizvodnje energije iz obnovljivih izvora [4]. Plan do 2050. godine je jako ambiciozan te je malo vjerojatno da će biti ostvaren, ali ako se cilj postavi jako visoko veće su šanse da će se doći bliže zacrtanom cilju.

### 1.1. Hrvatski klimatski plan

Hrvatska dijeli zajedničke klimatske ciljeve s Europskom unijom i to je potvrdila ratifikacijom pariškog sporazuma 2017. godine. Cilj smanjenja emisija stakleničkih plinova podijeljen je u dva dijela do 2030. godine:

- za Sustav trgovanja emisijskim jedinicama (eng. Emissions Trading System - ETS) : najmanje za 43 % u odnosu na razinu iz 2005. godine
- za sektore izvan ETS-a: najmanje za 7 % u odnosu na razinu iz 2005. godine

ETS sektor obuhvaća velike izvore emisija stakleničkih plinova koji su obveznici europskog sustava trgovanja emisijskim jedinicama dok su ostali izvori izvan ETS-a i obuhvaćaju manje izvore emisije, kao što su: cestovni i van cestovni promet (osim zračnog prometa koji je uključen u ETS sektor), mala energetska i industrijska postrojenja koja nisu uključena u ETS sektor, kućanstva, usluge, poljoprivredu, gospodarenje otpadom, promjene u korištenju zemljišta i šumarstvo. To je prikazano u Tablica 1. [5].

Tablica 1. Ostvarena smanjenja emisije 2017. i ciljevi do 2030. godine [5]

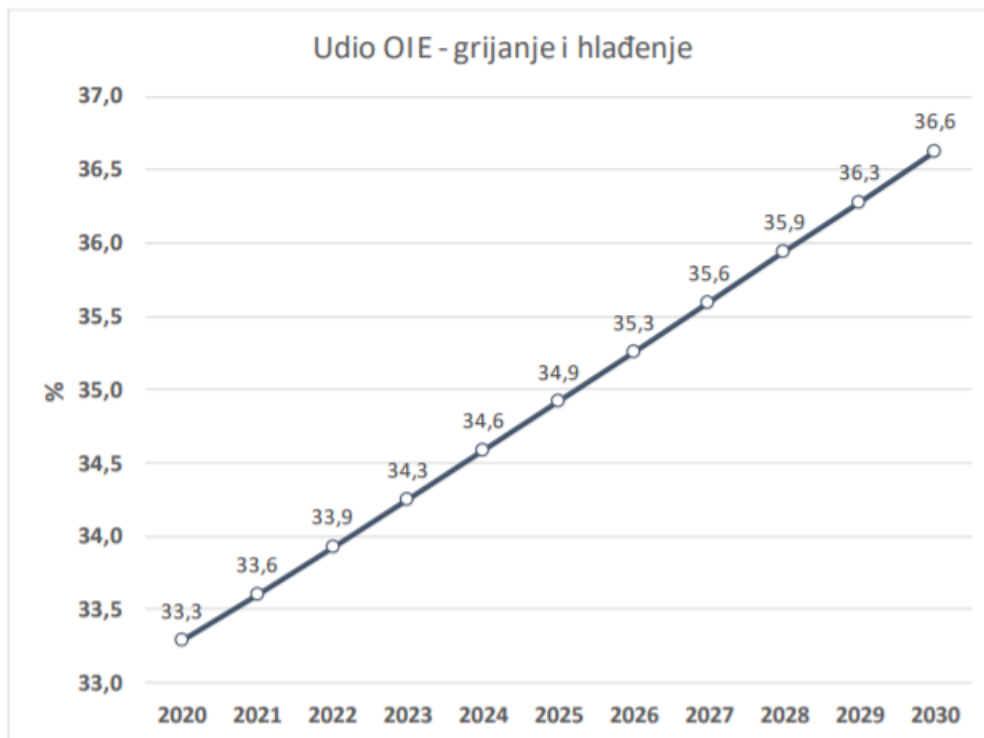
Opseg	Emisije stakleničkih plinova u 2005. (kt CO <sub>2</sub> e)	Ostvareno smanjenje emisija 2017. u odnosu na 2005.	Cilj za razdoblje od 2013.-2020. u odnosu na 2005.	Cilj za razdoblje od 2021.-2030. u odnosu na 2005.
ETS sektor	10 649	-21,4 %	-21 % (cilj za cijelu EU)	-43 % (cilj za cijelu EU)
Sektori izvan ETS-a	17 404	-4,2 %	-10 % (cilj za cijelu EU) +11 % (cilj za RH)	-30 % (cilj za cijelu EU) -7 % (cilj za RH)

### 1.1.1. Ciljevi za obnovljive izvore energije

**Tablica 2. Udio obnovljivih izvora energije 2020. godine i ciljevi za 2030. godinu [5]**

Udio OIE, %	Projekcije 2020.	Ciljevi 2030.
U bruto neposrednoj potrošnji energije	28,6	36,4
U bruto neposrednoj potrošnji električne energije	47,0	63,8
U bruto neposrednoj potrošnji energije za grijanje i hlađenje	33,3	36,6
U neposrednoj potrošnji energije u prometu	5,2	13,2

U Tablica 2. vidi se da je cilj za 2030. godinu postići udio obnovljivih izvora energije od 36,4% . Najveći dio toga želi se postići povećanjem udjela u potrošnji električne energije. Povećanje udjela za potrošnju energije za grijanje i hlađenje s 33,3% na 36,6% također nije zanemariv. Na Slika 2. vidljiva je procjena rasta udjela OIE u sektoru grijanja i hlađenja do 2030. godine [5]. Na putu k tome cilju stoji obnova i unaprjeđenje postojećih centraliziranih toplinskih sustava (CTS) te dodatak obnovljivih izvora energije postojećim sustavima te izgradnja novih CTS-a. Jedan od mogućih izbora je i centralizirani solarni toplinski sustav (CSTS) koji je detaljnije opisan u ovom radu.



Slika 2. Procjena rasta OIE za grijanje i hlađenje do 2030. godine [5]

## 1.2. Cilj rada

Cilj rada napraviti je detaljnu analizu CSTS-a u gradu Gramu u Danskoj. Opisan je rad postrojenja i njegovih dijelova s naglaskom na rad solarnih kolektora i sezonskog spremnika topline te je provedena tehno-ekonomska analiza i pokazana primjenjivost takvog sustava u gradu Zaprešiću.

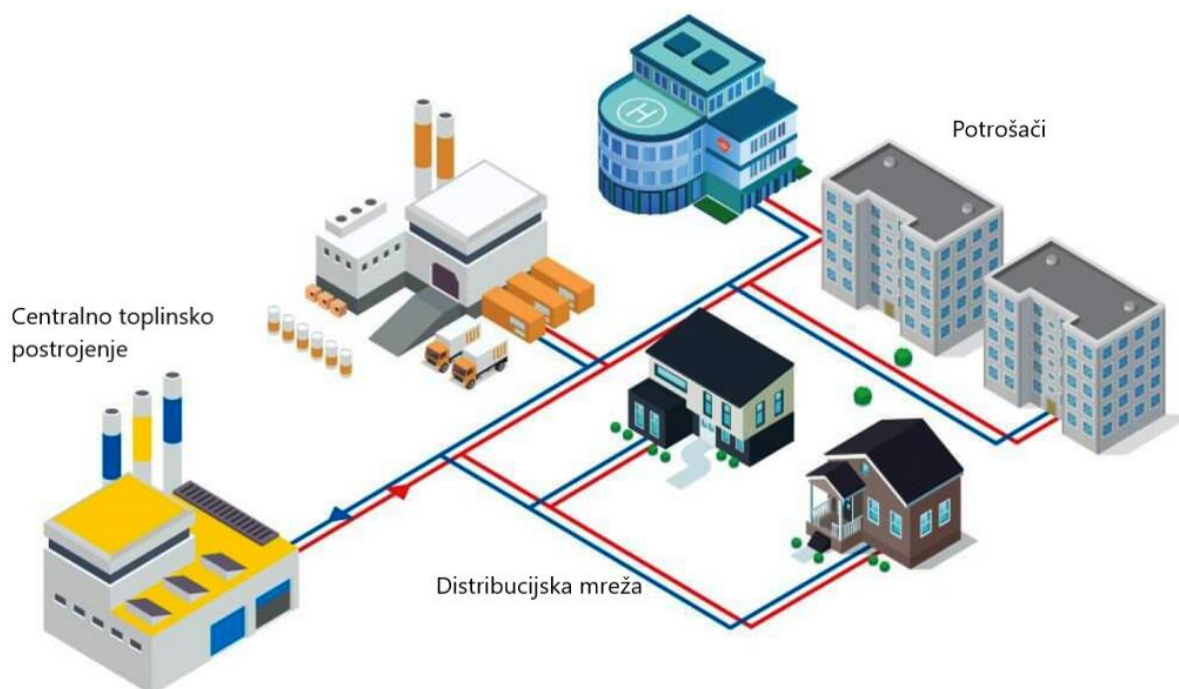


## 2. Centralizirani toplinski sustav (CTS)

Toplinska energija u CTS-u distribuira se preko vruće vode ili pomoću vodene pare iz centralnog izvora krajnjim potrošačima za zagrijavanje prostora, zagrijavanje potrošne tople vode, kuhanje i drugo. Distribucija toplinske energije vrši se mrežom cjevovoda, a prilikom same distribucije koriste se toplinske podstanice u kojima toplinska energija sa medija prijenosnika u CTS-u prelazi na medij prijenosnik u samoj zgradi. CTS pogodno je koristiti u područjima koja su gušće naseljena i gdje je godišnja potreba za toplinskom energijom velika. Ovo je bitno jer troškovi distribucijske mreže i toplinskih podstanica iznose oko 50% ukupne investicije što CTS čini pogodnim za postavljanje u urbanim sredinama, gusto naseljenim naseljima i velikim zgradama [6].

CTS se sastoji od 3 glavne sastavnice:

- Centralnog toplinskog postrojenja
- Mreže cjevovoda
- Potrošača topline



Slika 3. Shema CTS-a [7]

## 2.1. Razvoj centraliziranog toplinskog sustava

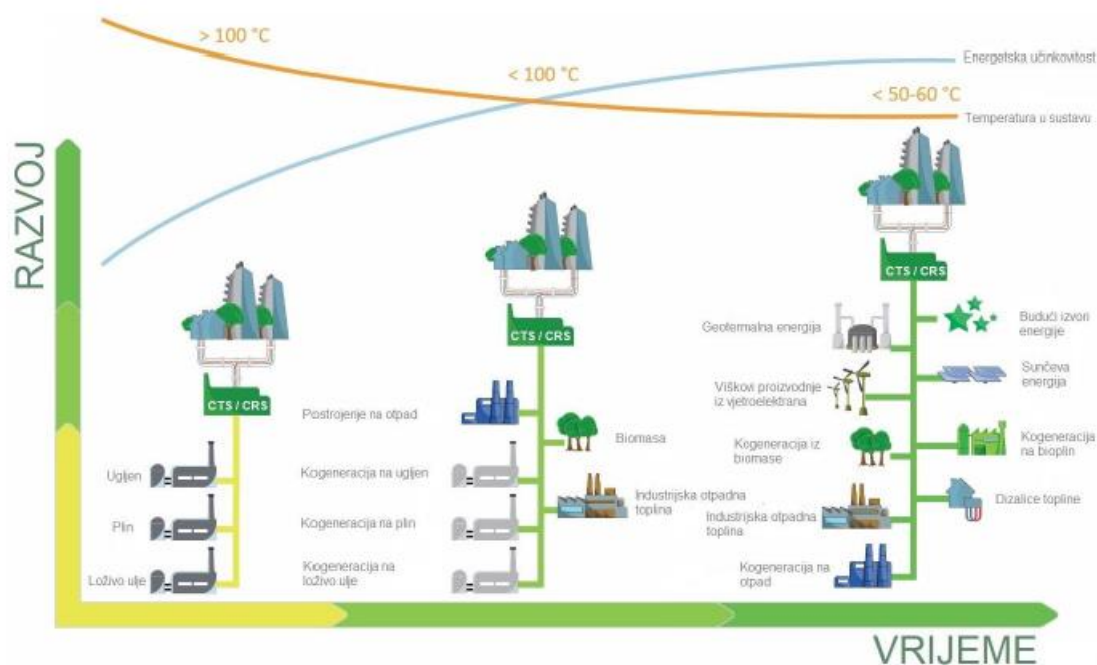
Razvoj CTS-a može se podijeliti na 4 generacije:

- Prva generacija razvila se 1880.-ih u SAD-u i koristila se vodena para kao nositelj topline (radni medij). Sustav se sastojao od betonskih kanala u kojim su parovodi, parne brtve i kompenzatori. Danas su takvi sustavi zastarjeli zbog visoke temperature vodene pare koja generira velike energetske gubitke te se dogodilo nekoliko eksplozija takvih sustava u kojima su nastradali pješaci. Još postoje mjesta gdje se i dalje koriste ovakvi sustavi, a to je Manhattan u New Yorku i neki stari dijelovi Pariza [8].
- Druga generacija kao radni medij koristi vodu na temperaturama iznad 100 °C. Ovakva vrsta CTS-a nastala je u 30-tim godinama 20-og stoljeća i održala se do 70-tih. Tipične komponente ovakvih sustava su betonski kanali s vrelovodima, izmjenjivačima topline i velikim ventilima. Veliki Sovjetski sustavi grijanja bili su u ovoj generaciji, ali su bili loše kvalitete i teško ih je bilo kontrolirati. Van Sovjetskog Saveza kvaliteta je bila bolja te se i danas mogu pronaći u velikim vodenim sustavima grijanja [8].
- Treća generacija od 70-tih godina pa nadalje također koristi vodu pod tlakom kao nositelja topline, ali na temperaturama ispod 100 °C. Ova generacija se još naziva „Skandinavska tehnologija CTS-a“ jer su dobavljači opreme većinom skandinavske zemlje. Klasične komponente sustava su unaprijed napravljene i izolirane cijevi koje su spremne za direktno postavljanje u zemlju. Razvijena je kao zamjena za sve sustave CTS-a i Centralnoj i Istočnoj Europi te u bivšim zemljama Sovjetskog Saveza. U ovoj generaciji se raširila upotreba kogeneracijskih postrojenja te mali broj postrojenja na solarnu i geotermalnu energiju [8].

Prve tri generacije CTS-a kao cilj napretka imale su smanjenje troškova investicije i smanjenje cijene toplinske energije. Također su težile smanjenju prostora koje zauzima oprema te povećanju učinkovitosti sustava, povećavanju životnog vijeka opreme i smanjenju rizika od požara. Sve ove težnje pretočene su u buduću 4. generaciju CTS-a. Većina CTS-a trenutna radi kao CTS 3. generacije s težnjom prelaska na 4. generaciju koja će se bazirati na obnovljivim izvorima energije [9].

- Četvrta generacija bazira se na najmodernijim tehnologijama i velikom udjelu obnovljivih izvora energije te na manjim temperaturama polaza i povrata nositelja

topline (vode). Da bi se to postiglo potrebno je obnoviti i modernizirati trenutne toplovođe te integrirati sustav proizvodnje toplinske i električne energije. CTS postaje dio pametnog energetskeg sustava koji objedinjuje električnu energiju, plin, grijanje, hlađenje te transport u kojem će svaki od sektora biti ovisan jedan o drugom te biti maksimalno učinkovit. Izvori energije su kogeneracijska postrojenja, višak topline iz industrijske proizvodnje, geotermalna energija, solarna toplinska energija te energija dobivena pomoću dizalica topline i električnih kotlova [9]. Krajnji cilj je nadogradnja sustava na način da im se poveća energetska učinkovitost te da se emisije svedu na nulte ili blizu nultih razina te da se na taj način smanji utjecaj globalnog zatopljenja [10].



Slika 4. Razvoj CTS-a s vremenom [10]

## 2.2. Centralizirani toplinski sustav u Hrvatskoj

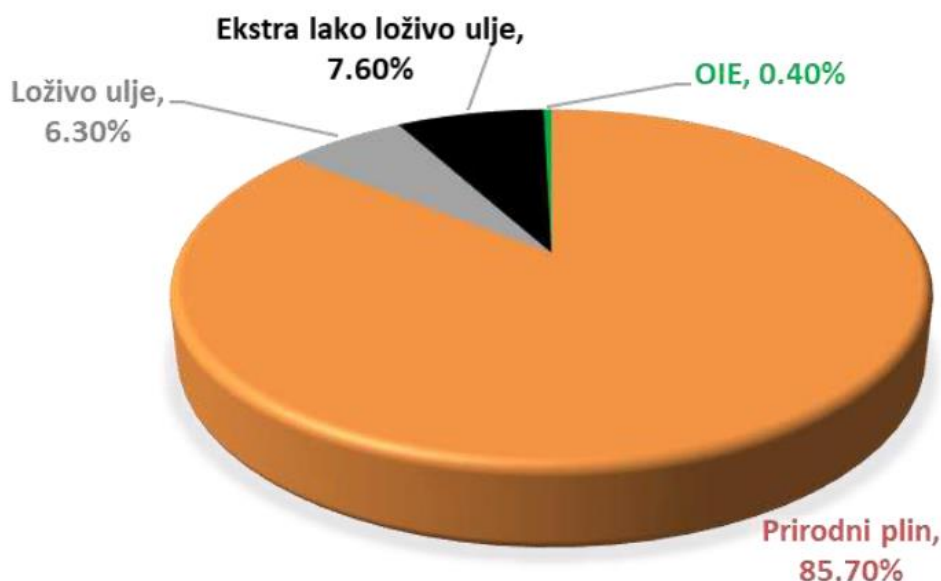
CTS u Hrvatskoj pokriva oko 15% ukupne proizvodnje toplinske energije s različitim vrstama i veličinama CTS-a. Hrvatska energetska regulativna agencija (HERA) broji oko 110 CTS-a u Hrvatskoj te je većina u vlasništvu javnih tvrtki [11]. U 2019. postojalo je 11 tvrtki u 16 gradova u Hrvatskoj koje su se bavile proizvodnjom, distribucijom i opskrbom toplinske energije što je prikazano na Slika 5. [12].



**Slika 5. Prikaz gradova u Hrvatskoj u kojima postoje toplinski sustavi [12]**

Centralizirani toplinski sustavi razvijeni su u većim gradovima kontinentalne Hrvatske i Rijeci te pružaju uslugu grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode za oko 157 000 kupaca od kojih 95% pripada kategoriji kućanstava. U Zagrebu, Sisku i Osijeku toplinska energija se proizvodi u kogeneracijskim postrojenjima, a u ostalim gradovima mini toplanama, blokovskim i kućnim kotlovnica za pojedina naselja. Distribucija toplinske energije vrši se vrelovodima, toplovodima i parovodima ukupne duljine oko 440 km. U Zagrebu, Sisku i Osijeku također se proizvodi i tehnološka para za potrebe industrije te dijelom za grijanje prostora. U 2019. godini u Republici Hrvatskoj isporučeno je oko 1,95 TWh toplinske energije [12].

## ENERGETSKA BILANCA U CTS U RH



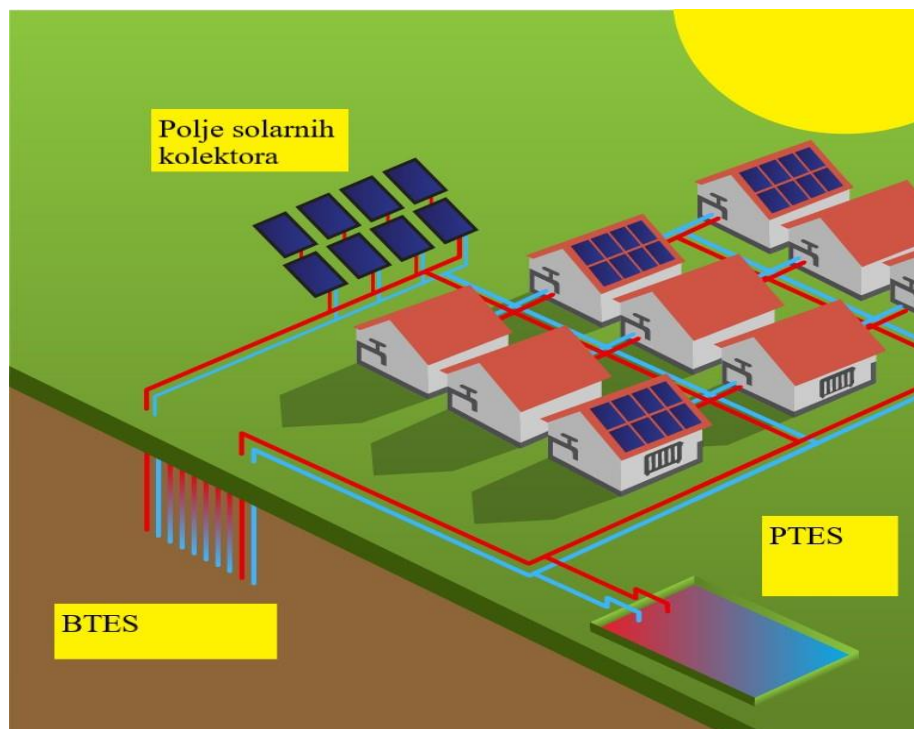
Slika 6. Energetska bilanca u CTS u Hrvatskoj [11]

Iz dijagrama na Slika 6. vidi se da je udio obnovljivih izvora energije u CTS-u samo 0,40% te je u zakonodavnom okviru za razdoblje 2021. do 2025. godine predviđeno povećanje na 1%. Donesene su mjere za povećanje učinkovitosti CTS-a te potpora visokoučinkovitoj kogeneraciji i obnovljivim izvorima energije. Kao jedno od rješenja preporučuje se integracija solarne energije u CTS [11].

### 2.3. Centralizirani solarni toplinski sustav (CSTS)

CSTS postrojenja sastoje se od solarnih kolektora koji prikupljaju Sunčevu energiju te ju preko radnog medija koji se zagrijava u kolektorima distribuiraju dalje u mrežu ili skladište u spremnike topline koji mogu biti dnevni ili sezonski. Slika 7. prikazuje shemu CSTS-a sa sezonskim spremnicima (PTES i BTES koji su prikazani u odlomku 2.3.2). Za vrijeme toplih mjeseci moguće je pokriti sve potrebe za toplinskom energijom iz solarnih kolektora dok se u zimskom mjesecima koristi energija iz sezonskog spremnika te energija iz nekog drugog izvora. Solarni kolektori mogu biti smješteni na krovovima zgrada ili kao samostalna polja solarnih kolektora. Udio solarne toplinske energije (solarne frakcije) u CSTS-u kreće se između 10% i 50%. Većinom se instaliraju u manjim gradovima od 1 000 do 10 000 stanovnika koji imaju slobodnu površinu za polja kolektora i već postojeću mrežu CTS-a.

Bez sezonskog spremnika solarnom toplinskom energijom moguće je pokriti od 10% do 30% potreba, a sa sezonskim spremnikom i do 100% što je rijedak slučaj danas, ali u budućnosti se očekuje više takvih sustava [13].

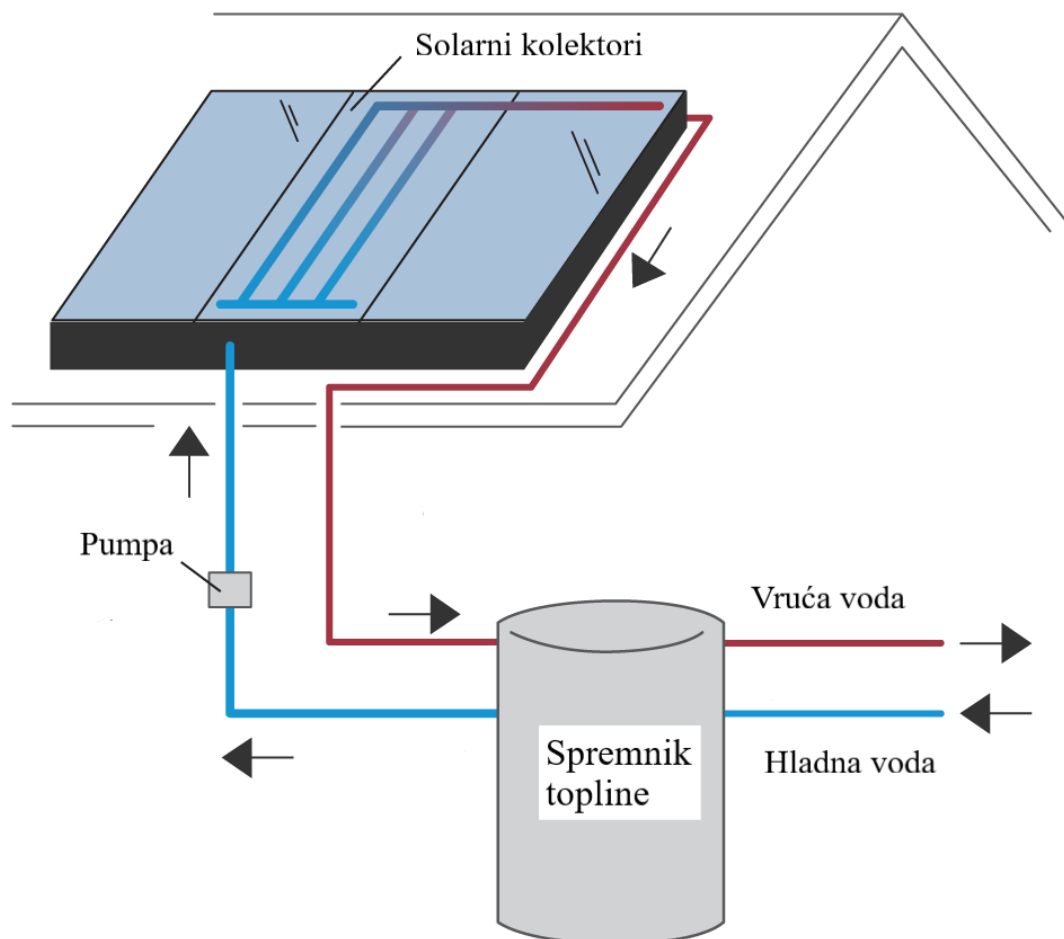


Slika 7. Shematski prikaz SCTS-a [14]

### 2.3.1. Solarni kolektori

Solarni kolektori primaju Sunčevo zračenje i apsorbiranu toplinu, pomoću solarne crpke, distribuiraju u mrežu ili sezonski spremnik topline. Postoje izvedbe i za male sustave kao što su obiteljske kuće ili vikendice gdje se koriste primarno za pripremu potrošne tople vode (Slika 8). Osnovne izvedbe su: ravni pločasti kolektor i cijevni vakumski kolektor [15]. U CSTS-u se najčešće koriste ravni pločasti kolektori.

### Jednostavna shema pripreme potrošne tople vode



Slika 8. Jednostavna shema pripreme potrošne tople vode iz solarnih kolektora [16]

#### 2.3.2. Sezonski spremnici topline

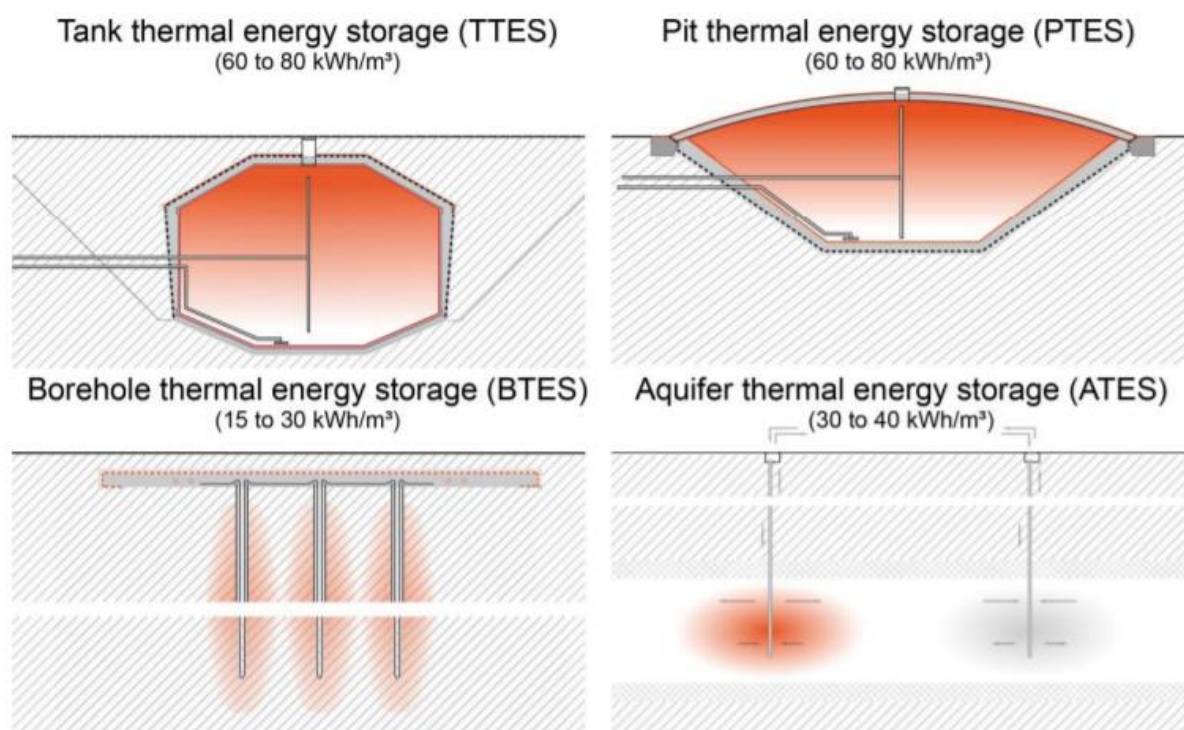
Postizanje solarne frakcije veće od 30% u CSTS-u moguće je samo korištenjem sezonskih spremnika topline. U njima se za vrijeme toplih mjeseci skladišti višak toplinske energije koja se koristi kasnije kad izostane Sunčevog zračenja. Sezonski spremnici topline imaju još neke funkcije:

- Spremanje viška topline iz industrijskih postrojenja, elektrana i geotermalnih postrojenja te topline nastale pri spaljivanju otpada
- Pomaže u optimizaciji kogeneracijskih postrojenja
- Spremnik za sustave s dizalicama topline

- Spremnik topline za sustave s različitim izvorima topline

Dijele se na 4 tipa spremnika za temperature ispod 95 °C:

- Toplinski čelični spremnik (eng. Tank Thermal Energy Storage - TTES)
- Toplinski spremnik u obliku izolirane jame (eng. Pit Thermal Energy Storage - PTES)
- Toplinski spremnik u obliku bušotine (eng. Borehole Thermal Energy Storage - BTES)
- Toplinski spremnik u obliku vodonosnika (eng. Aquifer Thermal Energy Storage - ATES) [17]



**Slika 9.** Tipovi sezonskih spremnika topline [17]

PTES je najkorišteniji sezonski spremnik zbog svoje jednostavnosti. Možemo ga zamisliti kao veliku jamu iskopanu u zemlji pa je relativno jeftin za postavljanje. Nedostatak mu je što se pri temperaturama od 90 °C stupnjeva i više oštećuje izolacijski materijal te se tako smanjuje životni vijek spremnika. Tu ostaje prostor za napredak u budućnosti za ovaj tip spremnika [17].



## 2.4. Centralizirani solarni toplinski sustav u Hrvatskoj

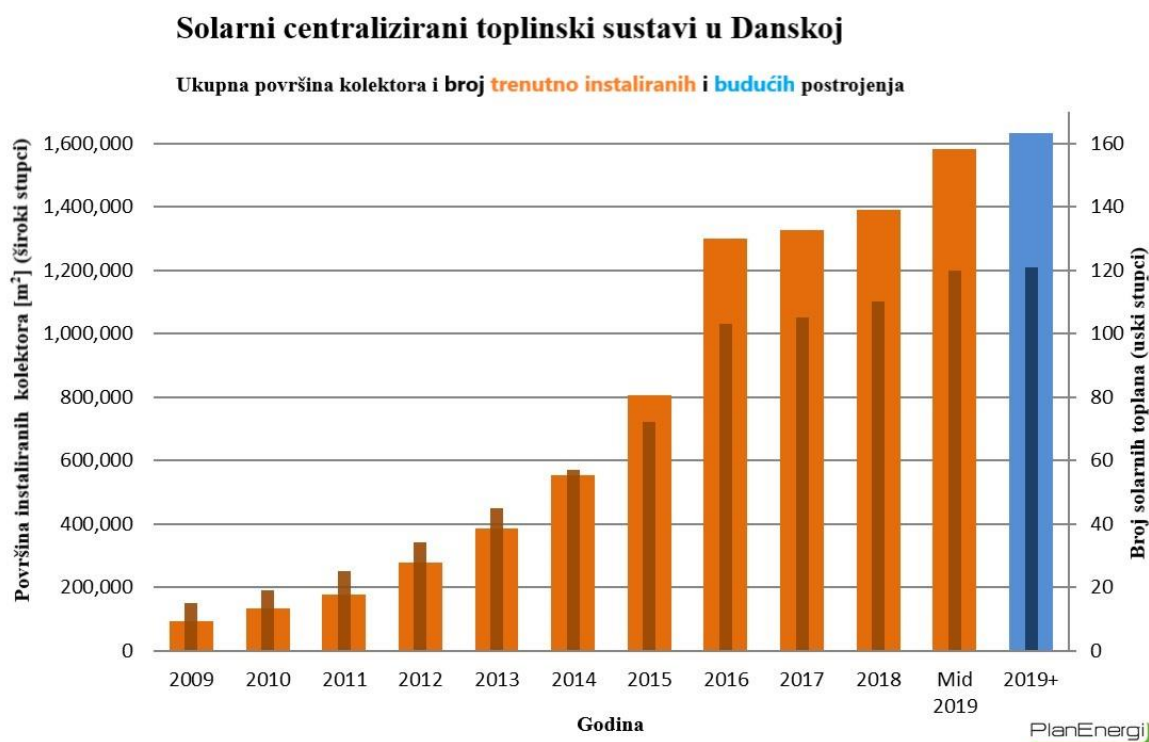
Prva solarna toplana u Hrvatskoj puštena je u pogon 2019. godine u Vukovaru. U dvije faze izgradnje postavljeno je 320 solarnih kolektora, kad projekt bude dovršen planirano je 566 solarnih kolektora ukupne površine 1200 m<sup>2</sup>. Procjenjuje se da će se zahvaljujući zamjeni prirodnog plina Sunčevom energijom za proizvodnju topline za grijanje i pripremu potrošne tople vode u toplinarskom sustavu naselja na koji je priključeno oko 2000 potrošača ulaganja u solarnu toplanu biti vraćena za 6 do 8 godina [18].



Slika 10. Polje solarnih kolektora u Vukovaru [18]

### 3. Centralizirani solarni toplinski sustav u Danskoj

Danska vlada donijela je odluku da će do 2050. godine prestati s uporabom fosilnih goriva što znači da će sve potrebe za energijom pokrivati iz obnovljivih izvora. Od uvođenja poreza na prirodni plin centralizirani solarni toplinski sustavi cijenom su postali ravnopravni sa sustavima koji kao gorivo koriste prirodni plin. Danska više od 64% toplinske energije za kućanstva pokriva iz centraliziranih toplinskih sustava što olakšava prelazak na CSTS jer je sustav opskrbe već izgrađen [19]. Do 2019. u Danskoj je izgrađeno blizu 1,6 milijuna kvadratnih metara solarnih kolektora u CTS-u. Također je instalirano više od 120 velikih solarnih toplana te je u obje te kategorije Danska vodeća u svijetu [20].



Slika 11. CSTS u Danskoj prema površini solarnih kolektora i broju instaliranih toplana [20]

Prema Slika 11. vidi se nagli porast solarnih elektrana i površine instaliranih solarnih kolektora od 2016. godine te je planiran rast i u budućnosti. Ako je plan ispunjen u 2021. godini broj solarnih elektrana je veći od 120 te je površina solarnih kolektora veća od 1,7 milijuna kvadratnih metara.

### 3.1. Primjeri centraliziranog solarnog toplinskog sustava u Danskoj

U Danskoj se nalaze najveće svjetske solarne toplane s centraliziranim toplinskim sustavom.

U gradu Silkeborgu najveća je na svijetu dok je u Vojensu solarna toplana s najvećim sezonskim spremnikom topline na svijetu. Tu se još može dodati solarna toplana u Dronninglundu te u Gramu koja je detaljnije opisana.

#### 3.1.1. Silkeborg

Silkeborg, grad s 44 tisuće stanovnika može se pohvaliti s najvećom svjetskom solarnom toplanom. Toplana se sastoji od polja solarnih kolektora ukupne površine 156 694 metara kvadratnih s ukupnom godišnjom proizvodnjom topline od 80 GWh čime se opskrbljuje 4,4 tisuće kućanstava ili 20% od ukupnog broja kućanstava. Toplana se prostire na ukupno 50 hektara površine i ima 4 spremnika topline volumena 16 tisuća metara kubnih [21].

**Tablica 3. Tehničke karakteristike SCTS-a u Silkeborgu [22]**

Lokacija	Silkeborg, Danska
Ukupna površina	156 700 m <sup>2</sup>
Broj kolektora	12 436
Spremnici topline	4 x 16 000 m <sup>3</sup>
Ukupna snaga kolektora	110 MW
Ukupna toplinska energija	80 GWh
Postotak solarne energije	20%
Ušteda CO <sub>2</sub>	15 000 tona/godišnje
Očekivani životni vijek	Minimalno 25 godina
Godina izgradnje	2016
Broj kućanstava	22 000
Dodatni izvor energije	Prirodni plin
Radna temperatura (ljeti)	82°C/47°C
Radna temperatura (zimi)	47°C/12°C
Dužina cjevovoda	22 km (300 km cijela mreža)

Zanimljivo je pratiti promjenu temperature vode u solarnim kolektorima koja se kreće od 82 °C ljeti do 12°C zimi što je prikazano u Tablica 3. Dodatni izvor energije za pogon postrojenja je prirodni plin kao manji zagađivač među fosilnim gorivima. Ušteda na emisijama CO<sub>2</sub> iznosi 15 000 tona godinje [22].



**Slika 12. Polje solarnih kolektora u Silkeborgu [21]**

### **3.1.2. Vojens**

Površina solarnih kolektora u Vojensu je 70 tisuća metara kvadratnih. Najveći sezonski spremnik topline na svijetu volumena 200 tisuća metara kubnih. Godišnja proizvodnja toplinske energije je 28 GWh što pokriva 45% potreba ovog malog grada od 7 655 stanovnika. Ostali dijelovi postrojenja su: 3 plinska motora, 10 MW električni kotao, dizalica topline i plinski kotao [23].



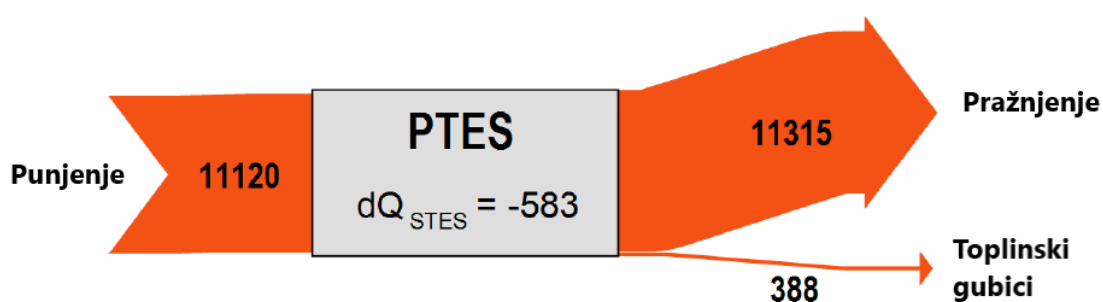
**Slika 13. Polje kolektora i sezonski spremnik u Vojensu [23]**

### 3.1.3. Dronninglund



Slika 14. Solarni kolektori u Dronninglundu [24]

Solarna toplana površine kolektora 37 573 metara kvadratnih sa sezonskim toplinskim spremnikom volumena 62 tisuće metara kubnih. Godišnja proizvodnja toplinske energije je 18 GWh i pokriva oko 40% ukupnih potreba grada za toplinskom energijom [24].



Slika 15. Tok energije PTES-a u Dronninglundu u MWh 2017 godine [25]

Iz dijagrama na Slika 15. vidi se da je u sezonski toplinski spremnik 2017. godine pohranjeno 11 120 MWh toplinske energije dok je potrošeno 11 315 MWh. Veća potrošnja nego što je pohranjeno moguća je samo zbog dizalica topline. Vidimo da je i unutrašnja energija

spremnika ( $dQ_{STES}$ ) negativna što pokazuje da je više energije odvedeno iz spremnika nego što je dovedeno.

U Tablica 4. prikazani su još neki tehnički podaci o sezonskom spremniku u Drunninglundu koje će se kasnije koristiti za usporedbu sa spremnikom u Gramu. Spremnik je isto PTES kao u Gramu.

**Tablica 4. Tehničke karakteristike PTES-a u Dunninglundu 2017. godine [25]**

Toplina unesena u PTES	MWh	11 120
Toplina odvedena iz PTES	MWh	11 315
Promjena unutarnje energije	MWh	-583
Toplinski gubitci PTES	MWh	388
Učinkovitost PTES-a	%	96
Broj ciklusa punjenja		2,2
Maksimalna temperatura	°C	84
Minimalna temperatura	°C	9
Korišteni toplinski kapacitet PTES-a	MWh	5202

Učinkovitost PTES-a od 96% čini se nevjerojatna, ali je moguća jer je je više topline odvedeno iz spremnika nego je dovedeno što je posljedica korištenja dizalice topline. To je nešto više od projektirane učinkovitosti koja je 90% i prijašnjih godina kretala se oko te vrijednosti [25].

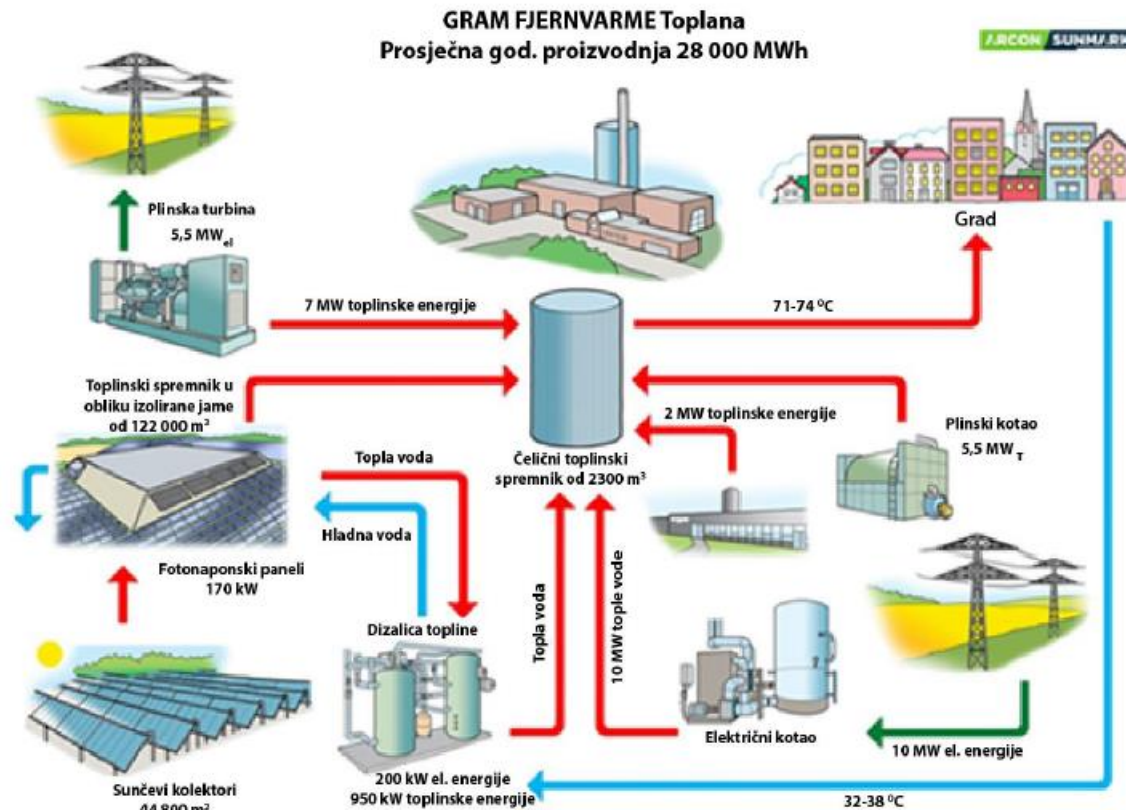
## 4. Gram

Gram je danski gradić koji broji 2 549 stanovnika [26]. U gradu se nalazi jedan od najmodernijih svjetskih centraliziranih toplinskih sustava. Do 2009. godine sustav se bazirao na kogeneracijskom postrojenju i dva kotla na prirodni plin. Za pogon kogeneracijskog postrojenja koristi se plinski motor snage 5,5 MW kojemu je pri proizvodnji toplinske energije učinkovitost 50%, a pri proizvodnji električne energije učinkovitost 41,2%. Snaga kotlova zajedno je bila 10 MW [27]. Sadašnje postrojenje sastoji se od već postojećih sastavnica i polja solarnih kolektora koji su postavljeni u 2 navrata 2009. i 2015. godine. Tu je također i dnevni čelični spremnik topline volumena 2300 metara kubnih i sezonski spremnik topline volumena 122 000 metara kubnih. U sustavu još je dizalica topline, električni kotao snage 10 MW i od 2016. godine susjedna tvornica tepiha. Očekuje se da će tvornica imati oko 2 MWh viška topline tokom proizvodnje koja će ući u sustav. Godišnja proizvodnja CTS-a je oko 28 000 MWh toplinske energije i opskrbljuje oko 1200 potrošača [28].



**Slika 16. Polje solarnih kolektora sa sezonskim spremnikom u Gamu [29]**

Treba napomenuti kako je toplana u vlasništvu potrošača i neprofitna je što znatno smanjuje cijenu toplinske energije. Na ovaj način radi većina solarnih centraliziranih sustava u Danskoj te dijeljenjem znanja i informacija postižu i niže investicijske troškove [20].



Slika 17. Shema toplane u Gramu [28]

## 4.1. Opis dijelova

### 4.1.1. Dizalica topline

Dizalica topline pogoni se električnom energijom iz mreže. Jedna funkcija dizalice topline je dodatno zagrijavanje vode iz sezonskog spremnika što omogućuje rad solarnih kolektora na nižoj temperaturi, a druga je da dodatno hladi povratnu vodu u ljetnim mjesecima kada se zagrijava voda u sezonskom spremniku. Hladna voda ide u donji dio spremnika. Hlađenjem donjeg dijela spremnika povećava se broj sati efektivnog rada solarnih kolektora te se tako povećava korisnost sustava [27]. Ovim hlađenjem također se olakšava optimizacija sustava solarnih panela, električnih kotlova i dizalice topline.

### 4.1.2. Solarni kolektori

U prvoj fazi izgradnje 2009. godine postavljeno je 10 073 metara kvadratnih što je moglo zadovoljiti oko 15% toplinskih potreba. Bili su spojeni na dnevni spremnik topline koji je već bio dio postrojenja. U drugoj fazi 2015. godine postavljeno je dodatnih 34 727 metara kvadratnih koji su spojeni na novi sezonski spremnik iskopan također u to vrijeme. To ukupno daje površinu 44 800 metara kvadratnih solarnih kolektora. Ukupan broj kolektora je

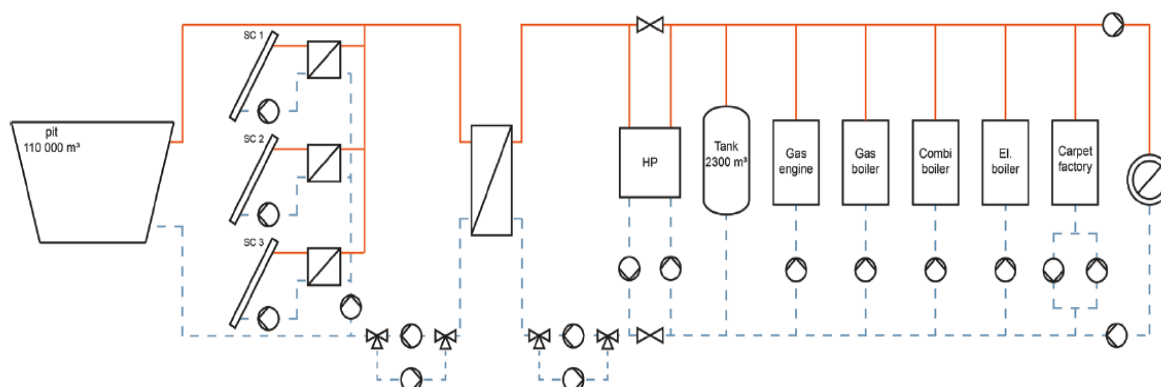


3 556, ukupne snage 31 MW i očekuje se da će pokriti 60% potreba za toplinskom energijom i smanjiti emisiju CO<sub>2</sub> za 3 700 tona godišnje [28].

#### 4.1.3. Sezonski spremnik topline

Sezonski spremnik topline izgrađen je u zadnjim radovima 2015. godine i zauzima 122 000 m<sup>3</sup>. Spremnik je u obliku izolirane jame (eng. Pit Thermal Energy Storage – PTES) dimenzija 110x125 m i dubine 16.5 m [28]. Prilikom iskopa višak zemlje je iskorišten za gradnju nasipa oko spremnika te se tako smanjila dubina kopanja. U ljetnim mjesecima maksimalna temperatura vode je 85 °C dok se preko zime spušta do 10 °C [27]. Na sunčanoj stani nasipa se nalaze solarni paneli snage 171 kW koji služe za proizvodnju električne energije za pogon pumpi [28].

## 4.2. Opis rada toplane



**Slika 18. Shema rada CSTS-a u Gramu (pit-sezonski spremnik; SC-solarni kolektori; HP-dizalica topline) [30]**

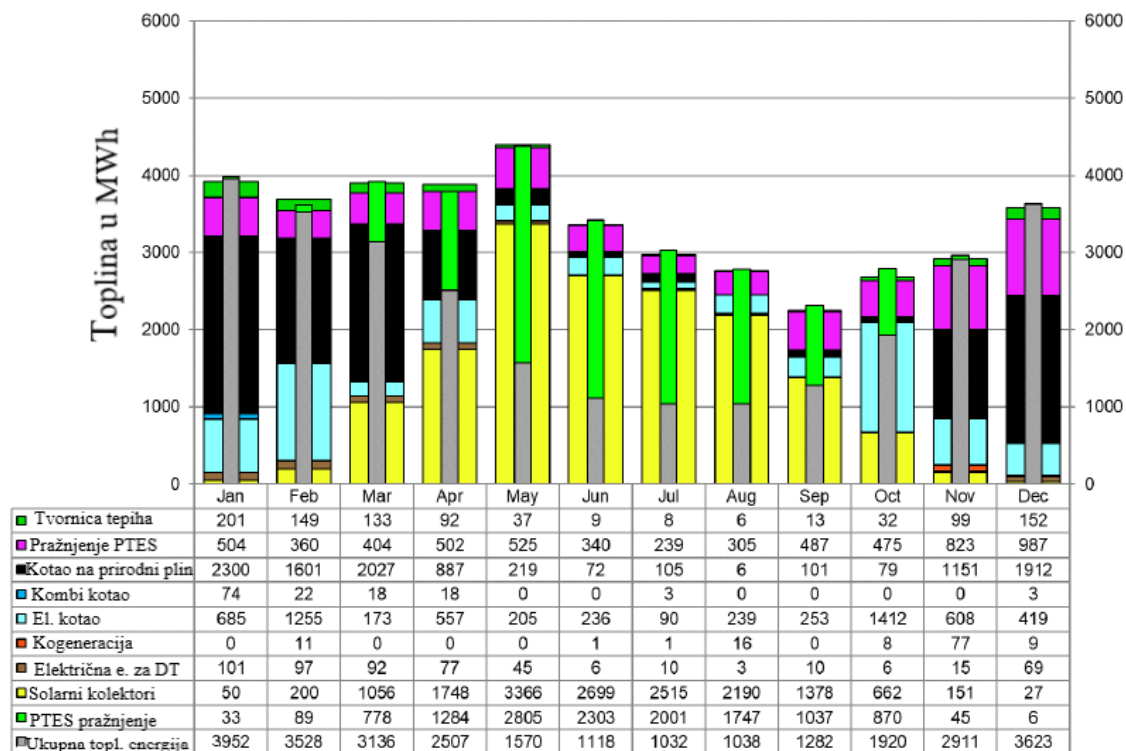
Iz sheme na Slika 18. vidljivo je da su tri polja solarnih kolektora, izmjenjivačima topline, odvojena od sezonskog spremnika. Isto tako i sezonski spremnik je izmjenjivačem odvojen od ostatka postrojenja. Vidi se da sva topla voda ide u dnevni spremnik topline i od tu se šalje prema krajnjim potrošačima koji su prikazani skroz desno na shemi [30].

**Tablica 5. Proizvodnja pojedinih dijelova CSTS-a za 2016. i 2017. godinu [30]**

Godina		2016.	2017.
Sunčeva iradijacija na solarne kolektore	MWh	50 943	48 905
Toplina iz solarnih kolektora	MWh	18 120	16 041
Toplina unesena u PTES	MWh	15 200	12 997
Toplina odvedena iz PTES	MWh	7 946	5 951
Promjena unutrašnje energije PTES	MWh	-397	583
Toplinski gubici PTES	MWh	7 650	6 463
Toplina iz dizalice topline	MWh	2 726	2 614
Potrošnja električne energije dizalice topline	MWh	564	531
Toplina iz plinske kogeneracije	MWh	1 052	125
Toplina iz kotla na prirodni plin	MWh	10 112	10 460
Toplina iz električnog kotla	MWh	4 074	6 132
Toplina iz tvornice tepiha	MWh	nepoznata	932
Toplina predana CTS-u	MWh	27 352	27 617
<b>Tehničke karakteristike</b>			
Učinkovitost solarnih kolektora	%	36	33
Učinkovitost PTES	%	50	50
Broj ciklusa punjenja PTES		0,9	0,7
Maksimalna temperatura PTES	°C	84	79
Minimalna temperatura PTES	°C	23	21
Korišteni toplinski kapacitet PTES	MWh	8 628	8 126
COP dizalice topline		4,8	4,9
Solarna frakcija	%	42	37
Proizvodnja kolektora po površini	kWh/m <sup>2</sup>	404	358

Iz Tablica 5. vidljivo je da je udio topline proizvedene iz solarnih kolektora 42% 2016. godine i 37% 2017. godine što je dosta manje od očekivanih 60%. Razlika između ove dvije godine je zbog različitih vremenskih uvjeta i manje Sunčevog zračenja 2017. godine. Vidimo

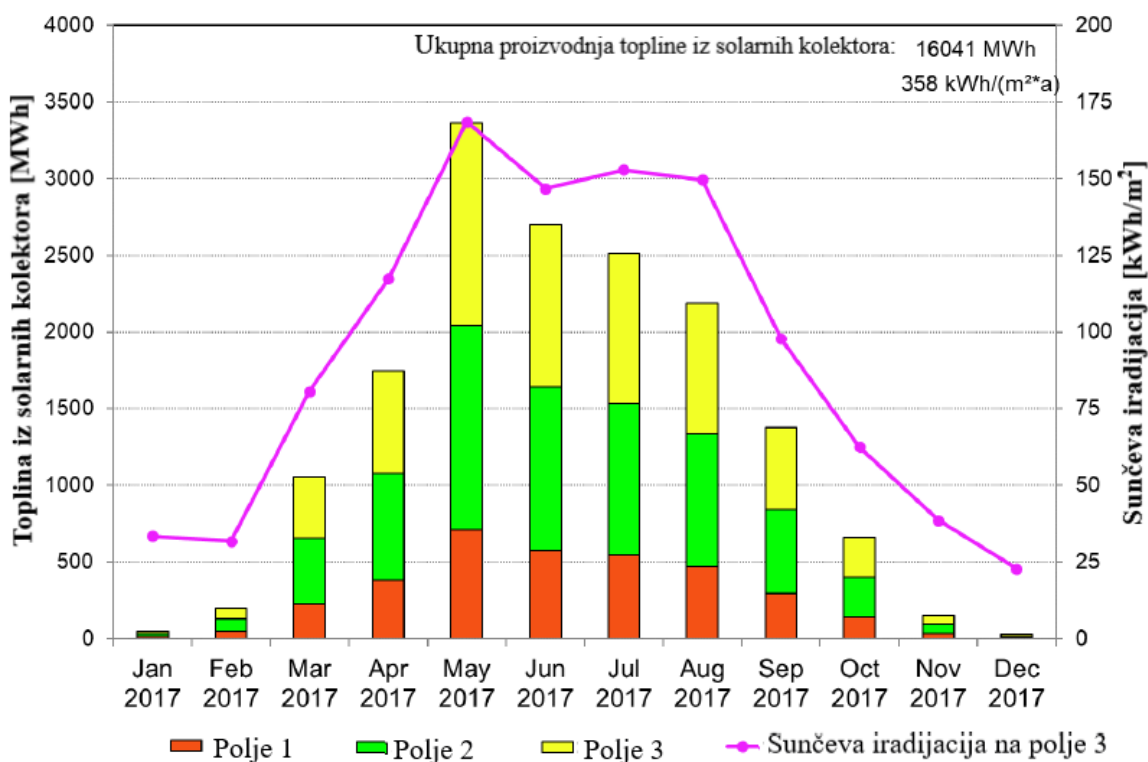
da su i toplinski gubici spremnika manji 2017. godine jer je manje energije pohranjeno. Godišnja potrošnja je ostala na istoj razini od približno 28 GWh [30].



Slika 19. Mjesečna proizvodnja topline u MWh u 2017. godini [10]

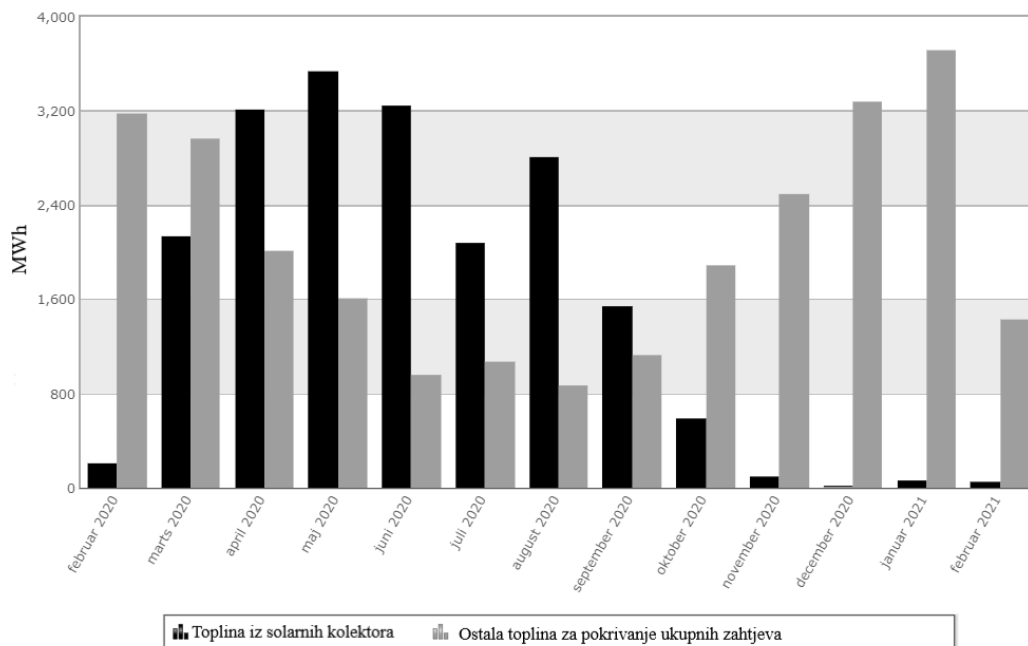
Iz Slika 19. može se vidjeti proizvodnju topline iz svih dijelova toplane po mjesecima. Ovdje ćemo se bazirati na solarne kolektore i toplinski spremnik. Kao što je i očekivano proizvodnja solarnih kolektora je najveća u ljetnim mjesecima. Mjesec s najvećom proizvodnjom topline je svibanj što nije isto kao u Hrvatskoj gdje se očekuje da to bude srpanj ili kolovoz. U zimskim mjesecima skoro pa i nema topline iz solarnih kolektora. Zanimljivo je pratiti punjenje i pražnjenje sezonskog spremnika. Spremnik se puni paralelno s najvećom proizvodnjom iz solarnih kolektora dok se prazni kroz cijelu godinu. Najmanje ljeti jer se tada toplinska energija troši jedino na grijanje potrošne tople vode, a najviše u jesen jer je tada na najvišoj temperaturi i očekivano je da će se prvo trošiti energija iz spremnika, a tek kad mu temperatura padne ispod potrebne temperature mrže, uključiti će se drugi izvori topline.

4.2.1. **Proizvodnja solarnih kolektora**



Slika 20. Mjesečna proizvodnja topline solarnih kolektora 2017. godine [30]

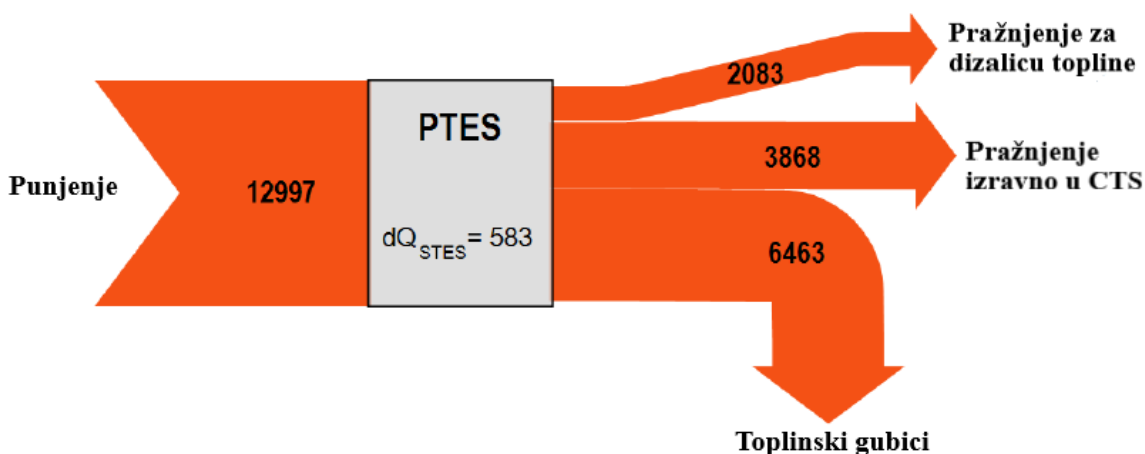
Slika 20. prikazuje proizvodnju polja solarnih kolektora za 2017. godinu i ona iznosi 16 041 MWh topline. Kada se to podijeli s površinom dobije se 358 kWh po metru kvadratnom kolektora.



**Slika 21. Mjesečna proizvodnja topline solarnih kolektora i ostala toplina za pokrivanje ukupnih zahtjeva 2020. godine [31]**

Slika 21. prikazuje mjesečnu proizvodnju solarnih kolektora za 2020. godinu te uspoređujući s 2017. godinom vidi se da proizvodnja ostaje poprilično jednaka. Svibanj je ostao mjesec s najvećom proizvodnjom topline iz solarnih kolektora, dok se mala anomalija dogodila u srpnju gdje je proizvodnja u 2020. godini pala što je posljedica lošijih klimatskih uvjeta u tom mjesecu 2020. godine. Na Slika 21. također se vidi da se u proljetnim i ljetnim mjesecima većina potreba za toplinskom energijom pokriva iz proizvodnje solarnih kolektora.

**4.2.2. Sezonski spremnik topline (PTES)**



**Slika 22. Tok energije PTES-a u MWh 2017. godine [30]**

Slika 22. prikazuje tok energije PTES-a i tu se vidi da je u sezonski spremnik pohranjeno 12 997 MWh toplinske energije te mu se povećala unutrašnja energija ( $dQ_{STES}$ ). Toplinska energija predana direktno u CTS je 3 868 MWh dok je 2 083 MWh prvo moralo proći kroz dizalicu topline. Vidimo dosta velike toplinske gubitke spremnika. U 2017. godinu čak 14% veće od predviđenih idejnim projektom. Razlog tomu je što pokrov spremnika nije dobro tehnički izveden te tu ima prostora za povećanje udjela topline predane u mrežu iz solarnih kolektora [30]. Smanjenjem gubitaka sezonskog spremnika na projektne gubitke približili bi se planiranim 60% topline iz solarnih kolektora.

#### 4.2.2.1. Usporedba PTES-a u Gramu i Drunninglundu

U Tablica 4. prikazane su karakteristike spremnika u Drunninglundu, a u Tablica 5. u Gramu. Prateći te podatke može se zaključiti da je veća učinkovitost sezonskog spremnika u Drunninglundu (96%) posljedica manjih toplinskih gubitaka od sezonskog spremnika u Gramu (50%). Drugi faktor koji utječe na učinkovitost spremnika je broj ciklusa punjenja (2,2) koji je za spremnik u Drunninglundu za 2017. godinu oko tri puta veći od spremnika u Gramu (0,7). Kako toplinski gubici spremnika ovise o temperaturi vode, veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja omogućuje veći protok vode te manju temperaturu u spremniku i samim time smanjuje gubitke spremnika te time povećava njegovu učinkovitost. Tu možemo doći do zaključka da na učinkovitost spremnika i toplinske gubitke utječe složeni postupak regulacije protoka vode kroz spremnik. Veličina spremnika također igra značajnu ulogu. Spremnik u Drunninglundu je duplo manji od spremnika u Gramu pa je njegova regulacija dosta lakša. Kako bi postigli udio toplinske energije proizvedene iz solarnih kolektora od 60% u Gramu je potrebno raditi na regulaciji protoka vode kroz spremnik kako bi se smanjili toplinski gubici spremnika te povećati udio toplinske energije proizvedene u dizalicama topline jer i one doprinose povećanju učinkovitosti sezonskog spremnika topline [25].

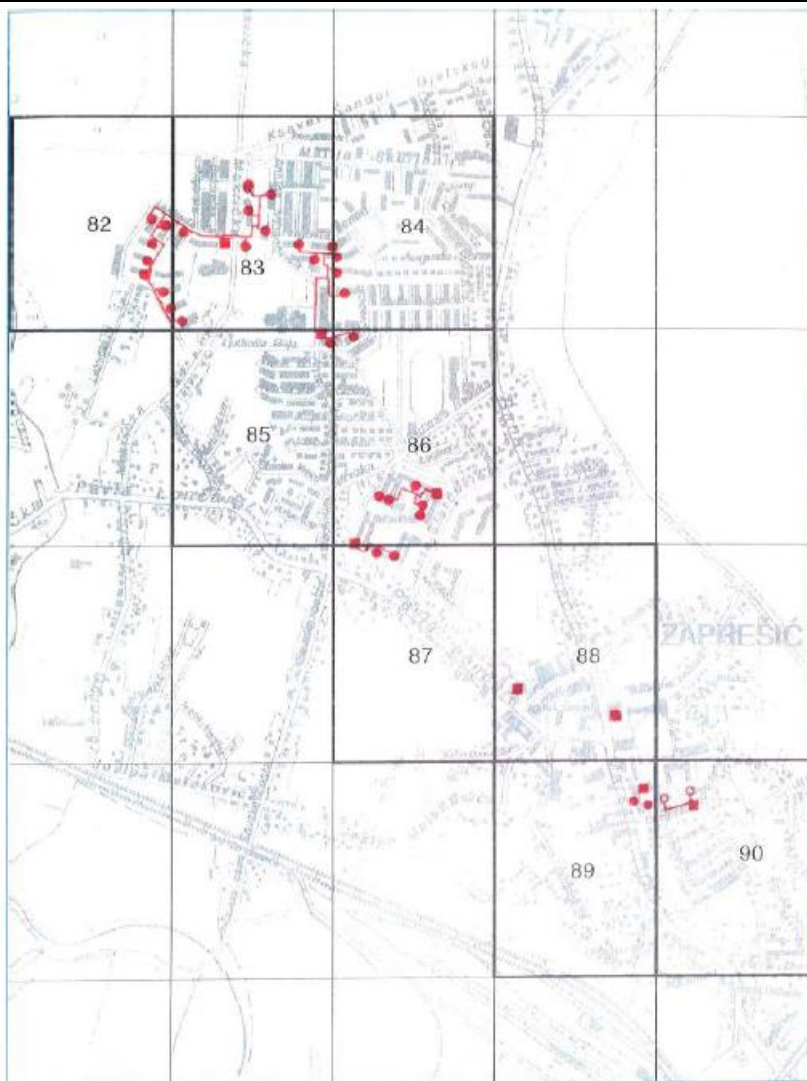
## 5. Zaprešić

Grad Zaprešić smjestio se na sjeverozapadu Hrvatske u Zagrebačkoj županiji. Prostire se na 52,60 km<sup>2</sup>. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine u gradu živi 25 223 stanovnika. Po broju stanovnika treći je grad u Zagrebačkoj županiji te najgušće naseljeno područje u županiji [32].

### 5.1. Opis postojećeg toplinskog sustava

Toplinskim sustavima u gradu Zaprešiću upravlja tvrtka HEP Toplinarstvo d.o.o.. Toplinski se sustav sastoji iz četiri zatvorena (ZTS) i četiri samostalna (STS) toplinska sustava koji su međusobno nepovezani. Ukupna duljina mreže iznosi 1660 m. U zatvorenim sustavima distribucija toplinske energije vrši se od kotlovnice do potrošača vanjskom toplinskom mrežom dok samostalni sustavi nemaju vanjsku toplinsku mrežu, a kotlovnice i toplinske stanice se nalaze u objektu koji opskrbljuju. Svaki sustav ima svoju kotlovnicu koje kao gorivo koriste prirodni plin ili ekstra lako loživo ulje. Opskrba potrošača toplinskom energijom obavlja se preko 36 toplinskih stanica ukupne zakupljene snage 14,85 MW i ukupne instalirane snage 20,36 MW. Ukupna proizvedena toplinska energija u svim sustavima prema „Programu korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016. – 2030.“ u 2015. godini bila je 15 608 MWh, a isporučena toplinska energija 14 255 MWh. [33] [34]. Toplinski gubici distribucijskog sustava prema tome iznose 8,6%.

Na Slika 23. kvadratićima su označene kotlovnice, dok su toplinske podstanice u opskrbnim objektima označene kružićima. Na Slika 23. je također ucrtana postojeća distribucijska mreža vrelovoda.



**Slika 23. Prikaz kotlovnica, podstanica i distributivne mreže u Zaprješiću [34]**

Zatvoreni toplinski sustav čine kotlovnice na adresama: Mihanovićeve 28, Mokrička 61, Trg mladosti 6 i Trg mladosti 10 te ćemo i nazivati prema adresi. Sve ove kotlovnice kao energent koriste prirodni plin. „Mihanovićeve 28“ ima najveću instaliranu snagu od 4,53 MW i duljinu mreže 450 metara, dok „Mokrička 61“ sa snagom od 4,4 MW proizvodi najviše toplinske energije, ukupno 4 874 MWh, te ima najdužu distribucijsku mrežu od 915 metara i opskrbljuje najveći broj kućanstava. Druge dvije su nešto manje, ukupne instalirane snage 5,7 MW i nalaze se blizu potrošača. Ovaj zatvoreni sustav toplinskom energijom opskrbljuje 1 794 kućanstava od ukupnih 2 280 te 66 od ukupnih 89 industrijskih i poslovnih potrošača. Samostalni toplinski sustavi su manje kotlovnice u sklopu zgrada te nemaju toplovod i svaki ima jednu toplinsku podstanicu. Ove i još neke podatke o toplinskom sustavu u Zaprješiću prikazuje Tablica 6. [34].



**Tablica 6. Podaci o toplinskom sustavu u Zaprešiću [34]**

Podaci po proizvodnim jedinicama	Jedinica	ZTS				STS				SUMA
		A. Mihanovića 28	Mokrička 61	Trg mladosti 6	Trg mladosti 10	Drage Kodmana 13	Franje Krajačića 1	Trg žrtava fašizma 6	Pavla Lončara 6	
Naziv proizvodne jedinice (Adresa)										
Ukupna instalirana snaga kotlovnice	kW	4.530	4.400	3.300	2.400	1.200	1.700	1.500	1.330	20.360
Potrošnja prirodnog plina	m <sup>3</sup>	478.084	631.802	317.554	318.690	0	94.069	0	0	1.840.199
Potrošnja ekstra lakog lož ulja	l	0	0	0	0	76.721	0	79.165	56.704	212.590
Ukupna ulazna energija goriva	kWh	4.607.637	6.092.923	3.061.388	3.073.425	717.805	905.909	740.671	530.525	19.730.282
<b>Podaci o predanoj toplinskoj energiji</b>										
Proizvedena toplinska energija	kWh	3.686.110	4.874.338	2.449.110	2.458.740	634.000	683.000	428.000	395.000	15.608.298
Duljina distribucijske mreže/vanjskih instalacija	m	450	915	220	75	0	0	0	0	1.660
Broj toplinskih podstanica - UKUPNO	kom	9	14	6	3	1	1	1	1	36
Broj toplinskih podstanica s PTV (od ukupnog broja)	kom	5	14	4	3	0	0	0	1	27
<b>Broj krajnjih kupaca</b>										
Kućanstva	-	526	626	295	347	149	137	121	79	2.280
Industrija i poslovni potrošači (vrela/topla voda)	-	5	7	15	39	0	19	4	0	89
Industrija i poslovni potrošači (tehnološka para)	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 5.2. Plan za budući centralizirani toplinski sustav

Toplinarstvo Zaprešića planira se kao jedinstven (centralni) toplinski sustav s jednom energanom i jednom kotlovnicom te zajedničkom distributivnom mrežom te se ne razmatra spajanje sa centralnim toplinskim sustavom grada Zagreba [33]. Iako trenutno nije planirano spajanje s CTS-om Zagreba, prema analizi „Tehnička, ekonomska i okolišna optimizacija širenja CTS-a u urbanim aglomeracijama“ (eng. „Technical, economic and environmental optimization of district heating expansion in an urban agglomeration“), dokazano je da je spajanje Zagreba sa Zaprešićem, a i Velikom Goricom, isplativo rješenje za budući CTS [35].

Jednoj kotlovnici povećati će se kapacitet i postaviti kogeneracijsko postrojenje za proizvodnju toplinske i električne energije dok se drugoj planira postaviti veće i učinkovitije kotlove. Najpovoljnije za to su kotlovnice u Mokričkoj 61 i Mihanovićevoj 28 dok bi ostale kotlovnice prestale s radom i tu bi se postavile toplinske podstanice. Za prijenos i distribuciju toplinske energije od energane i kotlovnice do toplinskih stanica planira se izgradnja nove vanjske toplinske mreže kojom će se povezati sve prijašnje kotlovnice tj. njihove postojeće vanjske toplinske mreže. Postojeću vanjsku toplinsku mrežu potrebno je zamijeniti novim cijevima te ih dimenzionirati za potrebe postojećeg sustava i mogućih novih objekata koji bi se priključili.

Izravni cilj izgradnje centralnog toplinskog sustava u Zaprešiću je ostvariti toplinski udio kogeneracije i obnovljivih izvora energije u iznosu od 24% od ukupno instaliranog toplinskog

kapaciteta energane i kotlovnice, smanjenje potrošnje energenata po jedinici isporučene toplinske energije potrošačima, smanjenje potrošnje energije te smanjenje emisije štetnih plinova [33].

## 6. Opis zadatka i postupak rješavanja

Nakon što je napravljena analiza CSTS-a u Gramu potrebno je provjeriti primjenjivost takovog rješenja u Zaprešiću. Uspoređujući gradove po broju stanovnika vidi se da je Zaprešić deset puta veći tako da će analiza biti provedena samo za toplinski sustav koji trenutno postoji u gradu. Sustav će biti spojen u jedan CTS prema planu i biti će zadržane toplinske potrebe postojećeg sustava. Zna se da je potrebno godišnje proizvesti 16 000 MWh toplinske energije, dok to u Gramu iznosi 28 000 MWh. Proračun dijelova postrojenja i udjela toplinske energije iz istih biti će uzet kao u Gramu:

- udio toplinske energije iz solarnih kolektora – 60%
- udio toplinske energije iz dizalice topline – 10%
- te udio iz ostalih dijelova postrojenja (kogeneracija, kotlovi) – 30%

Za analizu i proračun biti će korišteni alati F-easy i Sunstore 4 Feasibility Evaluation Tool.

### 6.1. F-easy

F-easy alat je u Excelu koji služi za grubi proračun veličina i ekonomskih parametra pri integraciji solarnog ustava u postojeći CTS. Alat može posložiti za proračun potrebne veličine polja solarnih kolektora i sezonskog toplinskog spremnika ili za proračun isplativosti i povratka ulaganja u takav projekt. Neke parametri se unose u program, dok neke program ima kao zadane.

Ulazni parametri:

- Godišnja proizvodnja CSTS-a
- Godišnja solarna iradijacija na horizontalnu plohu
- Veličina i cijena površine predviđene za solarne kolektore i sezonski spremnik
- Udaljenost između solarnih kolektora i postojećeg toplovoda
- Prosječna radna temperatura CSTS-a
- Prihvatljiva cijena za proizvodnju topline

Glavni izlazni parametri:

- Površina kolektora i potrebna površina zemljišta

- Volumen sezonskog toplinskog spremnika
- Ukupna investicija i vrijeme otplate
- Udio toplinske energije iz solarnih kolektora (solarna frakcija)

Također postoje parametri za detaljniju analizu sustava [36].

Cilj proračuna za Zaprešić u F-easy alatu je bio dobiti površinu kolektora i veličinu toplinskog spremnika kako bi osigurali udio toplinske energije iz solarnih kolektora od 60%.

Ulazni parametri pri izračunu prikazani su u Tablica 7.

**Tablica 7. Ulazni parametri za F-easy**

Godišnja proizvodnja CTS-a	16 000 MWh
Solarna iradijacija na horizontalnu plohu [37]	1 330 kWh/m <sup>2</sup>
Veličina zemljišta	65 000 m
Udaljenost do toplovoda	1 km
Prosječna radna temperatura CTS-a	75 °C
Prihvatljiva cijena za proizvodnju topline [38]	50 €/MWh

Dobivena površina kolektora iznosi 21 667 m<sup>2</sup>, volumen sezonskog toplinskog spremnika 46 391 m<sup>3</sup> te odnos omjera volumena toplinskog spremnika i površine kolektora 2,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> što je parametar koji će se koristiti u Sunstore 4 za daljnju analizu.

## 6.2. Sunstore 4 Feasibility Evaluation Tool

Sunstore 4 također je Excel alat kojim se proračunava snaga pojedinog dijela postrojenja, daje informacije u cijenama pojedinih dijelova u ovisnosti o njihovoj veličini te ekonomske parametre kao što su iznos investicije, cijena toplinske energije te godišnje iznose potrebne za rad i održavanje postrojenja. Alat je nastao kao dio projekta „SUNSTORE-4 EU“. Alat nudi mogućnost usporedbe do 5 različitih scenarija za izgradnju postrojenja koji uključuju polja solarnih kolektora, dnevne ili sezonske spremnike topline, kogeneracijsko postrojenje na biomasu, kotao na biomasu i dizalicu topline.

Ulazni parametri:

- Godišnja proizvodnja topline CTS-a
- Snaga postrojenja

- Godišnja solarna iradijacija na horizontalnu plohu
- Cijena biomase, električne energije, feed-in tarife
- Uvjeti investicije (diskontna stopa i duljina trajanja investicije u godinama)

Ulazni parametri za različite koncepte:

- Udio topline proizvedene iz solarnih kolektora, sustava na biomasu i dizalica topline
- Učink solarnih kolektora
- Vrsta toplinskog spremnika
- Omjera volumena toplinskog spremnika i površine kolektora
- Gubitci toplinskog spremnika
- Učink kotla na biomasu
- Koeficijent grijanja dizalice topline (COP)

Izlazni parametri:

- Cijena toplinske energije za odabrani koncept
- Iznos ukupne investicije
- Usporedba cijene toplinske energije za različite koncepte
- Površina kolektora i veličina spremnika

Ostali izlazni parametri odnose se na snage i cijene pojedinih dijelova postrojenja, te troškove godišnjeg pogona i održavanja postrojenja [36].

U Gramu je solarni sustav nadograđen na već postojeće kogeneracijsko postrojenje i plinske kotlove dok je u Zaprešiću plan zamjena starih kotlova pa je ovdje to uzeto u obzir te su proračun i analiza napravljeni za kogeneracijsko postrojenje na biomasu i kotao na biomasu.

Tako se dobiva sustav od potpuno obnovljivih izvora energije.

Prvi scenarij (Scenarij 1) sastoji se od solarnih kolektora, sezonskog spremnika topline, dizalice topline i kogeneracijskog postrojenja na biomasu.

Drugi scenarij (Scenarij 2) sastoji se od solarnih kolektora, sezonskog spremnika topline, dizalice topline i kotla na biomasu.

Ulazni parametri za oba scenarija su isti s razlikom da kod Scenarija 1 imamo kogeneracijsko postrojenje, a kod Scenarija 2 kotao na biomasu.

Tehnički ulazni parametri za oba scenarija prikazani su Tablica 8.

**Tablica 8. Ulazni parametri uneseni u Sunstore 4**

Godišnja proizvodnja topline CTS-a	16 000 MWh
Snaga postrojenja	8 MW
Godišnja solarna iradijacija na horizontalnu plohu [37]	1 330 kWh/m <sup>2</sup>
Udio topline proizvedene iz solarnih kolektora, sustava na biomasu i dizalica topline	60% - 30% - 10%
Učink solarnih kolektora [25]	42%
Vrsta toplinskog spremnika	PTES
Omjera volumena toplinskog spremnika i površine kolektora	2,1 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
Gubitci toplinskog spremnika	10%
Učink kotla na biomasu (Scenarij 2)	90%
Postotak proizvodnje toplinske/električne energije u kogeneraciji (Scenarij 1)	80% - 20 %
COP dizalice topline	4,8

Kogeneracijsko postrojenje sastoji se od kotla na biomasu za proizvodnju toplinske energije i organskog Rankinovog ciklusa (ORC) za proizvodnju električne energije.

### 6.2.1. Organski Rankineov ciklus (ORC)

ORC je varijacija Rankineovog ciklusa u kojem se umjesto vode kao radnog medija koristi organski fluid. Zbog relativno niske temperature isparavanja organskog fluida moguće je iskorištavanje niskoentalpijskih izvora topline (biomasa, otpadna toplina, geotermalna i sunčeva energija). ORC tehnologija može pretvoriti toplinsku energiju relativno niskih temperatura u rasponu od 80 do 350°C u električnu energiju i može igrati važnu ulogu u povećanju energetske učinkovitosti novih ili postojećih postrojenja. ORC tehnologija se uspješno primjenjuje za mala kogeneracijska postrojenja na biomasu nazivnih snaga od 200 kW do više od 2 MW [35].

Proračunate snage te veličina spremnika i površinu solarnih kolektora u Sunstre 4 za Scenarij 1 prikazuje Tablica 9., a za Scenarij 2. Tablica 10.

**Tablica 9. Izlazni podaci za Scenarij 1**

Površina solarnih kolektora	Volumen sezonskog spremnika	Potrebna snaga CHP		Potreban snaga dizalice topline
		Snaga kotla	Snaga ORC sustava	
19 000 m <sup>2</sup>	40 100 m <sup>3</sup>	3 MW	0,6 MW	4,8 MW

**Tablica 10. Izlazni podaci za Scenarij 2**

Površina solarnih kolektora	Volumen sezonskog spremnika	Snaga kotla na biomasu	Potreban snaga dizalice topline
19 000 m <sup>2</sup>	40 100 m <sup>3</sup>	2,7 MW	4,8 MW

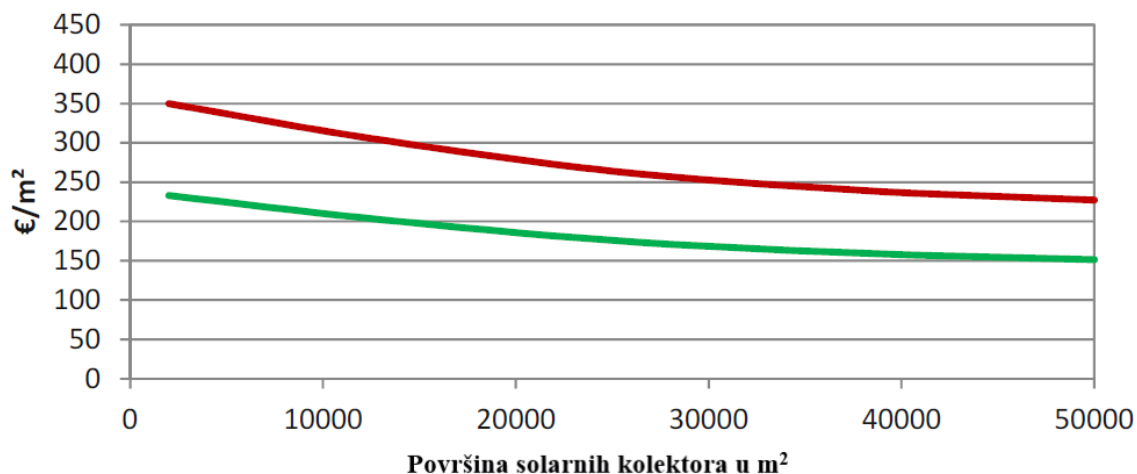
### 6.3. Podaci o cijenama i troškovima

Nakon proračuna snage i veličine postrojenja napravljena je analiza isplativosti projekta za oba koncepta.

#### 6.3.1. Investicijski trošak solarnih kolektora i sezonskog spremnika topline (PTES)

##### Investicijski trošak solarnih kolektora

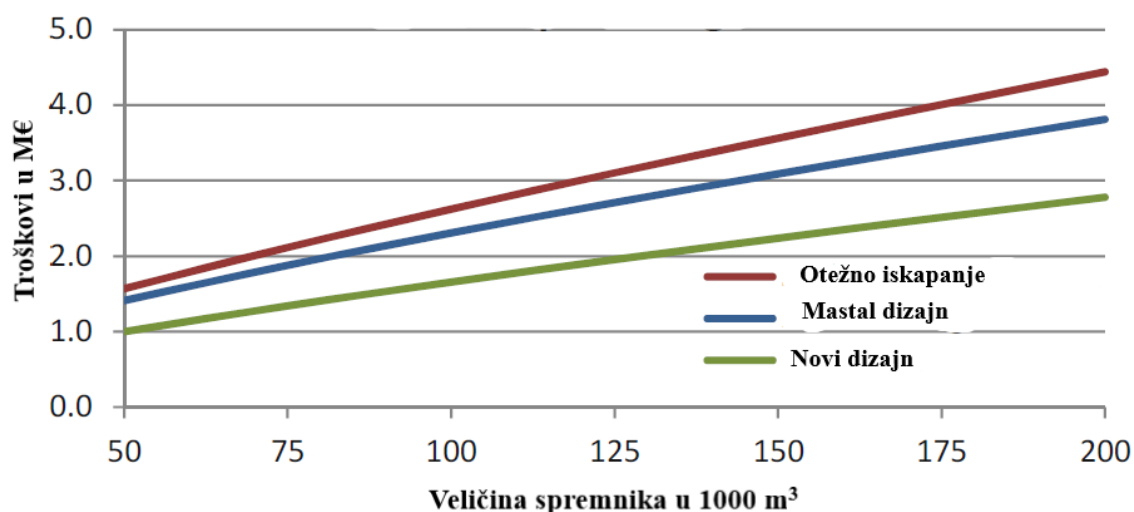
Na Slika 24. prikazana je specifična cijena solarnih kolektora postavljenih na zemlji. U cijenu su uključeni trošak instalacije, trošak cijevi u kolektorskom polju, tekućina protiv smrzavanja i izmjenjivači topline. Cijena se nalazi u rasponu između dvije linije prikazane na Slika 24. i ovisi o veličini kolektorskog polja [39].



Slika 24. Cijena solarnih kolektora postavljenih na zemlju po m<sup>2</sup> [39]

### Investicijski trošak sezonskog spremnika topline (PTES)

Za sezonski spremnik odabran je PTES. Različite cijene PTES spremnika prikazane su na Slika 25. Plava linija predstavlja cijenu postavljanja spremnika u Mastalu u Danskoj. Crvena linija predstavlja cijenu ako bi pri iskopavanju došlo do poteškoća koje bi stvorile dodatne troškove. Zelena krivulja prikazuje cijenu najnovije tehnologije postavljanja PTES-a s novom tehnologijom izrade poklopca koji smanjuje toplinske gubitke spremnika [39].



Slika 25. Troškovi PTES-a u ovisnosti o volumenu [39]



### 6.3.2. Iznosi investicije za Scenarij 1 i 2

Kako bi se provela analizu isplativosti potrebno je izračunati još neke cijene prikazane u Tablica 11.

**Tablica 11. Troškovi investicije i godišnjeg rada za Scenarij 1 i 2**

	Koncept 1	Koncept 2
Ukupan iznos investicije [€]	11 500 000	8 200 000
Solarni kolektori [€]	4 100 000	4 100 000
Sezonski spremnik [€]	1 100 000	1 100 000
CHP [€]	5 000 000	-
Kotao na biomasu [€]	-	1 700 000
Dizalica topline [€]	1 300 000	1 300 000
Godišnje održavanje i rad solarnih kolektora [€]	5 800	5 800
Godišnje održavanje CHP i trošak biomase [€]	399 000	-
Godišnje održavanje kotla i trošak biomase [€]	-	247 000
Trošak električne energije za dizalicu topline [€]	65 000	65 000

Specifične cijene pojedinih dijelova postrojenja u Sunstore 4 prate trenutne cijene na tržištu pa je tako cijena solarnih kolektora 214 €/m<sup>2</sup>, cijena sezonskog toplinskog spremnika 28,2 €/m<sup>3</sup> određena prema cijeni spremnika u Mastalu, cijena biomase iznosi 25 €/MWh. Cijena električne energije za Hrvatsku postavljena je na fiksni iznos od 100 €/MWh prema „Global Petrol Prices“ [39].

### Prodajna cijena toplinske energije

Za ekonomsku analizu bitno je znati po kojoj cijeni će se toplinska energija prodavati. Ovdje je uzeta cijena za krajnje potrošače po kojoj HEP-Toplinarstvo trenutno isporučuje toplinsku energiju za u Zaprešiću i koja iznosi 70 €/MWh [38]. Na Slika 26. vidimo cijenu toplinske energije u Zaprešiću po pojedinim stavkama. Znamo da je ukupna zakupljena snaga 14,85 MW, ukupna grijana površina za kućanstvo 102 699,06 m<sup>2</sup>, za industriju i poslovne potrošače

5 969,95 m<sup>2</sup>, broj krajnjih kupaca za kućanstvo 2 280, industriju i poslovne potrošače 89. Jednostavnim množenjem tih stavki i dijeljenjem s 14 255 MWh koliko je energije isporučeno krajnjim kupcima dobijemo cijenu toplinske energije za krajnje potrošače od 70 €/MWh [34].

<b>HEP-TOPLINARSTVO d.o.o.</b>					
<b>CJENIK - ZATVORENI TOPLINSKI SUSTAV (ZTS) - ZAPREŠIĆ</b>					
Naziv djelatnosti	Naziv tarifne stavke i naknade	Iznosi naknada i tarifnih stavki (TS) po tarifnim grupama (Tg) i tarifnim modelima (TM)			
		KUĆANSTVA (Tg1) / vrela/topla voda (TM8)		INDUSTRIJA I POSLOVNI POTROŠAČI (Tg2)/ vrela/topla voda (TM9)	
OPSKRBA TOPLINSKOM ENERGIJOM	Varijabilni dio cijene proizvodnje toplinske energije (Energija)	0,3000	kn/kWh	0,3400	kn/kWh
	Fiksni dio cijene proizvodnje toplinske energije (Snaga)	11,05	kn/kW/mj.	11,45	kn/kW/mj.
	Naknada za djelatnost opskrbe toplinskom energijom	7,02	kn/mj.	7,02	kn/mj.
KUPAC TOPLINSKE ENERGIJE	Naknada za djelatnost kupca* za krajnje kupce s pripremom PTV** u toplinskoj podstanici	0,69	kn/m <sup>2</sup> /mj.	0,69	kn/m <sup>2</sup> /mj.
	Naknada za djelatnost kupca* za krajnje kupce bez pripreme PTV** u toplinskoj podstanici	0,50	kn/m <sup>2</sup> /mj.	0,50	kn/m <sup>2</sup> /mj.

Slika 26. Cijena toplinske energije u Zaprešiću prema HEP-Toplinarstvu [38]

### 6.3.3. Cijena toplinske energije prema Scenariju 1 i 2

Proračunom je utvrđeno da nivelirani trošak toplinske energije (LCOH) prema Scenariju 1 iznosi 79,5 €/MWh te prema Scenariju 2 60,4 €/MWh. Prema tome da za zaključiti da je Scenarij 2 bolje rješenje za CTS u Zaprešiću. Do ovakve razlike u cijeni toplinske energije između ove dvije opcije dolazi iz većih investicijski troškova za kogeneracijsko postrojenje. Scenarij 1 ne bi bilo isplativo graditi po trenutnoj cijeni toplinske energije. Treba napomenuti kako cijena zemljišta nije uzeta u proračun jer je pretpostavljeno da će se postrojenje graditi na zemljištu u vlasništvu grada.

## 6.4. Tehno-ekonomska analiza i analiza osjetljivosti

Prema LCOH zaključeno je da je Scenarij 1 isplativiji od Scenarija 2. U tehno-ekonomskoj analizi i analizi osjetljivosti cilj je pokazati isplativost projekta prema još nekim pokazateljima te kako promjena pojedinih utječe na isplativost. Kao pokazatelji ekonomske

isplativosti projekta odabrani su sljedeći parametri: neto sadašnja vrijednost (NPV, eng. net present value) i unutarnja stopa povrata (IRR, eng. internal rate of return). Ostali podaci potrebni za analizu nalaze se u Tablica 12.

**Tablica 12. Ekonomski podaci**

Diskontna stopa	6%
Porez na dobit	18%
Udio privatnog kapitala	15%
Kamata	4%
Vrijeme trajanja kredita (godina)	20
Vijek trajanja opreme (godina)	25

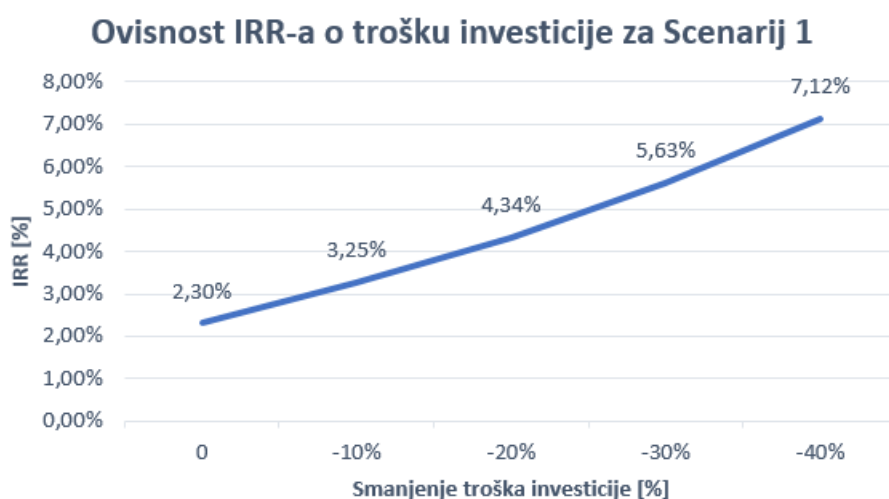
Od ukupne investicije udio privatnog kapitala iznosit će 15%. Životni vijek solarnih kolektora je 25 godina, a vrijeme trajanja kredita 5 godina kraće. Kamata je 4%, a diskontna stopa 6%. Za zadane podatke IRR i NPV prikazani su u Tablica 13.

**Tablica 13. IRR i NPV**

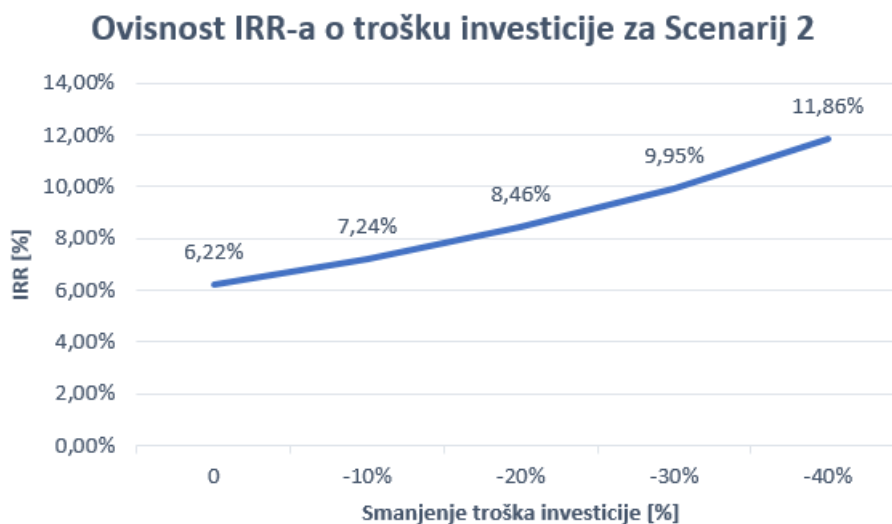
	Scenarij 1	Scenarij 2
IRR	2,30%	6,22%
NPV	-3 621 320 €	165 011 €

Vidi se da je Scenarij 1 ekonomski neisplativ jer je IRR manji od diskontne stope te je NPV u minusu što je također pokazatelj neisplativosti projekta. Scenarij 2 granično je isplativ jer je IRR jednak diskontnoj stopi, a NPV samo 165 011 € što za period od 25 godina nije velika dobit. Koncept 2 dobro je graditi po Danskom principu gdje nije cilj zarada nego povoljnija cijena toplinske energije za zajednicu i smanjenje emisije stakleničkih plinova.

Težnja Europske unije prema čistoj energiji rezultira padom troškova investicija u obnovljive izvore energije. Nova istraživanja i tehnologije u narednim godinama donijet će manje investicijske troškove za solarne panele, kogeneracijsko postrojenje, dizalice topline te sezonske toplinske spremnike stoga će analizom osjetljivosti biti prikazana ovisnost IRR-a, a samim time i isplativosti projekta u ovisnosti o padu investicijskih troškova.



**Slika 27. Ovisnost IRR-a o trošku investicije za Scenarij 1**



**Slika 28. Ovisnost IRR-a o trošku investicije za Scenarij 2**

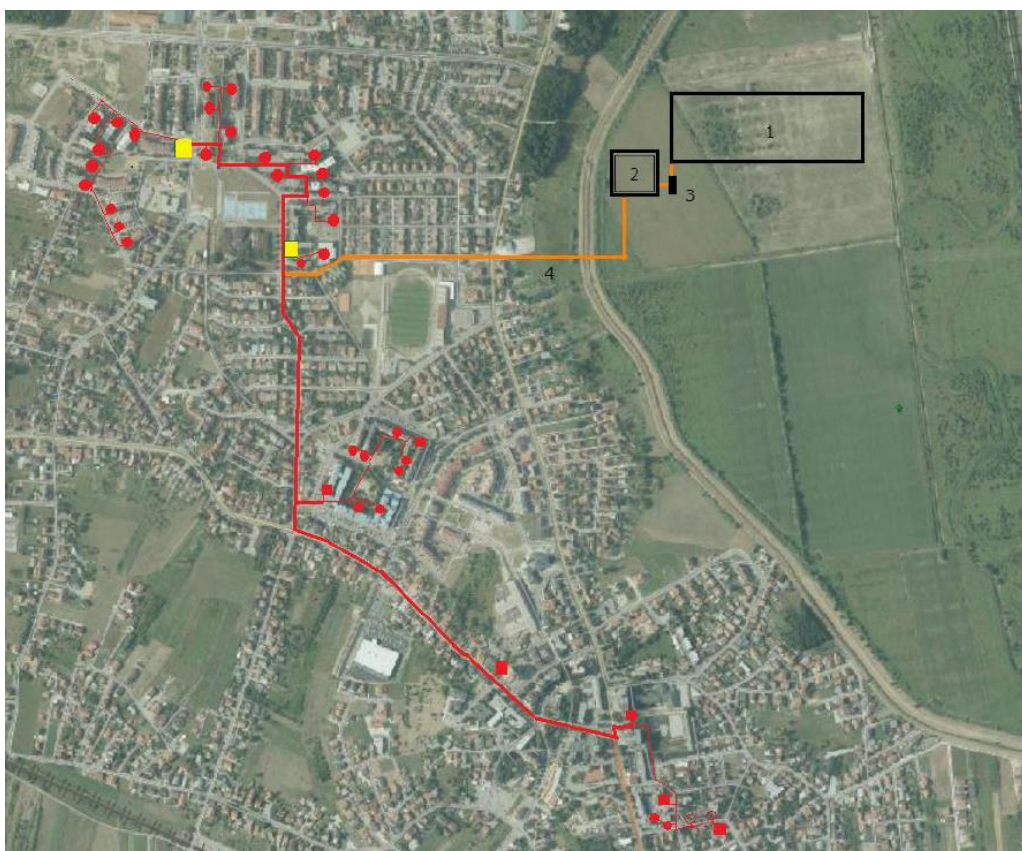
Dijagram na Slika 27. pokazuje da će implementacija CSTS-a sa kogeneracijskim postrojenjem biti isplativa kad investicijski troškovi padnu između 30% i 40% što nije realno u slijedećim godinama stoga je odabran Scenarij 2 kao idejno rješenje za CSTS grada Zaprešića. Tu se vidi da svakim smanjenjem investicijskih troškova dolazi do povećanja IRR-

a i samim time i prihoda. Scenarij 2 sastoji se od polja solarnih kolektora površine 19 000 m<sup>2</sup>, sezonskog spremnika topline (PTES) volumena 40 100 m<sup>3</sup>, kotla na biomasu instalirane snage 2,7 MW i dizalice topline snage 4,8 MW. U F-easy alatu dobivena je površina koju pokrivaju polje solarnih kolektora i sezonski spremnik i ona iznosi 65 000 m<sup>2</sup>. Lokacija za postavljanje postrojenja nije posebno razmatrana u ovom radu. Postoji lokacija koju je kolega Carlo Vale u diplomskom radu predložio za polje solarnih kolektora i toplinski spremnik te se čini prihvatljivom i za ovo postrojenje [37].

Na Sliku 29. brojevima su označeni:

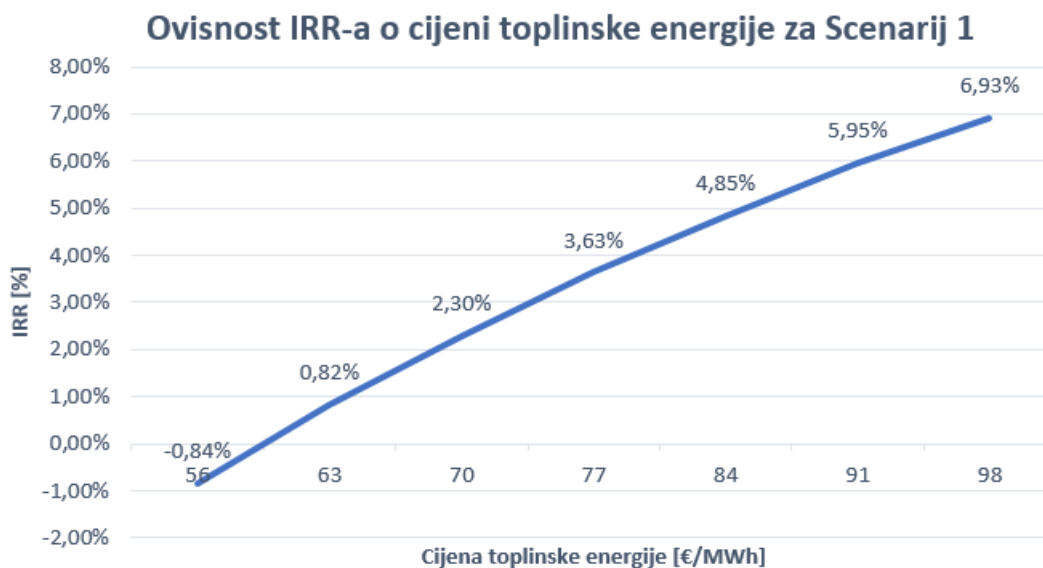
1. polje solarnih kolektora
2. sezonski spremnik topline
3. strojarnica
4. spojni cjevovod

Duljina spojnog cjevovoda na postojeći cjevovod CTS-a iznosi 860 metara. Blizina spojnog cjevovoda CTS-a grada Zaprešića dodatno olakšava poslove priključivanja i smanjuje troškove te ovu lokaciju čini dobrom za gradnju postrojenja [37].

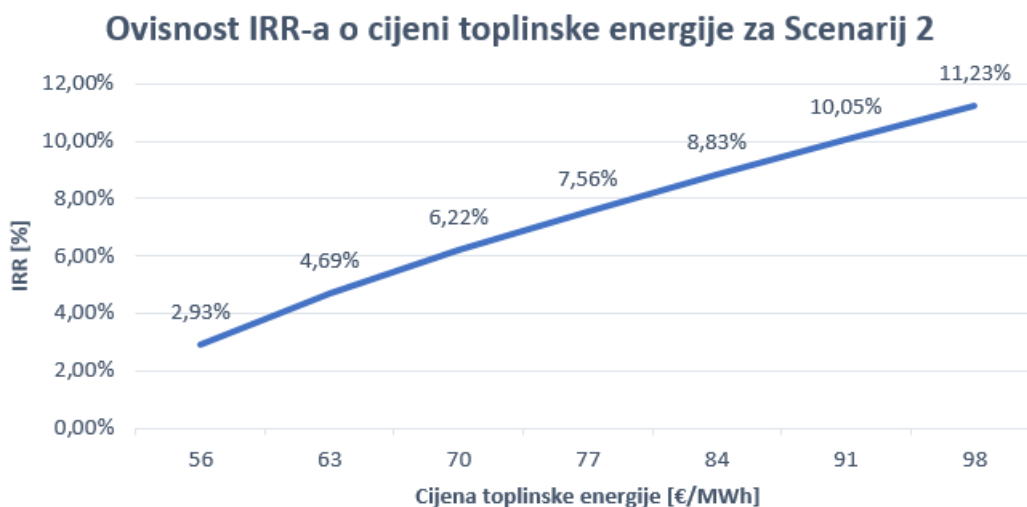


Slika 29. Shematski prikaz postrojenja u prostoru [37]

Bitan utjecajni faktor za investiciju je prodajna cijena toplinske energije pa je napravljena analiza osjetljivosti cijene toplinske energije o IRR-u za oba scenarija (Slika 30. i Slika 31.).



**Slika 30. Ovisnost IRR-a o cijeni toplinske energije za Scenarij 1**



**Slika 31. Ovisnost IRR-a o cijeni toplinske energije za Scenarij 2**

Iz ovisnosti IRR-a o cijeni toplinske energije vidi se da će Scenarij 1 postati isplativ kad cijena toplinske energije bude viša od 90 €/MWh. Potreban je poticaj od 20 €/MWh da bi se to postiglo ili promjena tržišne cijene toplinske energije. Scenarij 2 može biti isplativ i smanjenjem cijene toplinske energije od 10% na 63 €/MWh, ako se diskontna stopa smanji na 4,5% što je također primjenjivo u ovakvim projektima. Kao i prema analizi promjene investicijskih troškova tako i prema analizi promjene cijene toplinske energije jasno je da je Scenarij 2 bolje rješenje za centralizirani solarni sustav u gradu Zaprešiću.

## 7. ZAKLJUČAK

Globalno zatopljenje najveći je izazov za čovječanstvo uz trenutnu pandemiju virusa SARS-CoV-2 koji uzrokuje bolest COVID-19 koja nadamo se neće trajati još dugo. Rješenje toga izazova nameće se samo od sebe i vodi ka obnovljivim izvorima energije. Jedan od najvećih sektora u potrošnji energije je sektor grijanja te se traže opcije implementacije obnovljivih izvora za proizvodnju toplinske energije bez emisija stakleničkih plinova. Danska je najbolji primjer kako iskoristiti Sunčevu energiju za proizvodnju toplinske energije u sustavima grijanja i pripreme potrošne tople vode. Najbolje rješenje za takve sustave su centralizirani toplinski sustavi. Do 2019. u Danskoj je izgrađeno blizu 1,6 milijuna kvadratnih metara solarnih kolektora u centraliziranom toplinskom sustavu. Također je instalirano više od 120 velikih solarnih toplana te je u obje te kategorije Danska vodeća u svijetu. U gradu Gramu jedno je takva toplana gdje je u tradicionalno postrojenje uspješno implementirano polje solarnih kolektora, sezonski spremnik topline i dizalica topline. U toplim mjesecima Sunčeva energija sprema se u sezonski toplinski spremnik i koristi za pripremu tople vode, dok se u hladnijim mjesecima uzima iz spremnika. Kad temperatura u spremniku padne ispod temperature mreže pomoću dizalica topline se zagrijava na temperaturu mreže. Teži se udjelu topline iz Sunčeve energije od 60%. Tehno-ekonomskom analizom implementacije takvog postrojenja u Zaprešić pokazano je da je isplativo izgraditi centralizirani solarni toplinski sustav za postojeći toplinski sustav u Zaprešiću. Potrebno je postojeće zatvorene i samostalne toplinske sustave spojiti u jedan centralizirani toplinski sustav te ga spojiti na novo postrojenje. Postrojenje se sastoji od polja solarnih kolektora, sezonskog spremnika topline, dizalice topline i kotla na biomasu te kao izvor energije koristi samo obnovljive izvore energije. Novim istraživanjima i padom investicijskih troškova za ovakva postrojenja padat će cijena toplinske energije te će biti moguća i izgradnja kogeneracijskog postrojenja unutar sustava. Ovakvo postrojenje moguće je stalno nadograđivati te je u budućnosti moguće postavljanje dodatnih solarnih kolektora, još jednog sezonskog spremnika, jačeg kotla i dizalice topline te samim time širenje centraliziranog toplinskog sustava na veći broj korisnika. U ovom radu nije razmatrana lokacija gdje bi postrojenje bilo građeno te je dan samo prijedlog slobodnog polja i nije provjereno je li moguće graditi na toj lokaciji. Također spajanje postojećih zatvorenih i samostalnih sustava u jedan centralizirani sustav nije analizirano.

## LITERATURA

- [1] “STRUČNE PODLOGE ZA IZRADU STRATEGIJE NISKOUGLJIČNOG RAZVOJA REPUBLIKE HRVATSKE ZA RAZDOBLJE DO 2030 . S POGLEDOM NA 2050 . GODINU Zelena knjiga,” 2015.
- [2] “Javno savjetovanje Prijedloga Niskougljične strategije Republike hrvatske.” .
- [3] W. Lutsch, “Clean energy for all Europeans,” *Euroheat Power (English Ed.*, vol. 14, no. 2, p. 3, 2017, doi: 10.2833/9937.
- [4] European Commission, “Executive Summary of the Impact Assessment Report,” 2020.
- [5] M. zaštite okoliša i Energetike, “Integrirani nacionalni energetska i klimatski plan za Republiku Hrvatsku,” 2019, [Online]. Dostupno ovdje: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/hr\\_final\\_necp\\_main\\_hr.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/hr_final_necp_main_hr.pdf).
- [6] G. Phetteplace, *District heating guide*. 2013.
- [7] Solarthermalworld, <https://www.solarthermalworld.org/>, sjećanj 2021.
- [8] H. Lund *et al.*, “4th Generation District Heating ( 4GDH ) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,” *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [9] J. E. Thorsen, O. Gudmundsson, M. Brand, and A. D. Ram-Bell, “Distribution of district heating: Fourth generation,” *Euroheat Power (English Ed.*, vol. 12, no. 4, pp. 23–27, 2015.
- [10] D. Rutz *et al.*, *Nadogradnja centraliziranih toplinskih sustava*. 2019.
- [11] G. Krajačić, “Centralizirani toplinski sustavi ( CTS ) u Hrvatskoj,” 2020.
- [12] M. zaštite okoliša i Energetike, “Energija u Hrvatskoj 2019 - Energy in Croatia 2019,” 2020.
- [13] M. Reuss, “storage ( BTES ) systems The use of borehole thermal energy ing Solar thermal energy for district heat- Solar District Heating.”
- [14] European Solar Thermal Industry Federation, [http://www.estif.org/publications/solar\\_thermal\\_factsheets/solar\\_district\\_heating/](http://www.estif.org/publications/solar_thermal_factsheets/solar_district_heating/), sjećanj 2021.
- [15] MC Solar, <https://mcsolar.hr/solarni-kolektori/>, veljača 2021.
- [16] U.S. Energy Information Administration, <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-thermal-collectors.php>, veljača 2021.



- [17] Planenergi, “Best practice for implementation and operation of large scale borehole and pit heat thermal storage,” pp. 1–22, 2019.
- [18] P. No, “Fact Sheet : Heat Storages,” no. September, 2019.
- [19] Z. Tian *et al.*, “Large-scale solar district heating plants in Danish smart thermal grid: Developments and recent trends,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 189, no. March 2019, pp. 67–80, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.03.071.
- [20] PlanEnergi, <https://planenergi.eu/activities/district-heating/solar-district-heating/sdh-in-dk-1988-2018/>, sječanj 2021.
- [21] Arcon Sunmark, <http://arcon-sunmark.com/cases/fjernvarme-silkeborg-danmark>, sječanj 2021.
- [22] I. Georgiev, “Case study on Solar-heating plant in Silkeborg, Denmark - Publications Office of the EU,” no. June, 2019, [Online]. Dostupno ovdje: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/981d585d-c492-11e9-9d01-01aa75ed71a1/language-en>.
- [23] Solar Heat Europe, <http://solarheateurope.eu/2020/05/19/vojens-district-heating/>, sječanj 2021.
- [24] Dronninglund Fjernvarme, PlanEnergi, and Niras, “Dronninglund Solar thermal plant,” pp. 1–12, 2014, [Online]. Dostupno ovdje: [http://www.planenergi.dk/wp-content/uploads/2015/04/Brochure\\_Dronninglund\\_2015\\_booklet\\_ENG\\_web\\_.pdf](http://www.planenergi.dk/wp-content/uploads/2015/04/Brochure_Dronninglund_2015_booklet_ENG_web_.pdf).
- [25] C. Winterscheid and T. Schmidt, “Dronninglund District Heating Monitoring Data Evaluation for the Years 2015-2017,” p. 27, 2017.
- [26] Wikipedia, “Gram.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Gram,\\_Denmark](https://en.wikipedia.org/wiki/Gram,_Denmark), veljača 2021.
- [27] PlanEnergi, “Long term storage and solar district heating,” 2016, [Online]. Dostupno ovdje: [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Forskning\\_og\\_udvikling/sol\\_til\\_fjernvarme\\_brochure\\_endelig.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Forskning_og_udvikling/sol_til_fjernvarme_brochure_endelig.pdf).
- [28] Gram Fjernvarme, <https://www.gram-fjernvarme.dk/firmaprofil/solvarme-i-gram/>, sječanj 2021.
- [29] DK Monitoring, <https://www.solar-district-heating.eu/dk-monitoring-2/>, sječanj 2021.
- [30] Solites, “GRAM DISTRICT HEATING MONITORING DATA EVALUATION FOR THE YEARS 2016-2017,” 2017.
- [31] Solarheatdata, <http://solarheatdata.eu/>, sječanj 2021.
- [32] Wikipedia, “Zaprešić.” <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zaprešić>, veljača 2021.
- [33] Energy Institute Hrvoje Požar, “Analiza sektora toplinarstva i iskorištavanja

- potencijala geotermalnih izvora na području Urbane aglomeracije Zagreb,” 2017.
- [34] Energetski institut Hrvoje Požar, “Program korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016.-2030.,” 2015, [Online]. Dostupno ovdje: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/DOC\\_88244.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/DOC_88244.pdf).
- [35] D. F. Dominković, G. Stunjek, I. Blanco, H. Madsen, and G. Krajačić, “Technical, economic and environmental optimization of district heating expansion in an urban agglomeration,” *Energy*, vol. 197, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117243.
- [36] A. Le Denn, “Solar district heating guidelines Calculation tools and methods,” pp. 1–10, 2014.
- [37] C. Vale, “Tehno-ekonomska analiza solarne toplane sa sezonskim skladistenjem toplinske energije u Zapresicu,” 2018.
- [38] P. Tg, “CJENIK - ZATVORENI TOPLINSKI SUSTAV ( ZTS ) - ZAPREŠIĆ Naziv djelatnosti,” p. 2014, 2014.
- [39] J. E. Nielsen and R. Battisti, “Solar District Heating Guidelines: Feasibility study,” pp. 1–11, 2012, [Online]. Dostupno ovdje: <http://solar-district-heating.eu>.