

# Simulacija rada i usporedba toplinskih karakteristika solarnih sustava daljinskog grijanja

---

Štajduhar, Mihaela

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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:235:451533>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-01**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Mihaela Štajduhar**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Komentor:

Dr.sc. Ivan Horvat

Studentica:

Mihaela Štajduhar

Zagreb, 2022.

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

*Zahvaljujem mentoru dr.sc. Damiru Doviću na savjetima, uloženom trudu i vremenu.*

*Također, veliko hvala komentoru dr.sc. Ivanu Horvatu na pomoći i savjetima tijekom pisanja rada.*

*Hvala zaručniku Nikoli što je bio najveći oslonac i podrška svih ovih godina.*

*Hvala mojoj obitelji što su mi omogućili studiranje te na razumijevanju i podršci.*

*Mihaela Štajduhar*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

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



|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -           |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mihaela Štajduhar** JMBAG: 0035205844

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija rada i usporedba toplinskih karakteristika solarnih sustava daljinskog grijanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Operation simulation and comparison of solar district heating systems thermal performances**

Opis zadatka:

U ovom radu potrebno je usporediti toplinske karakteristike dva sustava solarnog daljinskog grijanja odabranog potrošača u klimatskom području Zagreba. U jednom sustavu kao izvore topline predvidjeti solarne toplovodne kolektore i toplovodni kotao, dok u drugom sustavu za tu svrhu koristiti fotonaponske panele i dizalicu topline.

Temeljem provedenih proračuna i simulacija rada oba sustava potrebno je odrediti:

- vrstu i površinu solarnih toplovodnih kolektora i fotonaponskih panela;
- nagib solarnih toplovodnih kolektora i fotonaponskih panela prema horizontali;
- zapremine spremnika tople vode.

Analizirane sustave solarnog daljinskog grijanja je potrebno tako dimenzionirati da period povrata investicije u pojedini sustav bude najkraći.

Dinamički proračun godišnjih potreba za toplinskom energijom predmetnih sustava solarnog daljinskog grijanja provesti prema odgovarajućim normama za proračun solarnih sustava, dizalice topline i spremnika HRN EN 15316-4-3:2017, HRN EN 15316-4-2:2017 i prEN 15316-5:2021.

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

Zadatak zadan:

5. svibnja 2022.

Datum predaje rada:

7. srpnja 2022.

Predviđeni datumi obrane:

18. – 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Damir Dović

Dr.sc. Ivan Horvat

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**SADRŽAJ**

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| POPIS SLIKA.....                                                         | III  |
| POPIS TABLICA .....                                                      | IV   |
| POPIS OZNAKA.....                                                        | V    |
| SAŽETAK .....                                                            | VII  |
| SUMMARY .....                                                            | VIII |
| 1. UVOD .....                                                            | 1    |
| 2. PRIMJENA SUSTAVA DALJINSKOG GRIJANJA .....                            | 3    |
| 2.1. Danski sustav .....                                                 | 3    |
| 2.1.1. Cijena i veličina sustava solarnog daljinskog grijanja .....      | 4    |
| 2.1.2. Smještaj i udaljenosti sustava .....                              | 5    |
| 2.1.3. Populacija.....                                                   | 6    |
| 2.1.4. Toplinski zahtjevi.....                                           | 7    |
| 2.1.5. Stupanj prekrivanja solarnog sustava.....                         | 8    |
| 2.1.6. Cijene toplinske energije.....                                    | 9    |
| 2.1.7. Volumen spremnika solarne energije.....                           | 11   |
| 2.2 Big Solar Graz.....                                                  | 12   |
| 2.2.1. Opis postojećeg centralnog toplinskog sustava.....                | 13   |
| 2.2.2 Opis sustava sa solarnim kolektorima.....                          | 13   |
| 2.3 Karakteristike postojećih sustava solarnog daljinskog grijanja ..... | 15   |
| 3. OSNOVNE KOMPONENTE SUSTAVA SOLARNOG DALJINSKOG GRIJANJA .....         | 18   |
| 3.1 Solarni kolektori.....                                               | 18   |
| 3.1.1. Pločasti kolektor.....                                            | 19   |
| 3.1.2. Vakuumski kolektor .....                                          | 20   |
| 3.1.3 Usporedba pločastih i vakuumskih kolektora .....                   | 21   |
| 3.2 Sezonski spremnik topline .....                                      | 22   |
| 3.4. Kotao i dizalica topline .....                                      | 23   |
| 3.4. Fotonaponski paneli.....                                            | 25   |
| 3.5 Opis rada sustava .....                                              | 26   |
| 4. MODELIRANJE SOLARNOG TOPLINSKOG SUSTAVA .....                         | 28   |
| 4.1 Ulazni parametri.....                                                | 29   |
| 4.1.1. Potrebna energija za grijanje i pripremu potrošne tople vode..... | 29   |

---

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.2 Odabir solarnih kolektora.....                                                     | 30 |
| 4.2. Sunčevo zračenje i vanjska temperatura .....                                        | 30 |
| 4.3. Modeliranje sunčevog zračenja na nagnutu plohu .....                                | 31 |
| 4.4. Izračun energije prikupljene u kolektorskom polju .....                             | 34 |
| 4.5. Modeliranje sezonskog spremnika topline.....                                        | 35 |
| 4.5.1. Određivanje volumena spremnika topline .....                                      | 35 |
| 4.5.2. Norma prEN 15316 – 5:2021 .....                                                   | 36 |
| 4.5.2.1. Određivanje volumena vode koja se isporučuje u sustav daljinskog grijanja ..... | 38 |
| 4.5.2.2. Temperature u spremniku nakon isporuke vode .....                               | 38 |
| 5. REZULTATI.....                                                                        | 41 |
| 5.1. Učinkovitost kolektora.....                                                         | 42 |
| 5.2. Optimalni kut nagiba kolektora.....                                                 | 43 |
| 5.3. Specifična energija prikupljena u kolektorima .....                                 | 44 |
| 6. PERIOD POVRATA INVESTICIJE.....                                                       | 47 |
| 7. ODABRANI SUSTAV .....                                                                 | 49 |
| 8. SUSTAV FOTONAPONSKIH PANELA SA DIZALICOM TOPLINE.....                                 | 51 |
| 9. ZAKLJUČAK .....                                                                       | 53 |
| 10. LITERATURA .....                                                                     | 55 |

**POPIS SLIKA**

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Shema spajanja kolektorskih polja sa potrošačima .....                            | 2  |
| Slika 2. Udio kolektorskih površina u Danskoj [1].....                                     | 3  |
| Slika 3. Cijena kolektorskog polja u funkciji veličine polja [1] .....                     | 4  |
| Slika 4. Prosječna površina kolektora po godinama [1] .....                                | 5  |
| Slika 5. Udaljenost sustava solarnih kolektora od mreže daljinskog grijanja [1].....       | 6  |
| Slika 6. Broj stanovnika u gradovima sa solarnim daljinskim grijanjem [1].....             | 7  |
| Slika 7. Toplinski zahtjevi na sustave solarnog daljinskog grijanja [1] .....              | 8  |
| Slika 8. Troškovi proizvodnje toplinske energije u odnosu na gorivo u 55 toplana [1] ..... | 10 |
| Slika 9. Udio energija za grijanje u Danskoj [1].....                                      | 10 |
| Slika 10. Udjeli proizvedene energije u Grazu [2] .....                                    | 13 |
| Slika 11. Konceptualno rješenje Big Solar Graz [2].....                                    | 15 |
| Slika 12. Sheme sustava sa osnovnim komponentama [3] .....                                 | 17 |
| Slika 13. Učinkovitost različitih vrsta solarnih kolektora [4] .....                       | 19 |
| Slika 14. Osnovni dijelovi pločastog kolektora .....                                       | 20 |
| Slika 15. Osnovni dijelovi vakuumskog kolektora [4] .....                                  | 21 |
| Slika 16. Podzemni sezonski spremnik za skladištenje topline [5] .....                     | 23 |
| Slika 17. Shema sustava solarnih kolektora.....                                            | 27 |
| Slika 18. Shema sustava fotonaponskih panela .....                                         | 27 |
| Slika 19. Potrebna energija za grijanje .....                                              | 30 |
| Slika 20. Promjena učinkovitosti kolektora kroz godinu.....                                | 42 |
| Slika 21. Profil temperature vode u segmentu 1 spremnika topline .....                     | 43 |
| Slika 22. Ukupna energija prikupljena na kolektorima .....                                 | 45 |
| Slika 23. Prikupljena energija u pločastom kolektoru .....                                 | 46 |
| Slika 24. Prikupljena energija u vakuumskom kolektoru .....                                | 46 |
| Slika 25. Period povrata investicije za pločasti kolektor .....                            | 48 |
| Slika 26. Period povrata investicije za vakuumski kolektor .....                           | 49 |
| Slika 27. Promjena specifične energije prikupljene na kolektorima.....                     | 50 |
| Slika 28. Krivulja učinkovitosti vakuumskih kolektora .....                                | 51 |



**POPIS TABLICA**

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Karakteristike danskog sustava daljinskog grijanja .....                                                                                           | 12 |
| Tablica 2. Preporuke za dimenzioniranje spremnika [5] .....                                                                                                   | 23 |
| Tablica 3. Karakteristike solarnih kolektora.....                                                                                                             | 30 |
| Tablica 4. (HRN EN 10) Vrijednosti indeksa prozračnosti $k_T$ i koeficijenta osvjetljenosti $f_{ij}$ u ovisnosti o parametru prozračnosti $\varepsilon$ ..... | 33 |
| Tablica 5. Redoslijed koraka u proračunu toplinskog spremnika .....                                                                                           | 37 |
| Tablica 6. Veličine kolektorskog polja sa pločastim kolektorom .....                                                                                          | 41 |
| Tablica 7. Veličine kolektorskog polja sa vakuumskim kolektorom .....                                                                                         | 41 |
| Tablica 8. Vrijednosti insolacija za različite kutove nagiba kolektora .....                                                                                  | 43 |
| Tablica 9. Pregled analiziranih sustava.....                                                                                                                  | 44 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka         | Jedinica   | Opis                                                                       |
|----------------|------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $A_{kol}$      | $m^2$      | Površina kolektora                                                         |
| $F_1$          | -          | Cirkumsolarni koeficijent osvijetljenosti                                  |
| $F_2$          | -          | Horizontalni koeficijent osvijetljenosti                                   |
| $G_{sol;c}$    | $W/m^2$    | Solarna konstanta                                                          |
| $H_{tot}$      | $W/m^2$    | Ukupno sunčevo zračenje na nagnutu plohu                                   |
| $I_b$          | $W/m^2$    | Direktno zračenje na horizontalnu plohu                                    |
| $I_d$          | $W/m^2$    | Difuzno zračenje na horizontalnu plohu                                     |
| $I_{dif}$      | $W/m^2$    | Difuzno sunčevo zračenje na nagnutu plohu                                  |
| $I_{dirr}$     | $W/m^2$    | Direktno sunčevo zračenje na nagnutu plohu                                 |
| $I_{ext}$      | $W/m^2$    | Ekstraterestričko zračenje na nagnutu plohu                                |
| $I_{ref}$      | $W/m^2$    | Reflektirano sunčevo zračenje na nagnutu plohu                             |
| $I_{sol,h}$    | $W/m^2$    | Globalno sunčevo zračenje na nagnutu plohu u i-tom satu                    |
| $I_T$          | $W/m^2$    | Globalno sunčevo zračenje na nagnutu plohu                                 |
| $I_{uk}$       | €          | Ukupan iznos investicije sustava                                           |
| $k_T$          | -          | Indeks prozračnosti atmosfere                                              |
| $K$            | $rad^{-3}$ | Konstanta za izračun bezdimenzijskog parametra prozračnosti                |
| $m_{col,h}$    | kg/s       | Maseni protok fluida kroz kolektor                                         |
| $m_i$          | kg         | Masa vode u i-tom segmentu                                                 |
| $n_{day}$      | -          | Redni broj dana u godini                                                   |
| $N$            | -          | Ukupni broj solarnih kolektora                                             |
| $P$            | godina     | Period povrata investicije                                                 |
| $Q_b$          | kWh        | Dodatna toplinska energija plinskog kotla                                  |
| $Q_{H,nd}$     | kWh        | Potrebna toplinska energija za grijanje                                    |
| $Q_{b,sol}$    | MWh        | Toplinska energija kotla na prirodni plin u scenariju sa solarnim sustavom |
| $Q_{sto,h,bh}$ | kWh        | Toplinska energija pomoćnog grijača                                        |
| $Q_{dh,max}$   | kWh        | Maksimalni iznos toplinske energije kojeg je moguće iskoristiti            |
| $Q_{ex}$       | kWh        | Toplinska energija izmijenjena u izmjenjivaču topline                      |
| $Q_{ng}$       | MWh        | Toplinska energija kotla na prirodni plin u scenariju bez solarnog sustava |
| $Q_s$          | MWh        | Ukupna ušteda toplinske energije                                           |

|                        |                    |                                                                |
|------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------|
| $Q_{sto,Hvol,i}$       | kWh                | Toplinska energija uskladištena u i-ti segment spremnika       |
| $Q_{sol,gen,h,i}$      | kWh                | Toplinska energija solarnih kolektora pri vršnoj učinkovitosti |
| $Q_{sol,loop,out,h,i}$ | kWh                | Toplinska energija na izlazu iz solarnog kruga                 |
| $Q_{sol,out,h}$        | kWh                | Toplina koju kolektor predaje u toplovod solarnog kruga        |
| $Q_{sto,t}$            | kWh                | Ukupna uskladištena energija u spremniku                       |
| $Q_{sto,t}$            | kWh                | Ukupna uskladištena energija u spremniku                       |
| $Q_{t+1,i}$            | kWh                | Toplinska energija u trenutku t+1                              |
| $Q_w$                  | kWh                | Potrebna energija za pripremu potrošne tople vode              |
| $S$                    | €/god              | Ukupni iznos godišnje uštede                                   |
| $t_{ci}$               | h                  | Vremenski korak                                                |
| $T_h^*$                | m <sup>2</sup> K/W | Reducirana temperaturna razlika u kolektoru                    |
| $V_{sto}$              | m <sup>3</sup>     | Volumen spremnika                                              |
| $V_{sto,use,w}$        | m <sup>3</sup>     | Volumen vode koja se uzima za potrebe daljinskog grijanja      |
| $V_{sto,vol,i}$        | m <sup>3</sup>     | Volumen segmenta spremnika                                     |
| $\alpha$               | °                  | Kut između linije horizonta i središta sunčevog diska          |
| $\beta$                | °                  | Kut nagiba kolektora                                           |
| $\beta_{grnd}$         | °                  | Kut nagiba tla                                                 |
| $\gamma_{grnd}$        | °                  | Orijentacija tla u odnosu na jug                               |
| $\gamma_{surf}$        | °                  | Orijentacija površine kolektora u odnosu na jug                |
| $\delta$               | °                  | Kut nagiba zemljine osi prema ravnini orbite                   |
| $\phi$                 | °                  | Geografska širina                                              |
| $\eta$                 | -                  | Učinkovitost solarnog kolektora                                |
| $\vartheta_{kol,iz}$   | °C                 | Temperatura vode na izlazu iz kolektora                        |
| $\vartheta_{kol,ul}$   | °C                 | Temperatura vode na ulazu u kolektora                          |
| $\vartheta_{sr}$       | °C                 | Srednja temperatura vode u kolektoru                           |
| $\vartheta_{t,i}$      | °C                 | Temperatura i-tog segmenta spremnika                           |
| $\vartheta_{t+1,i}$    | °C                 | Temperatura i+1 segmenta spremnika                             |
| $\vartheta_{t-1,i}$    | °C                 | Temperatura i-1 segmenta spremnika                             |
| $\Delta\vartheta$      | °C                 | Promjena temperature                                           |

## SAŽETAK

Plan Europske unije je u bliskoj budućnosti u potpunosti zamijeniti fosilna goriva obnovljivim izvorima energije. Jedan od mogućih načina uvođenja obnovljivih izvora energije u sustave daljinskog grijanja je korištenjem solarnih sustava. Time je moguće je riješiti problem grijanja zgrada, pripremu potrošne tople vode te proizvodnju električne energije te tako postati neovisni o fosilnim gorivima, plinu te uvozu energenata. U ovom radu provedena je analiza sustava solarnog daljinskog grijanja na području grada Zagreba. Predviđeno je kako sustav treba pokriti potrebe za toplinskom energijom za 25 stambenih zgrada, odnosno 4000 ljudi. Izrađen je model prema izvedenim sustavima u Danskoj i Austriji (Graz). Sustav se sastoji od kolektorskog polja, sezonskog spremnika topline i dizalice topline. Sa strane učinkovitosti kolektora takvi sustavi se pokazuju boljim rješenjem u odnosu na solarne sustave s toplovodnim kotlom. Model se sastoji od proračuna potrebne energije za grijanje i pripremu potrošne tople vode, sunčevog zračenja na nagnutu plohu te modela kolektora i toplinskog spremnika prema normama HRN EN 15316-4-3:2017 i prEN 15316-5-2021. Kut nagiba kolektora korišten u simulacijama iznosi  $45^\circ$ . Simulacije modela provedene su za pločaste i vakuumske kolektore te za različite površine kolektorskih polja i kapaciteta spremnika kako bi se odabralo optimalno rješenje. Nakon detaljnih analiza, odabran je sustav kolektorskog polja sa vakuumskim kolektorima površine  $800 \text{ m}^2$  i volumena spremnika  $1000 \text{ m}^3$  sa dizalicom topline ( $\text{COP}=4,6$ ). Ukupna specifična prikupljena energija u kolektorima iznosi  $922 \text{ kWh/m}^2$  čime se pokriva 40,73% toplinskih potreba potrošača. Prosječna učinkovitost solarnih kolektora iznosi 0,6, a jednostavni period povrata investicije je prihvatljiv u odnosu na karakteristike sustava. Fotonaponski paneli odabrani su monokristalne strukture sa učinkovitošću od 0,15 prema EN 14316-4-6:2008. Dizalica topline sa fotonaponskim sustavom ima vrijednost SCOP-a 3. Konačna površina fotonaponskih panela iznosi  $1954 \text{ m}^2$ .

## SUMMARY

The plan of the European Union is to completely replace fossil fuels with renewable energy sources in the near future. One of the possible ways of implementing renewable energy sources into district heating systems is the use of solar systems. In this way it is possible to solve the problem of heating, domestic hot water preparation and electricity production, thus becoming independent of fossil fuels, gas and fuel import. In this work, an analysis of the solar district heating system in the area of the city of Zagreb has been carried out. Analyzed system should cover the heat energy consumption of 25 residential buildings, for 4000 people. A model was created based on the systems implemented in Denmark and Austria (Graz). The system consists of a solar collector field, a seasonal thermal energy storage and a heat pump. In terms of collector efficiency, such systems prove to be a better solution compared to solar systems with a hot water boiler. System with heat pump shows better results on the side of solar collector efficiency. The model consists of the calculation of the required energy for heating and domestic hot water preparation. Also, solar radiation on an inclined surface and the model of the collector and seasonal thermal energy storage have been calculated according to the standards HRN EN 15316-4-3:2017 and prEN 15316-5-2021. The collectors are mounted upright at an angle of  $45^\circ$  to the horizontal. Model simulations have been carried out for flat plate and evacuated tubular collectors and for different surfaces of collector fields and tank capacities in order to choose the optimal solution. After detailed analyses, a collector field system with evacuated tubular collectors of  $800 \text{ m}^2$  surface area and  $1000 \text{ m}^3$  storage volume with a heat pump ( $\text{COP}=4.6$ ) was selected. The total specific energy collected in the collectors is  $922 \text{ kWh/m}^2$ , which covers 40.73% of the heat energy consumption. The average efficiency of solar collectors is 0.6 and the simple investment return period is acceptable in relation to the characteristics of the system. Photovoltaic panels with monocrystalline structure are selected with an efficiency of 0.15 according to standard EN 14316-4-6:2008. The heat pump with the photovoltaic system has a SCOP value of 3. The final surface of the photovoltaic panels is  $1954 \text{ m}^2$ .

## 1. UVOD

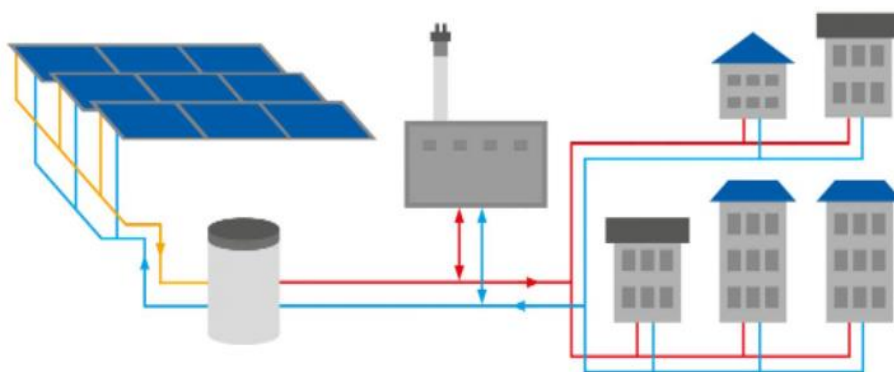
Suočeni sa problemima današnjice kao što su poskupljenja energenata te pitanje njihove dostupnosti Europi u bliskoj budućnosti, potrebno je što prije zamijeniti fosilna goriva obnovljivim izvorima energije. Plan Europske unije je u bliskoj budućnosti u potpunosti zamijeniti fosilna goriva solarnom energijom, energijom vjetera i vode. Koristeći energiju Sunca, moguće je riješiti problem grijanja zgrada, pripremu potrošne tople vode te proizvodnju električne energije te tako postati neovisni o fosilnim gorivima, plinu te uvozu energenata. Kako će daljinska grijanja morati uključivati obnovljive izvore energije i s vremenom u što većoj mjeri prijeći na njih kao jedno od rješenja se nameće solarno daljinsko grijanje. Solarno daljinsko grijanje je koncept iskorištavanja Sunčeve energije u kombinaciji s toplinarstvom. Radi se o tehnologiji iskorištavanja sunčeve energije u velikim razmjerima gdje se energija iz velikih kolektorskih polja putem toplinskih mreža distribuira korisnicima. Ova tehnologija omogućava opskrbu energijom sa smanjenim emisijama štetnih plinova. Takav način postavljanja sustava jest jednostavniji te istraživanja pokazuju da je u konačnici jeftiniji od instalacije kolektora i sustava pojednično na krovove. Prva takva postrojenja i dobri primjeri u praksi, izgrađeni su na sjeveru Europe 80-tih godina prošlog stoljeća. Zemlje koje prednjače u sustavima solarnog daljinskog grijanja su Danska, Švedska, Njemačka i Austrija. Trenutno u Europi postoji više od 300 postrojenja iznad 350 kWh. Ukupan kapacitet instaliranih postrojenja u cijeloj Europi je 1100 MWh. U zadnjih pet godina bilježi se rast od 35% godišnje diljem cijele Europe te je planirana implemetacija i razvoj postrojenja u sve države EU kada za njih visoki investicijski troškovi budu prihvatljivi.

Prednosti i benefiti ovakvog načina grijanja su stabilne cijene u narednih 25 godina zato što cijene goriva u manjoj mjeri utječu na sustav. Trenutno, energija proizvedena pomoću Sunca doseže cijenu od 30-50 eura po MWh bez subvencija prema podacima istraživanja u Danskoj [1]. Također, direktno doprinose smanjenju emisija CO<sub>2</sub> i samim time boljoj kvaliteti zraka na lokalnoj razini. Ono što je najvažnije je da je solarno zračenje u Europi dovoljno za implementaciju sustava na bilo kojoj lokaciji. Na jednom hektaru zemlju prema danskim izvedbama sustava moguće je proizvesti 2 GWh energije godišnje [1]. Najveći izazov investitora je pronaći područja za postavljanje kolektorskih polja tako da su ona blizu mreži daljinskog grijanja. Kolektorska polja mogu biti postavljena na zemlji ili krovovima zgrada čime se povećava cijena investicije. Lokalna

mreža solarnog daljinskog grijanja je dobra opcija za grijanje obnovljenih zgrada ili kvartova u izgradnji. Najčešće, u konvencionalnim sustavima u zgradarstvu solarna energija pokriva 20% od ukupne potrebne energije za grijanje, dok korištenjem sezonskog spremnika učinkovitost se može povećati i do 50%.

Većina sustava daljinskog grijanja koristi energiju biomase te je također cilj u što većoj mjeri zamijeniti biomasu kao gorivo Suncem. Česta je implementacija solarnih kolektora u već postojeći sustav daljinskog grijanja sa kotlovima na biomasu. Glavni pokretač primjene takvih sustava je izbjegavanje djelomičnog opterećenja kod kotlova te povećanje učinkovitosti cijelog sustava. Samim time dolazi do značajnog smanjenja zagađivača kao što su prašina, dušikovi oksidi, ugljikov dioksid te ugljikov monoksid. Na Slici 1. prikazana je općenita shema spajanja kolektorskih polja na spremnik, toplane koja pokriva preostale potrebe za toplinskom energijom te daljnjom distribucijom do korisnika.

U novije vrijeme, česta je implementacija dizalica topline u sustave daljinskog grijanja. Osim solarnih kolektora, kako bi se pokrile potrebe i električne energije primjenjuju se fotonaponski paneli. Izvedbe takvih sustava također su opisane i analizirane u ovome radu.

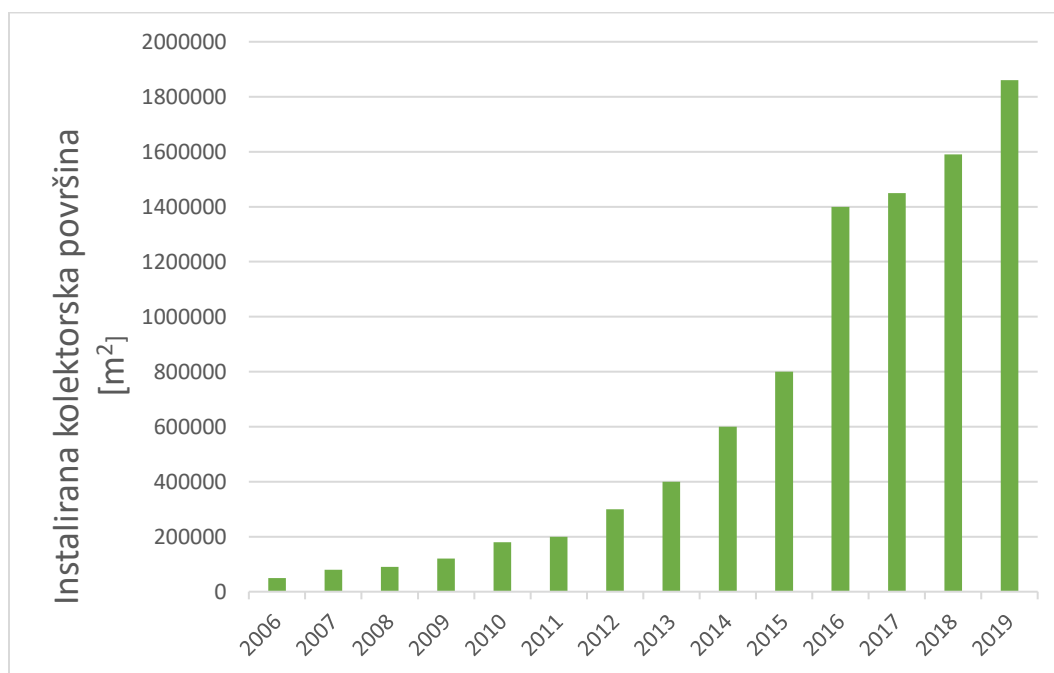


Slika 1. Shema spajanja kolektorskih polja sa potrošačima

## 2. PRIMJENA SUSTAVA DALJINSKOG GRIJANJA

### 2.1. Danski sustav

Kao uzor u primjeni solarnih sustava daljinskog grijanja zasigurno je Danska. Tijekom prošlog desetljeća bilježi se veliki porast instaliranih sustava te se planira njihovo širenje. Kako bi danski model bio primjenjiv u ostalim zemljama, potrebno je istražiti mogući potencijal prema danskim smjernicama. Na Slici 2. može se vidjeti ukupna površina prekrivena kolektorima u Danskoj kroz zadnje desetljeće. Parametri koje je potrebno uzeti u obzir prilikom projektiranja solarnog daljinskog grijanja su velična kolektorskog polja, povezivanje i udaljenost postojeće mreže daljinskog grijanja. Važan faktor su naravno populacija i njezine potrebe za toplinskom energijom bilo za grijanje ili potrošnu toplu vodu. Nakon toga slijedi korisnost solarnog sustava te kapacitet i vrsta spremnika. Na kraju 2016.godine u Danskoj je instalirano 104 solarne toplane. Većina kolektorskih polja je manja od 25 000 m<sup>2</sup>, dok je devet njih veće i doseže veličinu od 170000 m<sup>2</sup> [1].

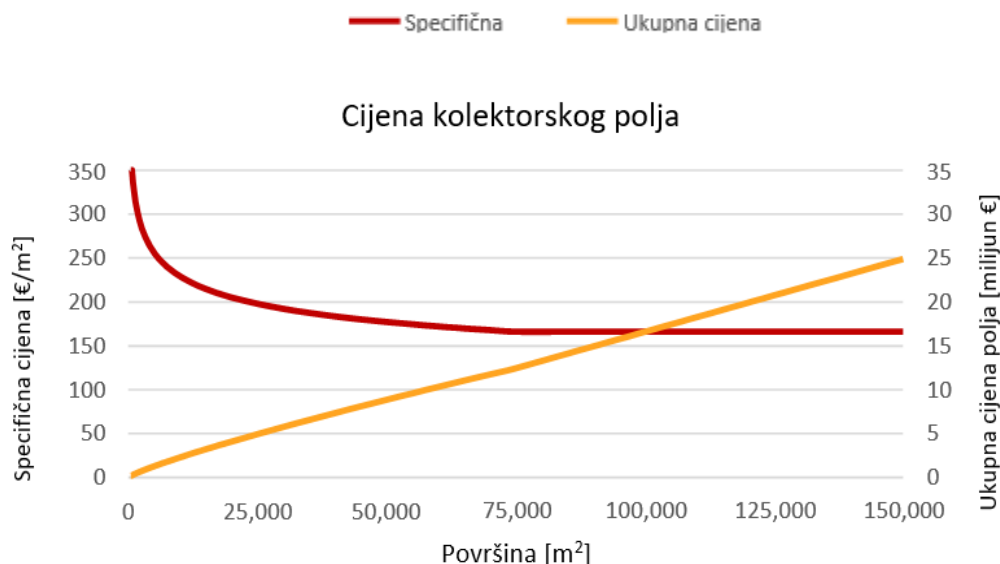


Slika 2. Udio kolektorskih površina u Danskoj [1]



### 2.1.1. Cijena i veličina sustava solarnog daljinskog grijanja

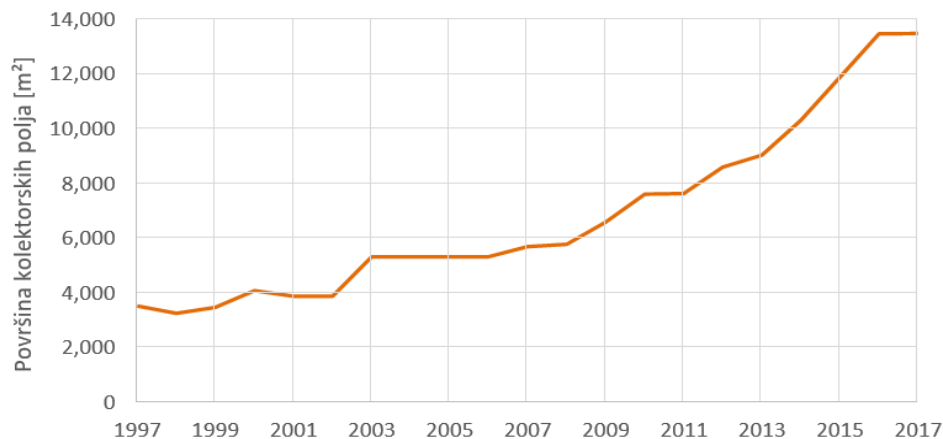
Upravo zbog velikog broja novih instalacija i razvoja tehnologije, cijene u Danskoj su u neprestanom porastu. Na temelju danskih iskustava, izrađena je krivulja troškova cijene solarnog kolektorskog polja u funkciji veličine kolektorskog polja te prikazana na Slici 3. Cijena je za kompletna kolektorska polja i uključuje kolektore, cijevi u kolektorskom polju, instalaciju, glavne komponente za rad, kontrolu, regulaciju i nadzor, ali isključuje specifične troškove lokacije kao što su izgradnja, skladištenje toplinske energije, dalekovode, površinu zemljišta i poravnavanje tla. Za male sustave cijena je do 350 €/m<sup>2</sup>. Za postrojenja veća od 75.000 m<sup>2</sup> trošak je manji od polovice (oko 170 €/m<sup>2</sup>). Iznad ove veličine ne očekuje se daljnje smanjenje cijene zbog ekonomije razmjera. Većina danskih sustava je u rasponu cijene od 200-250 €/m<sup>2</sup> [1].



Slika 3. Cijena kolektorskog polja u funkciji veličine polja [1]

Betonski blokovi, koji su se prije koristili kao temelj za kolektorske module, danas se često zamjenjuju lakšim čeličnim profilima koji se zabijaju u zemlju. To je dovelo do nižih troškova te lakše i brže instalacije. Osim toga, nema potrebe da se tlo potpuno izravna, jer kada kolektorsko polje prati polje, rezultira usklađenijim krajolikom. Kako se prosječna veličina polja solarnih kolektora povezanih s elektranama za daljinsko grijanje stalno povećavala tijekom posljednja dva desetljeća, kombinirani učinak ekonomije razmjera i veće učinkovitosti doveo je do sve većeg

omjera učinkovitosti i troškova tijekom godina. Na Slici 4. može se vidjeti kako se tokom godina povećavala površina kolektorskih polja.

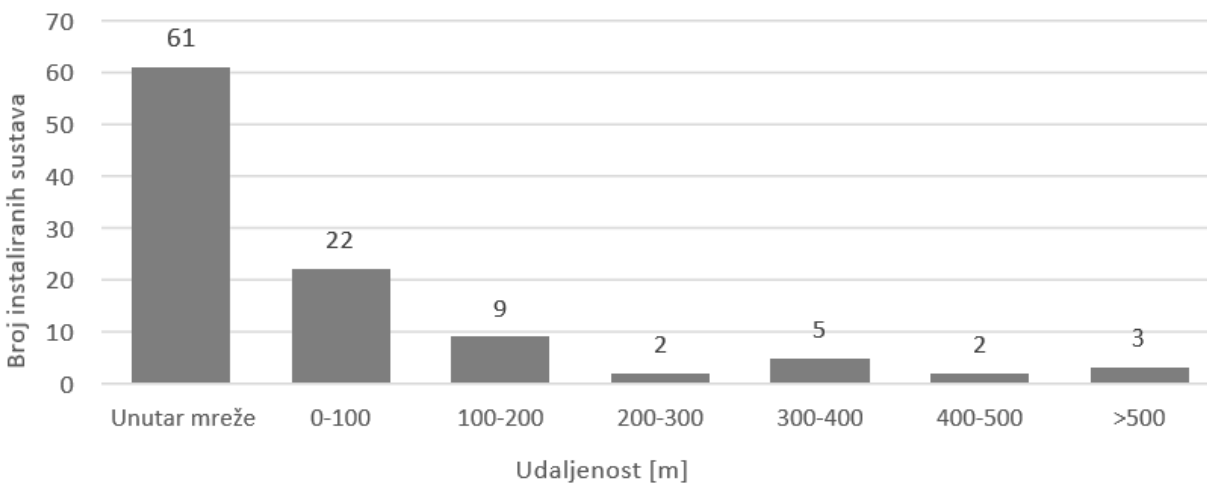


Slika 4. Prosječna površina kolektora po godinama [1]

### 2.1.2. Smještaj i udaljenosti sustava

Godišnji solarni dobici iz 48 sustava solarnog daljinskog grijanja kreću se između 321 i 500 kWh/m<sup>2</sup>, u prosjeku je to 409 kWh/m<sup>2</sup> (bruto površina). Udio sunčevog zračenja na kolektorima koji se pretvara u korisnu toplinsku energiju kreće se između 27 % i 42 %, s prosjekom od 36 %. [1] Promatrajući udaljenost kolektorskih polja od mreže daljinskog grijanja od, 59% njih postavljeno je unutar mreže, a 41% izvan postojeće mreže daljinskog grijanja. Prosječna udaljenost kolektora izvan mreže iznosi 177 m. Dana udaljenost je zapravo linearna udaljenost od solarne termoelektre do mreže daljinskog grijanja, a ne stvarna duljina cjevovoda, te je stoga samo indikativna udaljenost. Stvarna duljina cjevovoda za daljinsko grijanje do mreže ovisi o drugim uvjetima, kao što je postojeća infrastruktura. Često se veza uspostavlja izravno. U Danskoj se obradivo zemljište često može kupiti ili iznajmiti za potrebe solarnog daljinskog grijanja relativno blizu mreže daljinskog grijanja. Stoga, danski primjeri nisu nužno gornja granica za takve udaljenosti. Položaj polja solarnih kolektora kritičan je parametar koji utječe na izvedivost u smislu njegovog utjecaja na ukupne troškove, odnosno dodavanje prijenosnih cijevi između kolektorskog polja i mreže. Troškovi iskopa prijenosnih cijevi uvelike ovise o cijeni rada i vrsti tla koje se iskapa

(uz ulicu, cestu, itd.). Na Slici 5. može se vidjeti koliki iznosi linearna udaljenost 104 danska sustava u odnosu na mrežu daljinskog grijanja.

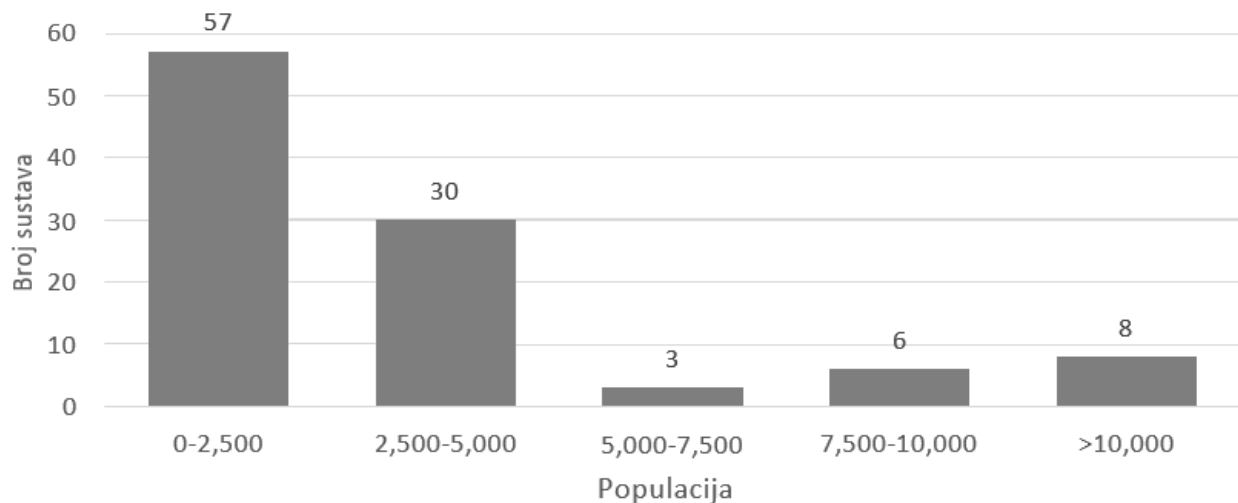


Slika 5. Udaljenost sustava solarnih kolektora od mreže daljinskog grijanja [1]

### 2.1.3. Populacija

Stanovništvo gradova na koje se spaja mreža solarnog sustava kreće se između 250 i 44 000 stanovnika. Većina postrojenja u Danskoj povezana je s malim gradovima. Od 104 sustava, njih 96 se nalazi u gradovima s manje od 10 000 stanovnika. Prosječan grad koji koristi solarno daljinsko grijanje ima oko 4 000 stanovnika. Brojke pokazuju kako je solarno daljinsko grijanje posebno pogodno za male gradove i za to postoji nekoliko razloga. Prvo, tržište još nije u potpunosti razvijeno; mala postrojenja za daljinsko grijanje prednjačila su u tehnologiji solarnog daljinskog grijanja. Drugo, u Danskoj su cijene toplinske energije u prosjeku puno veće u manjim gradovima. Do toga dolazi zbog većih relativnih toplinskih gubitaka u mreži te visoke cijene proizvodnje topline uglavnom zbog korištenja prirodnog plina koji je visoko oporezovan. U velikim gradovima toplinska energija se obično proizvodi u velikim postrojenjima za kombiniranu toplinsku i električnu energiju koja spaljuju otpad, biomasu ili ugljen. Osim toga, zemljišta pogodna za polja solarnih kolektora obično su bliže postrojenjima za daljinsko grijanje u manjim

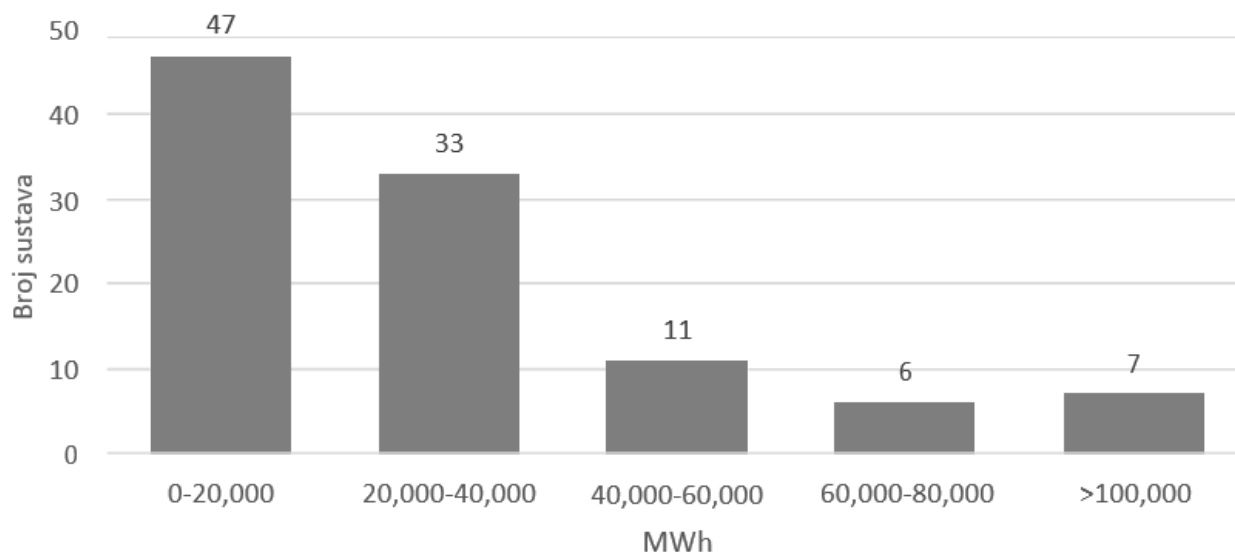
gradovima. Na Slici 6. vidi se odnos broja instaliranih postrojenja i broja stanovnika u gradovima sa solarnim daljinskim grijanjem.



Slika 6. Broj stanovnika u gradovima sa solarnim daljinskim grijanjem [1]

#### 2.1.4. Toplinski zahtjevi

Zahtjevi za toplinskom energijom kreću se između 3 000 i 380 000 MWh, prosjek zahtjeva iznosi 40 000 MWh. Širok raspon nam govori kako je moguće primijeniti koncept solarnog daljinskog grijanja na različite gradove, odnosno države. Sustavi solarnog daljinskog grijanja većinom se ne nalaze u blizini velikih gradova, osim njih nekoliko na periferiji Kopenhaga. Omjer instalirane površine kolektora i godišnje potrošnje energije kreće se između 0,01 m<sup>2</sup>/MWh i 1,8 m<sup>2</sup>/MWh, dok najveći broj sustava ima omjer od približno 0,5 m<sup>2</sup>/MWh. Optimalni omjer za svaki sustav ovisi o graničnim uvjetima kao što su temperature i kapacitet skladištenja topline. Kod vrlo malih omjera, skladištenje topline može se izostaviti (barem ako su preostale jedinice za proizvodnju topline fleksibilne). S druge strane, svi danski sustavi s omjerom većim od 1 m<sup>2</sup>/MWh uključuju sezonsko skladište toplinske energije. Na slici 7. dan je prikaz 104 sustava instaliranih u Danskoj te toplinski zahtjevi na njih u MWh [1].



Slika 7. Toplinski zahtjevi na sustave solarnog daljinskog grijanja [1]

### 2.1.5. Stupanj prekrivanja solarnog sustava

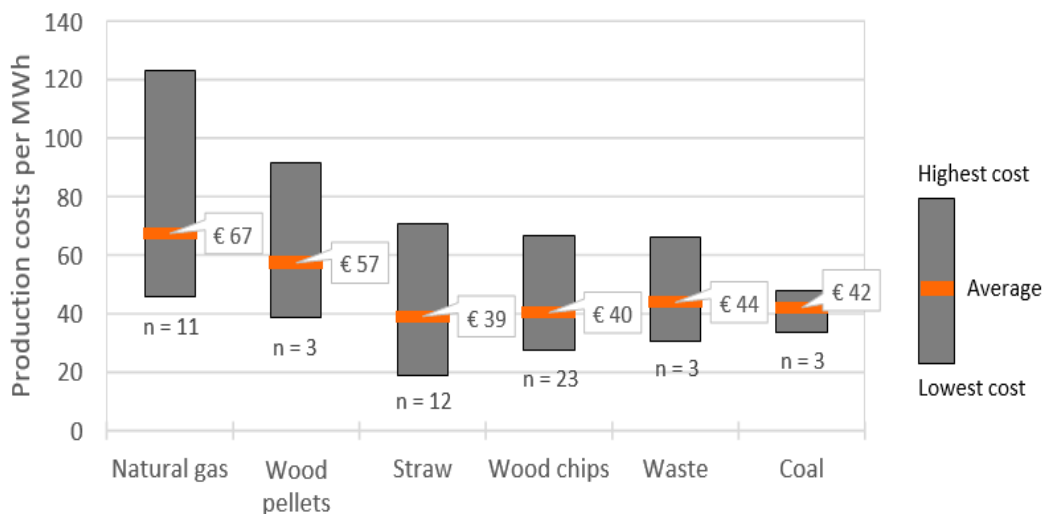
Stupanj prekrivanja solarnog sustava temelji se na proizvodnji toplinske energije i smatra se udjelom topline isporučene u mrežu daljinskog grijanja koji je pokriven solarnom toplinom. Kreće se u rasponu od 16 do 24%, dok većina vrijednosti je koncentrirana oko približno 20 %. Proizvodnja topline iz solarnih termoelektrana procjenjuje se ili iz izmjerenih godišnjih toplinskih performansi svakog sustava ili prosječne vrijednosti učinka od 409 kWh po m<sup>2</sup> kolektorske površine.

Za danske uvjete stupanj prekrivanja od oko 20 % odgovara količini sunčeve topline koja se može isporučiti u mrežu daljinskog grijanja bez potrebe za aktivnim mjerama izbjegavanja stagnacije kolektorskog polja. Ako su izračuni detaljniji u dimenzioniranju i operateri provode pažljivu strategiju upravljanja kako bi osigurali da se spremnik za skladištenje i kolektori ne pregrijavaju, korisnost se može lagano povećati bez dodatnih mjera opreza. Opcija noćnog hlađenja sastoji se od cirkulacije tekućine u petlji solarnog kolektora tijekom noći kako bi se ohladilo skladište. Na taj način skladište može podnijeti sunčevu toplinu proizvedenu nadolazećeg dana, jer se kolektorsko polje u većini slučajeva ne može isključiti. Sigurnosni postupci temeljeni na vremenskoj prognozi i stanju napunjenosti skladišta mogu se implementirati u strategiju

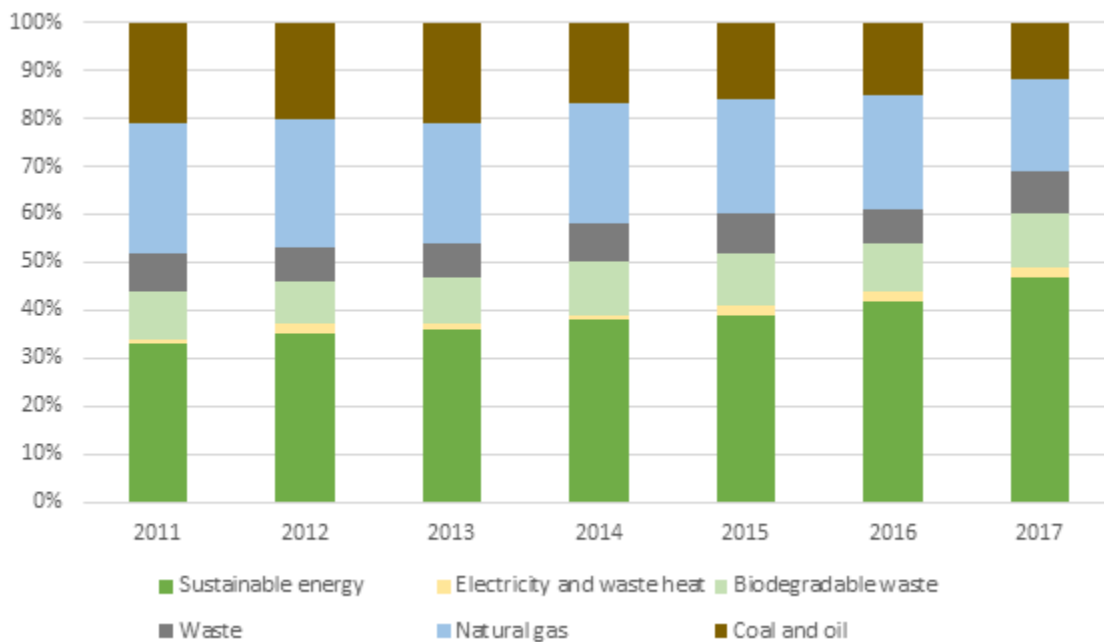
upravljanja postrojenjem. Međutim, učinkoviti kolektori tijekom noći mogu rashladiti samo oko 1/3 jednodnevne proizvodnje topline. Stoga se ovo rješenje ne može nositi s prevelikim sustavima. Više temperature u solarnim kolektorima, koje proizlaze iz visoke temperature vode u sezonskom spremniku, za posljedicu imaju lošiju učinkovitost kolektora nego tijekom normalnog rada. To "pomaže" smanjiti proizvodnju sunčeve topline tijekom dana. Također je moguće lagano povišiti temperaturu mreže kako bi se privremeno povećali toplinski gubici mreže i izbjeglo pregrijavanje. U nekim slučajevima ekonomska optimizacija rezultira namjernim predimenzioniranjem sustava, što zahtijeva aktivno hlađenje u određenim razdobljima tijekom ljeta. Zbog ograničenih mogućnosti noćnog hlađenja opisanih gore, u ovom slučaju su potrebni suhi rashladni uređaji. Takav koncept nije korišten tijekom ovog rada, ali je dobar primjer kako još više unaprijediti sustav.

#### **2.1.6. Cijene toplinske energije**

U mnogim slučajevima opskrba toplinom se sastoji od mješavine različitih goriva, što otežava odvajanje ukupnih troškova povezanih sa svakom jedinicom za proizvodnju topline. To je razlog relativno malog broja primjera prikazanih na Slici 8. Na slici je prikazano 55 danskih toplana gdje je prikazana njihova proizvodnja i prosječna cijena. Na instalaciju solarnog daljinskog grijanja utječu i drugi čimbenici osim troškova goriva. Odlaganje urbanog otpada spaljivanjem, automatski proizvodi toplinu koja se može iskoristiti u mreži centralnog grijanja i samim time sustav solarnog daljinskog grijanja nije izvediv. Slika također pokazuje da termoelektrane koje koriste prirodni plin kao primarno gorivo obično imaju najveće troškove proizvodnje. Stoga su rješenja solarnog daljinskog grijanja izvediva kada zamjenjuju toplinu na bazi prirodnog plina, a ne slamu, drvenu sječku, spaljivanje otpada ili ugljen. Koliko je upotreba obnovljivih izvora energije u grijanju značajna vidi se u cijeni i smanjenju emisija štetnih plinova. Na slici 9. je prikazano koliki postotak u grijanju zauzimaju fosilna goriva u odnosu na energiju iz obnovljivih izvora energije. U 2017. godini u Danskoj je energija dobivena iz fosilnih goriva iznosila oko 10%, dok energija iz obnovljivih izvora oko 50% [1].



Slika 8. Troškovi proizvodnje toplinske energije u odnosu na gorivo u 55 toplana [1]



Slika 9. Udio energija za grijanje u Danskoj [1]

### 2.1.7. Volumen spremnika solarne energije

Tipično rješenje za sustave solarnog daljinskog grijanja je cilindrični čelični spremnik smješten iznad zemlje, koji se koristi kao dnevno skladište. Spremnik je izoliran i prekriven vanjskom ljuskom koja održava izolaciju suhom. Na samom vrhu spremnika nema vode, jer spremnik nije pod tlakom i mora postojati prostor za toplinsko širenje i skupljanje. Sustav za opskrbu dušikom instaliran na vrhu spremnika izbjegava koroziju uzrokovanu okolnim zrakom. Osim dnevnog spremnika, kod većih postrojenja koristi se i sezonski spremnik najčešće pod zemljom. Obično je čelični spremnik već instaliran u postrojenju za grijanje vode, zato što većina postrojenja zainteresiranih za solarni sustav grijanja su kogeneracijske elektrane na prirodni plin, koje koriste akumulacijski spremnik za ujednačavanje fluktuacija potražnje i za proizvodnju električne i toplinske energije kada je cijena električne energije visoka. Toplina se tada pohranjuje sve dok za njom ne postoji potreba, kada je cijena električne energije niska. Za sezonska skladišta ne postoji tipičan omjer između volumena skladišta i površine kolektora jer se on kreće između 1,7 i 2,9. Ovaj široki raspon uzrokovan je razlikama u konstrukciji skladišta i različitim okolnostima povezanih termoelektrana (strategija rada, mješavina goriva, itd.). Solarna toplina nije nužno pohranjena nekoliko mjeseci prije nego što se iskoristi, što gubitke minimizira na oko 10 % u prosjeku. U nekim slučajevima, ekonomičnost cjelokupne opskrbe toplinom je optimizirana korištenjem skladišta i za druge proizvodne jedinice osim polja solarnog kolektora. Zapravo, glavni cilj je za daljinsko grijanje postići najnižu moguću cijenu toplinske energije za kupce.

Prema danskom sustavu postoje tri glavne izvedbe solarnih kolektora unutar sustava daljinskog grijanja. Prvi način je kolektorsku površinu direktno spojiti u veliki sustav daljinskog grijanja pri čemu nije potreban spremnik i energija iz kolektora pokriva samo mali dio opterećenja. Tada su kolektori smješteni na krovove zgrada. Drugi način je izvedba kolektorske površine sa buffer spremnikom. Ta izvedba je najčešća i najučinkovitija. Procijenjuje se kako na kvadrat kolektorske površine je potrebno od 0,1 do 0,3 m<sup>3</sup> spremnika. Tom izvedbom moguće je pokriti od 10 do 30% opterećenja. U tom slučaju preferira se kombinacija sa kotlom na biomasu. Treći način je izvedba velikih sustava kolektora sa sezonskim spremnikom. U tom slučaju potrebno je na kvadrat površine kolektora dimenzionirati spremnik od 1 do 3 m<sup>3</sup>. Tom izvedbom moguće je



pokrivanje od 40 do 70% opterećenja. Analizom i detaljnim proučavanjem danskog sustava i primjenjenih tehnologija dobiveni su rezultati koji opisuju tipičan danski sustav (Tablica 1.) [1].

Tablica 1. Karakteristike danskog sustava daljinskog grijanja

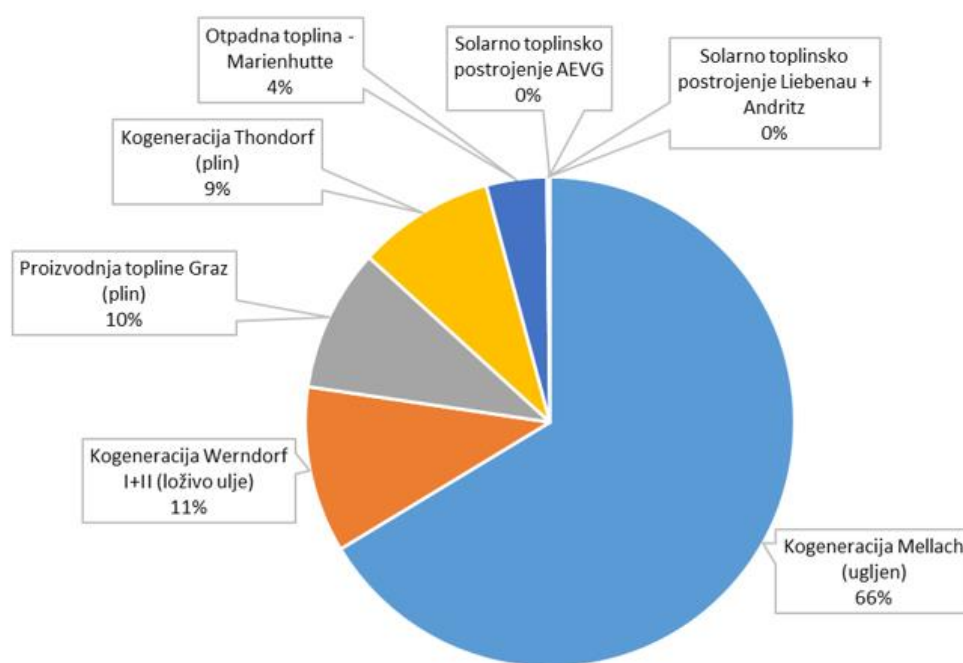
| <b>Karakteristike danskog sustava</b> |                              |
|---------------------------------------|------------------------------|
| <b>Veličina sustava</b>               | 5000 – 15 000 m <sup>2</sup> |
| <b>Godišnja proizvedena energija</b>  | 400 kWh/m <sup>2</sup>       |
| <b>Investicija</b>                    | 1,3 – 3 milijuna eura        |
| <b>Postotak pokrivanja potreba</b>    | 20%                          |
| <b>Broj potrošača</b>                 | 4000 (mali grad)             |
| <b>Udaljenost od mreže</b>            | 200 m                        |

## 2.2 Big Solar Graz

Daljinsko grijanje je tijekom godina postalo središnja tehnologija za opskrbu toplinom i potrošnom toplom vodom u sektoru stambenih i uslužnih zgrada grada Graza. Potrebna energija za grijanje i potrošnu toplu vodu u stambenim i uslužnim zgradama Graza iznosila je približno 2100 GWh u 2009.godini, a trenutno se procjenjuje na 2400 GWh godišnje. Razvoj mreže daljinskog grijanja u Grazu započeo je 1963. godine s početnim radom elektrane. Zahvaljujući stalnom proširenju mrežne centralnog toplinskog sustava, udio opskrbe toplinskom energijom daljinskog grijanja stalno se povećavao tijekom godina. Podaci iz 2013.godine pokazuju kako se daljinskim grijanjem pokriva približno 1000 GWh godišnje, odnosno 39% ukupne potražnje za toplinom i planira se značajno proširiti u narednim godinama. Proizvodnja topline za Graz uglavnom se dobivala iz otpadne topline fosilnih elektrana na kombiniranu toplinsku i električnu energiju u okolini Graza. Operater ovih postrojenja najavio je njihovo zatvaranje 2020. godine, a time se mora naći zamjena za pokrivanje 80% toplinske energije. Stoga je 2014. godine formiran projektni tim za pronalaženje različitih opcija za opskrbu toplinom za grijanje u Grazu i okolnim zajednicama za 2020/30 [2].

### 2.2.1. Opis postojećeg centralnog toplinskog sustava

Sustav topline u Grazu je sustav vode s radnom temperaturom do 120°C zimi i oko 75°C ljeti, a povratne temperature iznose približno 60°C. Sustav radi tijekom cijele godine, a toplina dolazi iz raznih elektrana, ali prvenstveno iz kogeneracijskih termoelektrana. Cijevi daljinskog grijanja su promjera između 25 mm i 600 mm. Unutar tih promjera ugrađuju se različite vrste glavnih transportnih, bočnih i kućnih priključnih cijevi. Ukupna duljina cjevovoda iznosi 370 km, dok broj priključenih kućanstava iznosi 54 000. Slika 10. prikazuje udjele proizvedene energije prije implementacije solarnog sustava [2].

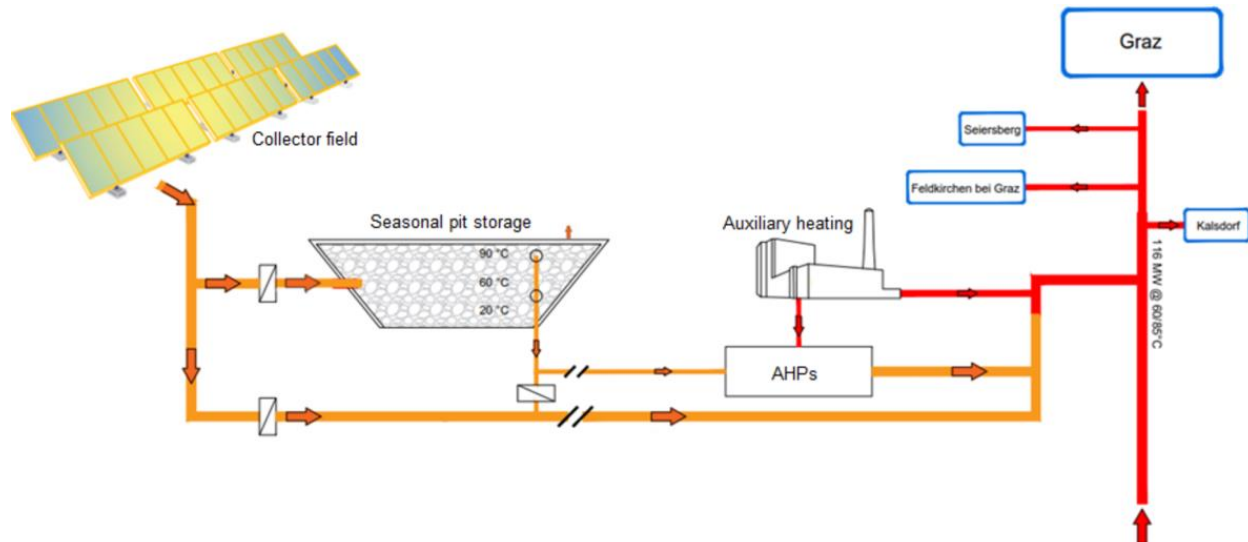


Slika 10. Udjeli proizvedene energije u Grazu [2]

### 2.2.2 Opis sustava sa solarnim kolektorima

U lipnju 2015. godine tvrtka S.O.L.I.D. dobila je zadatak da u suradnji s regionalnim dobavljačem energije Energie Steiermark izradi tehničku i ekonomsku analizu za integraciju velikog solarnog toplinskog sustava u mrežu daljinskog grijanja u Grazu. Projekt se realizirao uz tehničku pomoć PlanEnergi, danske konzultantske tvrtke, koja ima veliko iskustvo u modeliranju dinamičkih simulacija za velike solarne toplinske sustave i sezonska skladišta. Obećavajući

koncept bio je solarni toplinski sustav velikih razmjera, uključujući sezonska skladišta i dizalice topline. Potrebno je bilo odrediti optimalnu veličinu solarnog sustava kako bi se najbolje integrirao u postojeći sustav daljinskog grijanja. Cijena s kojom se treba usporediti sustav solarnog daljinskog grijanja je trošak proizvodnje topline iz plinskih kotlova. Kako bi se ispitala isplativost projekta, provedena je studija koja je uključivala prikupljanje podataka, dinamičke simulacije energetske tokova, ekonomsku analizu, procjenu raspoloživog zemljišta te veličinu spremnika topline. Prvi rezultati pokazuju najbolju veličinu sustava između 150.000 m<sup>2</sup> i 650.000 m<sup>2</sup>, osiguravajući od 9 do 26% energije dobivene iz solarnih kolektora. Rezultati pokazuju veliki potencijal da veliki solarni sustav bude izvediv koncept za gradsko grijanje u Grazu. Slika 11. pokazuje kako je zamišljen koncept sustava. Međutim, potrebno je napomenuti da se veličina kolektorskog polja, jame za skladištenje i apsorpcijske dizalice topline simuliraju između određenog raspona, kako bi se pronašao optimalan sustav za dimenzioniranje svake komponente. Apsorpcijske dizalice topline imaju ključnu ulogu u ovom konceptu, što dovodi do bitnog poboljšanja proizvodnje topline dobivene iz kolektora. Za prvu procjenu potencijala koncepta, opterećenje mreže daljinskog grijanja podijeljen je u dva dijela. Niskotemperaturni dio je pokriven preko solarnih kolektora i spremnika topline direktno ili putem apsorpcijske dizalice topline. Visokotemperaturni dio osigurava se preko plinskih kotlova. Ovim sustavom predviđeno je pokrivanje toplinskih potreba za 120 000 stanovnika Graza. Planovi razvoja predviđaju da će 2020. godine sustav pokrivati 46%, a do 2030. godine 56% toplinskih potreba grada [2].



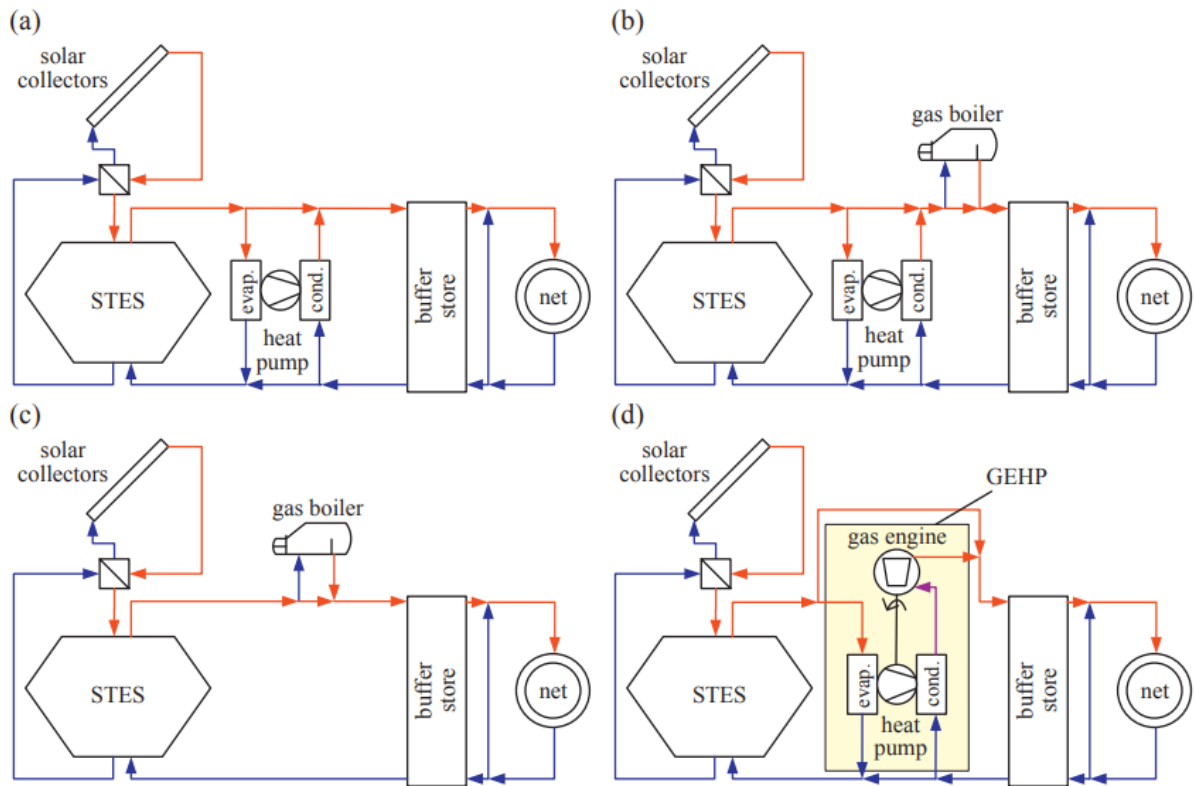
Slika 11. Konceptualno rješenje Big Solar Graz [2]

Simulacije rada sustava provedene su u računalnom programu TRNSYS za površine kolektora od 20 000 do 1 000 000 m<sup>2</sup> te veličine spremnika od 100 000 do 2 000 000 m<sup>3</sup>. Snaga apsorpcijske dizalice topline odabrana je u rasponu od 0,5 do 100 MW. Na temelju provedenih simulacija zaključeno je kako je tehnički i ekonomski izvedivo izgraditi veliko solarno postrojenje sa sezonskim spremnikom topline i apsorpcijskim dizalicama topline. Cijena toplinske energije konkurira cijeni topline proizvedenoj u plinskim kotlovima. Unatoč visokim ulaganjima, period povrata investicije je ekonomski opravdan. Veličina projekta je vrlo fleksibilna te se može prilagoditi površini dostupnog zemljišta bez većih posljedica na isplativost projekta [2].

### 2.3 Karakteristike postojećih sustava solarnog daljinskog grijanja

Kako bi se odabralo najučinkovitije i ekonomski prihvatljivo rješenje sustava solarnog daljinskog grijanja na području grada Zagreba, provedena je detaljnija analiza postojećih sustava diljem Europe. Solarno daljinsko grijanje u kombinaciji sa sezonskim skladištenjem toplinske energije tehnologija je koja ima potencijal osigurati toplinu za grijanje prostora i pripremu potrošne tople vode s visokim udjelom obnovljive energije. Sustavi su obično projektirani za opskrbu toplinom najmanje 100 stanova i pritom se postavljaju površine solarnih kolektora veće od 1 000 m<sup>2</sup>. Kako bi se uravnotežila sezonska neusklađenost između visokog solarnog prinosa ljeti i velike

potražnje za toplinom zimi, centralizirani sezonski spremnik topline integriran je u sustav daljinskog grijanja. Na temelju rezultata praćenja i popratnih istraživanja rada tih sustava otkriveno je da su karakteristike sustava rijetko odgovarale procijenjenim brojkama. Često razvoj četvrti u smislu izgradnje stanova i priključenja na mrežu daljinskog grijanja kao i izgradnje područja solarnih kolektora odstupa od planiranih brojki. Stoga dimenzija komponenti u sustavu i njihovo ponašanje ne odgovara opterećenju mreže daljinskog grijanja i solarnom prinosu kolektora. Nadalje, željene niske neto temperature povrata za daljinsko grijanje od 30-40 °C se rijetko postižu. Kako bi se poboljšala učinkovitost sustava, u njih se integriraju dizalice topline. Kod rada sa dizalicom topline povećava se toplinski kapacitet i temperatura povratnog voda u sezonski spremnik može imati niže temperature. Također, zbog nižih temperatura gubici topline su pritom smanjeni. Solarni kolektori također imaju koristi od nižih razina temperatura postizanjem većih solarnih dobitaka. Cijeli je sustav manje osjetljiv na visoke temperature povrata daljinskog grijanja. Obično su dizalice topline integrirane u sustave na takav način da se sezonski spremnik topline koristi kao niskotemperaturni izvor topline. Ne koriste se nikakvi drugi izvori topline iz okoline i samo se ona količina energije koju troši dizalica topline dodatno dovodi u sustav. Osnovni koncepti sustava sa sezonskim spremnikom topline (STES) i njihove sheme prikazani su na Slici 12. Na shemi a) prikazan je sustav sa dizalicom topline, shema b) uz dizalicu topline kao pomoćni izvor nalazi se plinski kotao dok na shemi c) samo plinski kotao. Shema d) sastoji se od dizalice topline sa integriranom plinskom turbinom. Po uzoru na dane sustave, u ovome radu provedena je detaljna simulacija sustava solarnog daljinskog grijanja na području grada Zagreba. Odabran je sustav sa kolektorskim poljem spojenim na sezonski spremnik toplinske energije. Spremnik je povezan sa dizalicom topline koja može raditi na niskim temperaturama te ukoliko dizalica neće moći pokriti potrebu za grijanjem i pripremu potrošne tople vode, upaliti će se kotao.



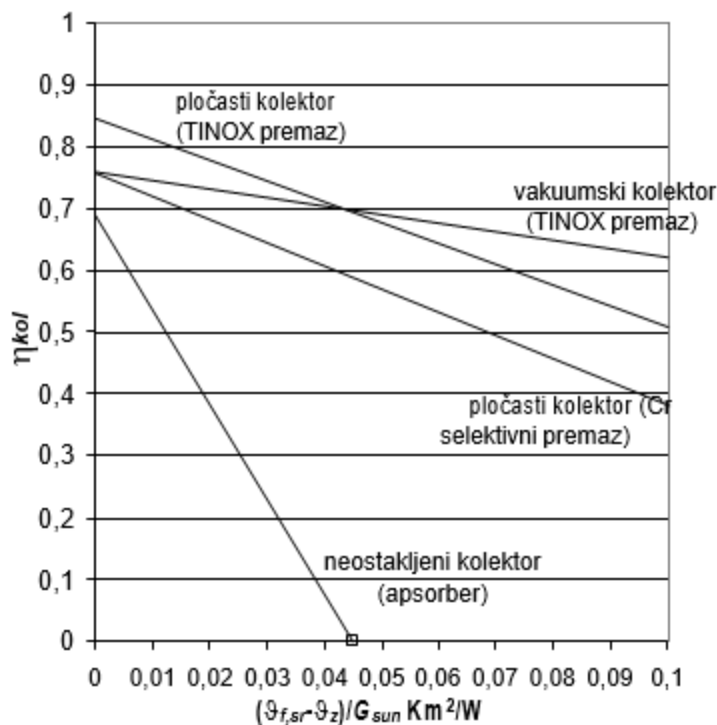
Slika 12. Sheme sustava sa osnovnim komponentama [3]

### 3. OSNOVNE KOMPONENTE SUSTAVA SOLARNOG DALJINSKOG GRIJANJA

#### 3.1 Solarni kolektori

Sunčeva energija se danas komercijalno najviše koristi u toplovodnim sunčanim sustavima i to za pripremu potrošne tople vode te u manjoj mjeri za grijanje prostora i zagrijavanje bazenske vode. Solarni kolektor predstavlja osnovnu komponentu solarnog toplinskog sustava čija je zadaća što učinkovitije prikupljanje sunčeve energije. Kolektori prikupljaju sunčevu energiju i predaju je radnom mediju koji struji u zatvorenom krugu između kolektora i spremnika tople vode, a kojoj potom preko izmjenjivača predaje prikupljenu toplinsku energiju. Tijekom godina razvijana su dva osnovna modela solarnih kolektora – pločasti i vakuumski. U solarnim toplovodnim sustavima najčešće se koriste pločasti kolektori, a u posljednje vrijeme sve češće i vakuumski. Unatoč boljoj učinkovitosti vakuumskih kolektora pri većim razlikama temperatura radnog medija i okoline, investitori se često odlučuju za ugradnju pločastih kolektora zbog znatno manjih investicijskih troškova. Pri integraciji solarnih toplinskih kolektora u sustave daljinskog grijanja prednost imaju vakuumski kolektori zbog znatno bolje učinkovitosti pri višim temperaturnim režimima koja na dugi period pokazuje ekonomsku opravdanost.

Općenito, učinkovitost kolektora se određuje ispitivanjem u akreditiranom laboratoriju, a definirana je kao omjer energije predane radnom mediju – vodi i energije upadnog zračenja. Učinkovitost u ovisnosti o ozračenju, srednjoj temperaturi vode u kolektoru i temperaturi okolišnog zraka iskazuje se pomoću polinoma čiji se koeficijenti određuju regresijskom analizom na temelju eksperimentalnih podataka. Slika 13. u nastavku prikazuje karakteristične krivulje pojedinih modela kolektora pri čemu su jasno vidljive razlike u učinkovitosti, osobito pri većoj razlici temperatura medija u kolektoru i temperature okolišnog zraka.

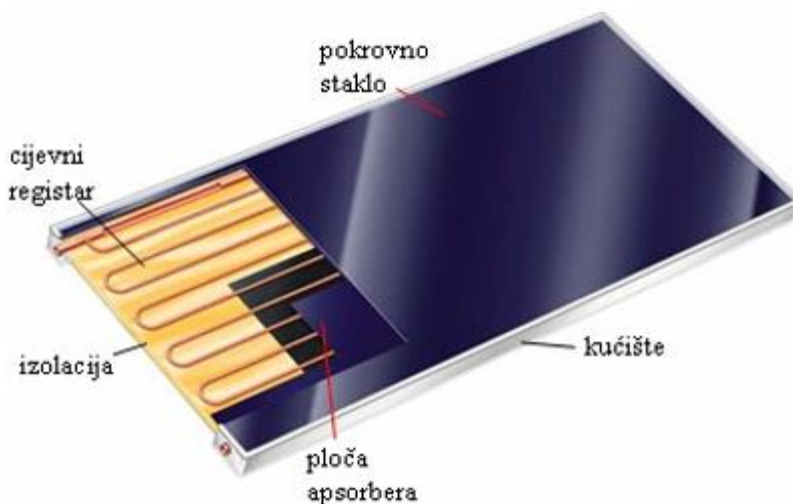


Slika 13. Učinkovitost različitih vrsta solarnih kolektora [4]

### 3.1.1. Pločasti kolektor

Pločasti kolektor su prvi put patentirani u Kaliforniji 1909. godine, a masovnija proizvodnja bilježi se tijekom naftne krize 70-tih godina prošlog stoljeća. Od tada su kolektori znatno unaprijeđeni, što se posebice odnosi na njihovu toplinsku efikasnost, a sve zahvaljujući razvoju novih premaza apsorbera i novih tehnologija pričvršćivanja cijevi za ploču apsorbera. To je dovelo do znatnog povećanja broja instaliranih kolektora tijekom 1990-tih, kao i znatnog snižavanja cijena koje su tijekom posljednjih godina smanjene i do 50%. Na Slici 14. prikazan je tip pločastog kolektora s pokrovnim staklom kakav se najčešće može pronaći na tržištu.





Slika 14. Osnovni dijelovi pločastog kolektora

### 3.1.2. Vakuumski kolektor

Vakuumski kolektori su danas, poslije pločastih, najčešće korišteni tip kolektora. Razvijeni su kako bi se smanjili konvektivni gubici s apsorbena na okolinu, što je učinjeno na način da je iz prostora između apsorbena i stakla izvučen zrak. Kod standardne konstrukcije pločastih kolektora tako nastali vakuum bi doveo do pucanja pokrovnog stakla, pa se kod vakuumskih kolektora apsorbent smješta u vakuumirane staklene cijevi (koje zbog kružnog oblika stijenke imaju pri istom vakuumu znatno manja naprezanja u materijalu). Kod jednog tipa kolektora fluid struji u dva smjera kroz niz paralelno spojenih koaksijalnih cijevi, pri čemu je unutrašnja povratna iz sustava (hladni fluid) a vanjska polazna (zagrijani fluid). Apsorbent je kao kod pločastih kolektora pričvršćen za cijev ili ulogu apsorbena ima vanjska površina koaksijalnih cijevi na koju je nanesen premaz. U posljednjem slučaju se kod nekih modela koriste reflektirajuća zrcala koja usmjeravaju sunčevo zračenje na apsorbentnu cijev. Drugi tip vakuumskog kolektora umjesto koaksijalne cijevi ima savinutu tzv. U-cijev, kod koje kroz jedan ogranak struji povratni medij iz sustava a kroz drugi zagrijani polazni medij u sustav. Apsorbent je u tom slučaju izveden kao ravna ploča. Na tržištu se također mogu pronaći i tzv. toplinske cijevi (engl. heat pipe) kod kojih fluid struji kroz samo jednu cijev u dva smjera. U donjem apsorbentnom dijelu cijevi radni fluid (freon, alkohol) isparava a u gornjem dijelu cijevi dolazi do njegove kondenzacije, pri čemu se toplina predaje sekundarnom fluidu koji ju dalje preko izmjenjivača predaje vodi u spremniku. Sličan princip se koristi i kod

hlađenja većih elektronskih sklopova. Zbog visokih koeficijenata prijelaza topline pri isparavanju i kondenzaciji, ovakvi kolektori imaju ponešto veću efikasnost (5%) od prethodno opisanih s jednofaznim strujanjem.



Slika 15. Osnovni dijelovi vakuumnog kolektora [4]

### 3.1.3 Usporedba pločastih i vakuumskih kolektora

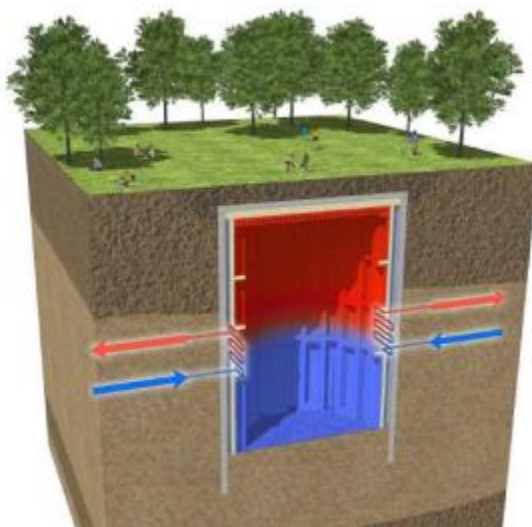
Svaki od tipova kolektora ima svoje prednosti i nedostatke. Pločasti je sa ekonomskog stajališta u odnosu na vakuumski puno jeftiniji i period povrata investicije se pokazao kraćim. Vakuumski kolektori imaju manju toplinske gubitke pri istim uvjetima rada. Ipak, zbog nužnosti korištenja staklenih cijevi manja je korisna površina apsorbera u odnosu na ukupnu projiciranu površinu kolektorska. Odnos korisne i ukupne površine kod pločastih iznosi 0,9, dok kod vakuumskih 0,6. Učinkovitost se određuje prema ukupnoj projiciranoj površini apsorbera ili kolektora te prema tome pločasti kolektor je efikasniji ljeti od vakuumnog, no u slučaju visokih temperatura njegova učinkovitost počinje padati. Ukoliko se u toplijoj polovici godine želi prikupiti jednaka količina sunčeve energije, pritom će vakuumski zauzeti veću površinu na krovu. Obrnuto vrijedi u zimskim mjesecima, pri oblačnom vremenu ili izuzetno visokim temperaturama fluida. Tada do većeg izražaja dolazi smanjenje toplinskih gubitaka kod vakuumnog kolektora pa je i njihova efikasnost veća. To ih čini prikladnima za korištenje u hladnijim klimama sa nižom sunčevom ozračenosti. Još jedna prednost vakuumnog kolektora je što zbog njegove konstrukcije (cijev u cijevi) voda unutar cijevi ne može se zalediti. Kao nedostatak vakuumskih kolektora treba napomenuti mogućnost puknuća stakla uslijed dilatacija izazvanih temperaturnim promjenama, pri čemu dolazi do gubitka vakuuma i značajnog pada efikasnosti.

### 3.2 Sezonski spremnik topline

Skladištenje toplinske energije omogućuje prikupljanje toplinske energije za kasniju upotrebu. To može biti satima, danima ili mnogo mjeseci kasnije, a postiže se različitim tehnologijama. Skladištenje toplinske energije može biti dragocjeno i primjenjivo za pojedinačnu zgradu, veliku zgradu kao što je škola ili bolnica, lokalno područje pa čak i cijeli grad. Uz pomoć pohrane toplinske energije, potražnja za energijom može se uravnotežiti između dana i noći ili ljeta i zime. Na primjer, toplina od sunca može se pohraniti za korištenje zimi, hladnoća od zimskog zraka može se koristiti ljeti. Sezonsko skladištenje toplinske energije, također poznato kao STES, zajednički je izraz za nekoliko tehnologija za skladištenje topline ili hladnoće na duže vrijeme. Toplinska energija može se prikupljati kad god je dostupna i može se koristiti kad god je potrebna. Sezonsko skladištenje toplinske energije također se intenzivno koristi za grijanje staklenika. Vodonosnici su uobičajena vrsta sustava za pohranu. Ljeti se staklenici hlade podzemnom vodom pumpanom u vodonosniku. U tom procesu voda se pretvara iz hladne u toplu vodu. Kada je stakleniku potrebna toplina, voda se povlači iz toplog bunara. Dok obavlja funkciju grijanja, voda će se ohladiti i pumpati u hladni bunar. Spremnik za takvo skladištenje je inovativan, veliki sustav za pohranu toplinske energije s izuzetno dobrim kapacitetom pohrane i dugotrajnošću. Toplinska energija pohranjena je cilindričnim volumenima izlivenim u zemlju u kojima su postavljeni standardni modularni dijelovi zida. Izmjena topline unutar posude odvija se preko izmjenjivača topline ugrađenih u stijenu. Kod staklenika će se za skladištenje toplinske energije koristiti različite vrste izvora energije i otpadna toplina. S ovim sustavom skladištenja koji funkcionira kao veliki međuspremnik, toplina i hladnoća mogu se pohraniti i cirkulirati duboko ispod zemlje. Različiti segmenti u spremniku mogu se puniti i prazniti na različitim temperaturama. S jedne strane, to omogućuje pohranjivanje različitih temperatura u spremniku. S druge strane, temperatura će biti optimalno prilagođena situaciji. U Tablici 3. opisani su sustav Austrije, Njemačke i Danske sa preporukama za dimenzioniranje spremnika za skladištenje topline u odnosu na veličinu kolektorske površine. Na Slici 16. prikazan je podzemni sezonski spremnik za skladištenje topline u gradu te su prikazana područja visokih i niskih temperatura unutar spremnika.

Tablica 2. Preporuke za dimenzioniranje spremnika [5]

|                                        | Mürzzuschlag | Radolfzell | Općeniti danski pristup | Dronninglund |
|----------------------------------------|--------------|------------|-------------------------|--------------|
| Država                                 | Austrija     | Njemačka   | Danska                  | Danska       |
| Vrsta spremnika                        | jednodnevni  | višednevni | višednevni              | sezonski     |
| Kolektorska površina [m <sup>2</sup> ] | 5000         | 1100       | 7000-20000              | 62000        |
| Volumen spremnika [m <sup>3</sup> ]    | 250          | 240        | 1400-6000               | 37500        |
| Omjer skladištenja [l/m <sup>2</sup> ] | 50           | 220        | 200-300                 | 1650         |
| Korisnost kolektora                    | 10%          | 20%        | 20-30%                  | 40%          |
| Omjer potrebe zima/ljeto               | 8:1          | 7:1        | 5:1                     | 5:1          |



Slika 16. Podzemni sezonski spremnik za skladištenje topline [5]

### 3.4. Kotao i dizalica topline

Sustavi daljinskog grijanja razvijaju se s tendencijom snižavanja polaznih temperatura i uvođenjem različitih izvora energije. Studije su pokazale da su sustavi daljinskog grijanja, zajedno sa skladištenjem topline, izvediviji, učinkovitiji u potrošnji goriva i jeftiniji od pojedinačnih rješenja u područjima s velikom gustoćom naseljenosti. Pametne toplinske mreže definirane su kao mreža cijevi koja povezuje zgrade u susjedstvu, malom gradu ili velikom metropoli kako bi se mogle opsluživati iz centraliziranih postrojenja ili distribuiranih izvora grijanja. Klasičan kotao,

koji zagrijava vodu za grijanje i PTV, sve češće je zamijenjen dizalicama topline. Kotlovi koji se još uvijek koriste u daljinskom grijanju su na biomasu, drvenu sječku, pelete te plinski kotlovi. Takvi kotlovi rade na visokotemperaturnom režimu te proizvode veće emisije štetnih plinova. Plan Europske unije je do 2025.godine u potpunosti kotlove zamijeniti dizalicama topline i kotlovima na vodik.

Većina novih sustava koristi geotermalnu ili podzemnu vodu kao izvor topline. U niskotemperaturnim sustavima gubitak topline u tlo je eliminiran, a troškovi distribucijskog kruga su smanjeni. Ukoliko je polazna temperatura vode daljinskog grijanja  $25^{\circ}\text{C}$  ili manja, takva ne može biti direktno korištena za grijanje i potrošnu toplu vodu. U tom slučaju zahtjeva se upotreba električnog grijača ili dizalice topline. Kao prikladne dizalice topline pokazale su se geotermalne. Izravno korištenje geotermalne energije u sustavu daljinskog grijanja jedan je od najstarijih, ali i najčešćih oblika obnovljivih izvora energije. U niskotemperaturnoj geotermalnoj elektrani, toplinska energija se izvlači iz male dubine putem bušotinskih izmjenjivača topline. Veličina dosad instaliranih sustava kreće se do nekoliko MW za daljinske sustave. Jedan od prvih projekata s geotermalnom dizalicom topline je stambeno područje u Berlin-Zehlendorfu s 22 kuće, 135 stanova i ukupno  $21\ 000\ \text{m}^2$  površine. Temperatura mreže je približno  $10^{\circ}\text{C}$  tako da se ne gubi toplina i nije potrebna skupa izolacija cijevi. Decentralizirane dizalice topline izvlače toplinu iz mreže i opskrbljuju toplinskom energijom kuće. Toplinu osigurava kogeneracijsko postrojenje i bušotinski izmjenjivači topline. Drugi primjer je grad Plymouth u Ujedinjenom Kraljevstvu koji će biti prilagođen niskotemperaturnom daljinskom grijanju. Temperatura dovoda vode projektirana je između  $2^{\circ}\text{C}$  i  $25^{\circ}\text{C}$ , a temperatura povrata neće biti viša od  $25^{\circ}\text{C}$  tijekom cijele godine. Krajnji korisnici će se opremiti dizalicama topline za povećanje temperature PTV-a na  $50^{\circ}\text{C}$ . Izvori topline bit će podzemne vode, more i otpadna toplina.

Kada govorimo o solarnom daljinskom grijanju, na primjeru Graza implementirana je apsorpcijska dizalica topline. Sustav iz Danske koristi dizalicu topline zrak-voda gdje dio topline dizalica uzima iz solara, a drugi dio iz zraka. Sustav dizalice topline integriran je s postojećom solarnom toplanom od  $6\ 376\ \text{m}^2$  i akumulacijskim spremnikom tople vode. Dizalica topline pomaže optimizirati povratnu temperaturu u solarnoj elektrani tijekom mjeseci s najmanjom insolacijom. Ova integracija omogućuje solarnim kolektorima prikupljanje više energije tijekom

sedam najhladnijih mjeseci. U isto vrijeme, energija povučena iz spremnika, pomoći će poboljšanju učinkovitosti dizalice topline u onim razdobljima, gdje ima najveću vrijednost za ukupnu učinkovitost. Isto tako, postrojenje može proizvoditi električnu i toplinsku energiju koristeći plin, kada je cijena električne energije visoka, dok može trošiti električnu energiju za dizalicu topline, kada je cijena niska i time pomoći u ravnoteži mreže. Proizvodi oko 10 000 MWh topline godišnje, solarno postrojenje i sustav toplinske pumpe pokrivaju oko 93% potrošnje topline kupaca.

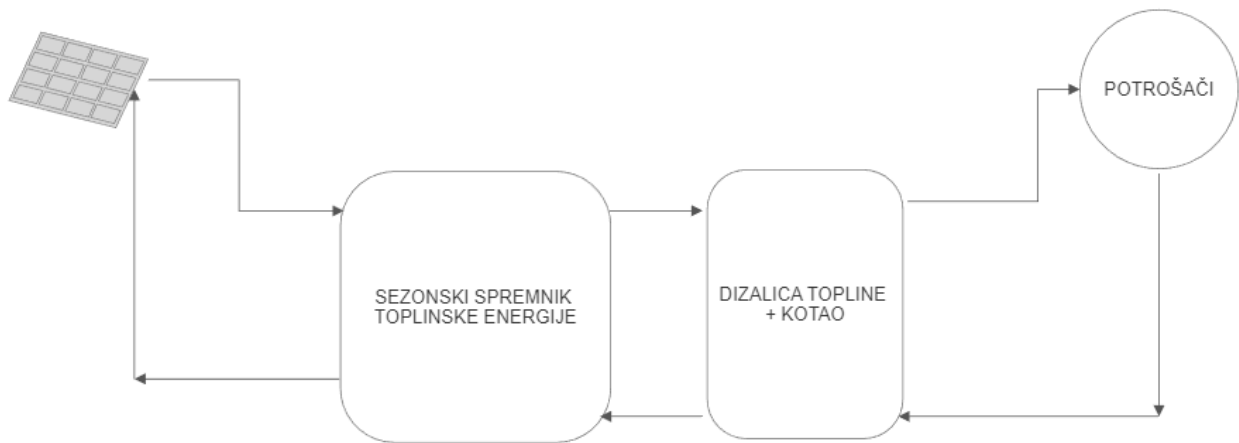
### 3.4. Fotonaponski paneli

Fotonaponske ćelije koriste se za izravnu pretvorbu energije sunčevog zračenja u električnu energiju. Princip rada temelji se na fotoelektričnom efektu. Većina danas komercijalno korištenih fotonaponskih ćelija je napravljena od poluvodiča silicija. Fotonaponske ćelije se spajaju u seriju kako bi se dobile vrijednosti napona nešto veće od 12 V ili 24 V, koje su uobičajene za akumulatore i uređaje koji se priključuju na fotonaponske ćelije. Serijski nizovi se potom spajaju u paralelu kako bi se postigli veći iznosi jakosti struje, odnosno snaga. Na taj način nastaju moduli u obliku panela na kojima su fotonaponske ćelije učvršćene i zaštićene od atmosferskih utjecaja. Najveća snaga fotonaponskog modula od monokristalnog silicija površine  $0,5 \text{ m}^2$  iznosi 73 W pri intenzitetu sunčevog zračenja od  $1000 \text{ W/m}^2$  uz efikasnost pretvorbe sunčeve u električnu energiju od 14,5%. Kada bi to usporedili sa solarnim kolektorima iste površine pri sunčevom zračenju od  $1000 \text{ W/m}^2$ , imao bi snagu 300 W u ljetnim uvjetima rada. Treba naglasiti kako se solarnim kolektorima dobiva toplinska energija, a fotonaponskim panelima električna energija koja se smatra vrjednijim oblikom jer se može izravno pretvoriti u toplinsku energiju i mehanički rad. Pored spomenutih monokristalnih silicijevih ćelija postoje i jeftinije polikristalne ćelije čija je struktura kristala manje pravilna, a efikasnost pretvorbe sunčeve u električnu energiju 10%. Razlozi za relativno niske efikasnosti fotonaponskih ćelija su gubici koji nastaju zbog prevelike ili premale količine energije koju imaju fotoni u pojedinom području valnih duljina u odnosu na iznos potreban za izdvajanje elektrona iz međuatomskih veza. Neiskorišteni dio apsorbirane sunčeve energije se pretvara u toplinu. Ostali gubici nastaju zbog otpora u samom materijalu i spojevima, zasjenjenja od metalnih kontakata na površini te zbog refleksije. Učinkovitost fotonaponskih ćelija i njihova snaga padaju s povećanjem temperature. Osnovni dijelovi fotonaponskog sustava su

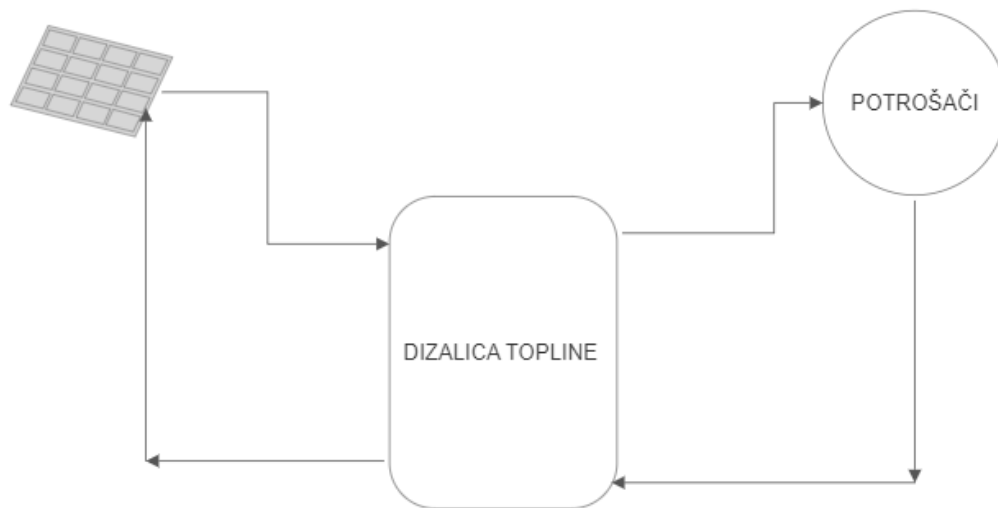
fotonaponski paneli, akumulator, regenerator i pretvarač istosmjerne u izmjeničnu struju te trošila. U ovome radu proračun fotonaponskih panela izrađen je prema normi EN 15316-4-6:2008 *Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava – Dio 4-6: Sustavi za proizvodnju topline, fotonaponski sustavi*. Sukladno navedenoj normi, odabran je monokristalni fotonaponski panel, efikasnosti 0,15. Fotonaponski paneli dalje su spojeni sa dizalicom topline koja ima SCOP jednak 3.

### 3.5 Opis rada sustava

U ovome radu analizirana su dva osnovna solarna sustava, sustav sa solarnim kolektorima te fotonaponskim panelima. Sustavi sa solarnim kolektorima analizirani su za slučaj sa pločastim i sa vakuumskim kolektorima. Obje vrste kolektora analizirane su za sustav sa toplovodnim kotlom i sa dizalicom topline uz koju se nalazi toplovodni kotao. Temperaturni režim grijanja kod sustava sa toplovodnim kotlom je 90/60°C. Tada je postavljena minimalna temperatura u gornjem sloju spremnika na 60°C i to je temperatura polaza vode iz spremnika. U periodu kada energija iz spremnika nije dovoljna za pokrivanje potreba kućanstava, upalit će se kotao te dogrijati vodu izvan spremnika. Kako je temperatura povrata vode u spremnik 60°C, nije moguće postići niske temperature u spremniku. Model radi tako da temperatura vode u spremniku nikada neće pasti ispod 60°C. Drugi slučaj odnosi se na sustav sa dizalicom topline i toplovodnog kotla. Tada je postavljena minimalna temperatura u gornjem sloju spremnika 20°C i to je temperatura polaza vode iz spremnika prema dizalici jer dizalica radi na niskotemperaturnom režimu. U slučaju kada dizalica ne može pokriti potrebe kućanstava, upalit će se kotao. U slučaju sa dizalicom topline povrat vode je na 10°C te će pritom biti vidljiva stratifikacija u spremniku i moguće je postizanje niskih temperatura. Prilikom rada ljeti kada su temperature u spremniku iznad 60°C, dizalica topline neće raditi. U tom slučaju kompresor se ne pali, već voda iz spremnika direktno idu u sustav razvoda daljinskog grijanja. Na Slikama 17. i 18. prikazane su sheme sustava analiziranih u ovome radu. Slika 17. prikazuje solarne kolektore koji se spajaju na sezonski spremnik toplinske energije. Taj sustav izveden je sa dizalicom topline prema primjeru iz Graza. Slika 18. prikazuje shemu sustava fotonaponskih panela i dizalice topline. Energija prikupljena na fotonaponskim panelima, direktno dolazi do dizalice topline i predaje joj prikupljenu energiju.



Slika 17. Shema sustava solarnih kolektora



Slika 18. Shema sustava fotonaponskih panela



## 4. MODELIRANJE SOLARNOG TOPLINSKOG SUSTAVA

U cilju pronalaska ekonomski najprihvatljivijeg rješenja integracije solarnih kolektora u sustav daljinskog grijanja izrađen je model solarnog kolektorskog polja povezanog na sezonski spremnik toplinske energije. Model obuhvaća termodinamički proračun kolektorskog polja i sezonskog toplinskog spremnika. Proračun se provodi na godišnjoj razini s vremenskim korakom od jednog sata. Spomenutim modelom se izračunavaju godišnje bilance energije u sustavu te se kontroliraju ostvarene temperature u spremniku kako bi se izbjegla stagnacija odnosno pregrijavanje kolektorskog kruga u ljetnim mjesecima. Model solarnog sustava se sastoji od proračuna upadnog sunčevog zračenja na proizvoljno nagnutu plohu, proračuna prikupljanja energije u solarnom kolektorskom polju, izmjene topline u izmjenjivaču i izračuna entalpije toplinskog spremnika.

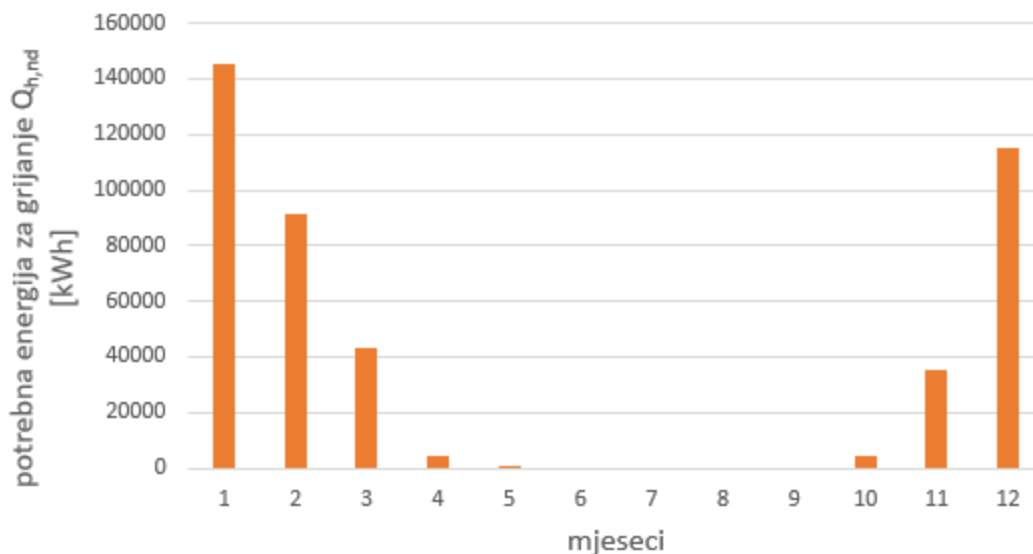
Intenzitet sunčevog zračenja na proizvoljno nagnutu plohu izračunan je koristeći izotropni model na temelju poznatih podataka o satnim vrijednostima intenziteta sunčevog zračenja na okomitu plohu i prosječnih satnih vrijednosti temperature zraka. Apsorbirana energija u kolektorskom polju računa se prema vlastitom modelu koji se temelji na normi HRN EN 15316-4-3:2017. Model toplinskog spremnika sa temperaturnom stratifikacijom u 4 sloja izrađen je sukladno normi prEN 15316-5:2021. S obzirom na to da efikasnost kolektora ovisi o ulaznoj temperaturi vode u kolektor koja se mijenja u ovisnosti o apsorbiranoj energiji kolektorskog polja iterativnim postupkom izračunana je satna vrijednost srednje temperature u kolektoru.

Proračun obuhvaća analizu četiri različita sustava. Prvi sustav je sa pločastim solarnim kolektorima i kotlom na biomasu dok je drugi je sa vakuumskim solarnim kolektorima i kotlom na biomasu. Treći i četvrti sustav izvedeni su sa pločastim kolektorima i dizalicom topline, četvrti sa vakuumskim kolektorima i dizalicom topline. Ukoliko dizalica ne može pokriti zahtijevano opterećenje, taj dio pokriti će se kotlom.

## 4.1 Ulazni parametri

### 4.1.1. Potrebna energija za grijanje i pripremu potrošne tople vode

Kako je cilj rada pronaći optimalno rješenje za solarno daljinsko grijanje kvarta u Zagrebu, prije samih proračuna potrebno je odrediti ulazne parametre. Vodeći se iskustvima danskog i austrijskog modela solarnog daljinskog grijanja, sustav na području grada Zagreba pokrivat će potrebe 1000 kućanstava. Pretpostavkom da u kućanstvu borave četiri osobe, dolazi se do 4000 potrošača kojima je potrebna opskrba energijom za grijanje i pripremu potrošne tople vode. Za potrebe proračuna, pretpostavljeno je ukupno 25 zgrada sa 40 stanova. Proračun potrebne energije za grijanje  $Q_{H,nd}$  proveden je prema nZEB smjernicama. Potrebna energija za grijanje prikazana je na Slici 19. Potrebna energija za pripremu potrošne tople vode (PTV) izračunata je prema HRN EN 15316-3-1:2008 *Sustavi grijanja u zgradama -- Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava -- Dio 3-1: Sustavi za pripremu potrošne tople vode, pokazatelji potreba prema izljevnome mjestu* i PECZ NN 36/10 *Pravilnik o energetsom pregledu zgrade i energetsom certificiranju*. Prema tome specifična toplinska energija potrebna za pripremu PTV-a ( $Q_{W,A,a}$ ) iznosi 16 kWh/m<sup>2</sup>a za zgrade s više od 3 stambene jedinice. Pretpostavka je kako potreba za PTV-om neće biti konstantna tijekom dana, već 33% potrošnje bit će u 7 sati ujutro, 7% u 13 sati, dok ostalih 60% u razdoblju od 20 do 22 sata navečer. Kako je proračun izrađen na satnoj bazi, svakoga dana ukupna energija za zagrijavanje PTV-a iznosi 3754,5 kWh.



Slika 19. Potrebna energija za grijanje

#### 4.1.2 Odabir solarnih kolektora

Kako je prethodno opisano u radu, postoje dvije vrste solarnih kolektora, pločasti i vakuumski. U ovome radu provedena je analiza obje vrste kolektora. U Tablici 3. prikazane su njihove karakteristike potrebne za provedbu proračuna. Maseni protok vode kroz kolektore iznosi 0,1 kg/s, a specifični toplinski kapacitet vode  $c_w=4187$  J/(kg K).

Tablica 3. Karakteritike solarnih kolektora

| Vrsta kolektora | Proizvođač | Površina [m <sup>2</sup> ] | $\eta_0$ | $a_1$ [W/m <sup>2</sup> K] | $a_2$ [W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ] |
|-----------------|------------|----------------------------|----------|----------------------------|------------------------------------------|
| Pločasti        | Vaillant   | 2,352                      | 0,736    | 3,973                      | 0,0016                                   |
| Vakuumski       | Vaillant   | 2,57                       | 0,644    | 0,749                      | 0,005                                    |

#### 4.2. Sunčevo zračenje i vanjska temperatura

Najvažniji parametar koji izravno utječe na prikupljanje toplinske energije u kolektoru je dostupna energija sunca odnosno ozračenje. Za proračun ozračenja na nagnutu plohu korištene su prosječne satne vrijednosti ozračenja na horizontalnu plohu sa stranice Joint Research Center (JRC) za grad Zagreb. Nadalje, korištene su i prosječne satne temperature okolišnog zraka u

klimatskom području grada Zagreba. Maksimalne vrijednosti sunčevog zračenja na horizontalnu plohu iznose  $1.016 \text{ W/m}^2$ , a temperature okolišnog zraka kreću se u rasponu između  $-13,3$  i  $36,6$  °C.

### 4.3. Modeliranje sunčevog zračenja na nagnutu plohu

Za proračun intenziteta sunčevog zračenja na proizvoljno nagnutu plohu korišten je model iz *Algoritma za pripremu meteoroloških podataka kod izračuna energijskog svojstva zgrada* [10]. U algoritmu dane su dvije metode proračuna. U ovome radu korištena je „Metoda 2“ koja se koristi ako je poznato globalno Sunčevo zračenje  $G_{sol,g}$  iz ulaznog seta meteo podataka. Ulazni meteo podaci preuzeti su iz baze Joint Research center (JRC) za grad Zagreb. Postupak proračuna sunčevog zračenja na nagnutu plohu prema Metodi 2, opisan je u nastavku.

Ekstraterestričko Sunčevo zračenje na granici zemljine atmosfere na plohu okomitu na smjer zračenja se računa prema

$$I_{ext} = G_{c,sol} \left( 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360}{365} \times n_{day}\right) \right) \quad (1)$$

$G_{c,sol}$  – Solarna konstanta ( $1370 \text{ W/m}^2$ )

Indeks prozračnosti atmosfere  $k_T$

$$k_T = \frac{G_{sol,g}}{I_{ext}} \quad (2)$$

Iznos difuzne komponente Sunčevog zračenja se dobije iz sljedećih izraza u ovisnosti o  $k_T$

$$\begin{array}{ll} G_{sol,d}/G_{sol,g} = 1,0 - 0,09 \times k_T \quad [-]; & k_T \leq 0,22: \\ G_{sol,d}/G_{sol,g} = 0,9511 - 0,1604 \times k_T + & 0,22 < k_T \leq 0,80 \\ 4,388 \times k_T^2 - 16,638 \times k_T^3 + 12,336 \times k_T^4 \quad [-]; & \\ G_{sol,d}/G_{sol,g} = 0,165 \quad [-]; & G_{sol,d}/G_{sol,g} = 0,165 \end{array}$$

Direktna komponenta Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu se potom dobije iz

$$G_{sol;b} = \frac{G_{sol;g} - G_{sol;d}}{\sin(\alpha_{sol})} \quad (3)$$

Direktna komponenta Sunčevog zračenja (okomita) na nagnutu plohu se računa prema

$$I_{dir} = \max[0; G_{sol;b} \cdot \cos(\theta_{sol;ic})] \quad (4)$$

Difuzna komponenta Sunčevog zračenja na nagnutu plohu dobije se iz

$$I_{dir} = G_{sol;d} \left[ (1 - F_1) \frac{(1 + \cos(\beta_{ic}))}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin(\beta_{ic}) \right] \quad (5)$$

Bezdimenzijski parametri a,b

$$a = \max [0, \cos(\theta_{sol})] \quad (6)$$

$$b = \max [\cos(85), (\cos(\theta_z))] \quad (7)$$

Bezdimenzijski parametar prozračnosti određuje se prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\left( \frac{G_{sol;d} + G_{sol;b}}{G_{sol;d}} + K \cdot \left( \frac{\pi}{180} \cdot \alpha_{sol} \right) \right)}{1 + K \cdot \left( \frac{\pi}{180} \cdot \alpha_{sol} \right)^3} \quad (8)$$

Ako je  $G_{sol;b}=0$ ,  $\varepsilon = 999$

K – konstanta za proračun bezdimenzijskog parametra prozračnosti (-),  $K=1,014 \text{ rad}^{-3}$

Cirkumsolarni koeficijenti osvijetljenosti F1 i horizontalni koeficijent osvijetljenosti F2 se dobiju iz slijedećih izraza

$$\Delta = m \frac{G_{sol;d}}{I_{ext}} [-]$$

$$F_1 = MAX \left[ 0, f_{11}(\varepsilon) + f_{12}(\varepsilon) \Delta + f_{13}(\varepsilon) \left( \frac{\pi \theta_z}{180} \right) \right] [-]$$

$$F_2 = f_{21}(\varepsilon) + f_{22}(\varepsilon) \Delta + f_{23}(\varepsilon) \left( \frac{\pi \theta_z}{180} \right) [-]$$

$\Delta$  - bezdimenzijski parametar osvjetljenosti neba (-);

$f_{i,j}$  - bezdimenzijski koeficijenti osvjetljenosti (-), Tablica 4.

Uvjet, ako je  $F_1 > 1$ , uzeti  $F_1 = 1$ .

Tablica 4. (HRN EN 10) Vrijednosti indeksa prozračnosti  $k_T$  i koeficijenta osvjetljenosti  $f_{i,j}$  u ovisnosti o parametru prozračnosti  $\varepsilon$

| $\varepsilon$                    | $k_T$        | $f_{11}$ | $f_{12}$ | $f_{13}$ | $f_{21}$ | $f_{22}$ | $f_{23}$ |
|----------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\varepsilon < 1,065$            | 1<br>Oblačno | -0,008   | 0,588    | -0,062   | -0,060   | 0,072    | -0,022   |
| $1,065 \leq \varepsilon < 1,230$ | 2            | 0,130    | 0,683    | -0,151   | -0,019   | 0,066    | -0,029   |
| $1,230 \leq \varepsilon < 1,500$ | 3            | 0,330    | 0,487    | -0,221   | 0,055    | -0,064   | -0,026   |
| $1,500 \leq \varepsilon < 1,950$ | 4            | 0,568    | 0,187    | -0,295   | 0,109    | -0,152   | -0,014   |
| $1,950 \leq \varepsilon < 2,800$ | 5            | 0,873    | -0,392   | -0,362   | 0,226    | -0,462   | 0,001    |
| $2,800 \leq \varepsilon < 4,500$ | 6            | 1,132    | -1,237   | -0,412   | 0,288    | -0,823   | 0,056    |
| $4,500 \leq \varepsilon < 6,200$ | 7            | 1,060    | -1,600   | -0,359   | 0,264    | -1,127   | 0,131    |
| $\varepsilon \geq 6,200$         | 8<br>Vedro   | 0,678    | -0,327   | -0,250   | 0,156    | -1,377   | 0,251    |

Difuzna komponenta Sunčevog zračenja na nagnutu plohu uslijed refleksije od tla

$$I_{dif;grnd} = [G_{sol;d} + G_{sol;b} \sin(\alpha_{sol})] \rho_{sol;grnd} \frac{(1 - \cos(\beta_{ic}))}{2} \quad (9)$$

Cirkumsolarna komponenta Sunčevog zračenja na nagnutu plohu

$$I_{circum} = G_{sol;d} \cdot F_1 \frac{a}{b} \quad (10)$$

Ukupna direktna komponenta Sunčevog zračenja na nagnutu plohu koja uključuje cirkumsolarno zračenje

$$I_{dir;tot} = I_{dir} + I_{circum} \quad (11)$$

Ukupna difuzna komponenta Sunčevog zračenja na nagnutu plohu se računa prema

$$I_{dif;tot} = I_{dif} - I_{circum} + I_{dif;grnd} \quad (12)$$

U konačnici, ukupno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu (bez utjecaja zasjenjenja od vanjskih objekata) dobije se iz

$$I_{tot} = I_{dir;tot} + I_{dif;tot} \quad (13)$$

Vrijednost ukupnog Sunčevog ozračenja na nagnutu plohu (bez utjecaja zasjenjenja od vanjskih objekata) u jednom satu dobije se iz

$$H_{tot} = I_{tot} \cdot t \quad (14)$$

gdje je  $t=1$  h

Dnevne/mjesečne vrijednosti ukupnog Sunčevog ozračenja na nagnutu plohu se dobiju zbrajanjem svih satnih vrijednosti  $H_{tot}$  u pojedinom danu/mjeseću.

#### 4.4. Izračun energije prikupljene u kolektorskom polju

Nakon proračuna intenziteta sunčevog zračenja (insolacije) za kut od  $45^\circ$ , potrebno je izračunati kroz tri iteracije učinkovitost kolektora ( $\eta_{kol}$ ) i prikupljenu energiju u kolektorskom polju ( $Q_{kol}$ ). Ulazna temperatura vode u kolektor jednaka je temperaturi prvog segmenta spremnika. Za prvu iteraciju za učinkovitost je uzeta vrijednost od 0,4. Prema izrazu (15) izračunata je prikupljena energija u kolektorskom polju za svaki sat u godini.

$$Q_{kol,1} = I \cdot A_{kol} \cdot \eta_{kol,0} \quad (15)$$

Također, potrebno je izračunati izlaznu temperaturu vode iz kolektora (16), srednju temperaturu vode (17), reduciranu temperaturnu razliku u kolektoru (18) te novu učinkovitost kolektora u prvoj iteraciji (19).

$$\vartheta_{kol,iz} = \vartheta_{kol,ul} + \frac{\eta_{kol,0} \cdot I \cdot A_{kol}}{c_w \cdot I} \quad (16)$$

$$\vartheta_{sr} = \frac{\vartheta_{kol,ul} + \vartheta_{kol,iz}}{2} \quad (17)$$

$$T_h^* = \frac{\vartheta_{sr} - \vartheta_{ok}}{I} \quad (18)$$

$$\eta_{kol,1} = \eta_{kol,0} - a_1 \cdot T_h^* - a_2 \cdot (T_h^*)^2 \cdot I \quad (19)$$

Prikazani proračun proveden je u tri iteracije dok nije dobivena konačna vrijednost učinkovitosti i prikupljene energije u kolektorima prema navedenim jednadžbama. Prvi proračun proveden je za pločasti i vakuumski kolektor ukupne kolektorske površine 2000 m<sup>2</sup>.

## 4.5. Modeliranje sezonskog spremnika topline

Određivanje inicijalnog volumena spremnika provedeno je prema smjernicama studija provedenih za danski sustav solarnog daljinskog grijanja. Tablica sa preporukama dimenzioniranja spremnika dana je ranije u ovome radu. Konačni volumeni spremnika određeni su tako da ne dolazi do pregrijavanja spremnika. U ovom proračunu termodinamički model spremnika izrađen je prema normi prEN 15316 – 5:2021.

### 4.5.1. Određivanje volumena spremnika topline

Dimenzioniranje spremnika topline provodi se s ciljem maksimalnog iskorištavanja toplinske energije kolektorskog polja u ljetnim mjesecima. Spremnik je dimenzioniran tako da nema odbacivanja viška toplinske energije odnosno da maksimalna temperatura u spremniku ne



prelazi 100°C i to je jedno od postavljenih ograničenja ove analize. Kod prve iteracije veličina spremnika računa se sukladno smjernicama za projektiranje solarnih toplinskih sustava u daljinskom grijanju. Potrebno je napomenuti kako je proračun proveden sa pretpostavkom da u spremniku nema gubitaka topline. Razlog tomu je što se sezonski spremnik, kako je već prikazano, u većini sustava solarnog daljinskog grijanja nalazi pod zemljom te je pritom kompleksno odrediti toplinske gubitke.

#### 4.5.2. Norma prEN 15316 – 5:2021

Norma prEN 15316–5:2021 namijenjena je za energetski proračun toplovodnih sustava skladištenja energije za grijanje, potrošnu toplu vodu ili njihove kombinacije. Normom su definirana dva načina proračuna akumulacijskih toplovodnih spremnika. Metoda A uzima u obzir temperaturnu stratifikaciju unutar spremnika koristeći satni vremenski korak, dok se sukladno proračunu po metodi B pretpostavlja homogena temperatura u spremniku, a proračun je moguće provoditi na satnoj, dnevnoj ili godišnjoj razini. U ovom radu korištena je metoda A, a proračun je prilagođen sustavu daljinskog grijanja.

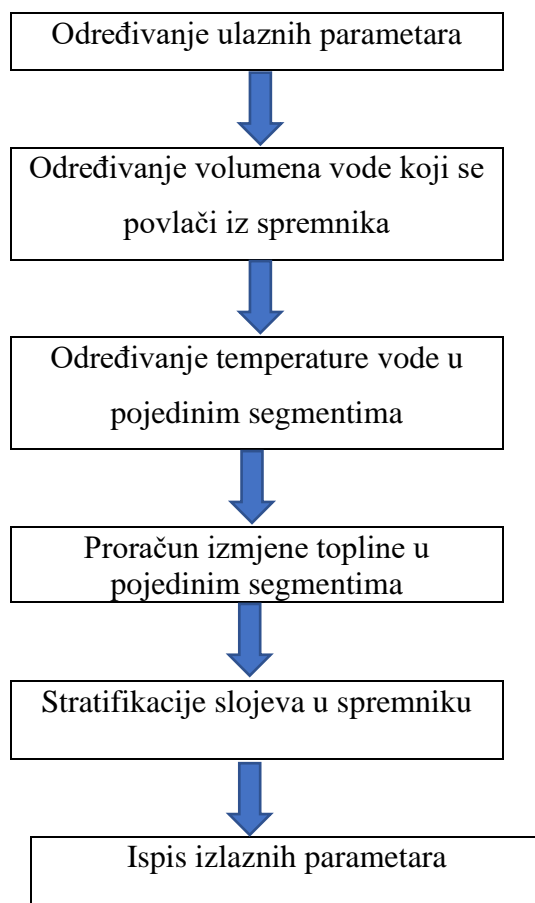
Metoda A bazirana je na energetskej jednadžbi (20) postavljenoj na segment homogene temperature pri čemu je spremnik podijeljen na ukupno četiri segmenta jednakih volumena. Prvi član s lijeve strane jednadžbe označava vremensku promjenu entalpije promatranog spremnika, član  $Q_{t+1,i}$  opisuje unos ili odvođenje toplinske energije pomoću izmjenjivača topline, drugi član s desne strane opisuje promjenu entalpije segmenta zbog izmjene tvari – vode između segmenata. Normom nije opisana izmjena topline provođenjem između pojedinih segmenata spremnika.

$$m_i \cdot c_p \cdot (\vartheta_{t+1,i} - \vartheta_{t,i}) = Q_{t+1,i} + \Delta m_t \cdot c_p \cdot (\vartheta_{t-1,i} - \vartheta_{t,i}) \quad (50)$$

Proračun spremnika se sukladno normi provodi u 9 koraka, a zbog prilagodbe sustavu daljinskog grijanja broj koraka je nešto manji. S obzirom na to da u sustavu daljinskog grijanja postoji jedinstvena potražnja za toplinskom energijom, odnosno energija se u sustav šalje za grijanje i

pripremu PTV-a proračun je modificiran kako bi se mogao provesti za sustav daljinskog grijanja. Proračun je proveden za dva slučaja. Prvi slučaj odnosi se na sustav kolektorskog polja, spremnika i kotla na biomasu. Tada je postavljena minimalna temperatura u gornjem sloju spremnika  $60^{\circ}\text{C}$  i to je temperatura polaza vode iz spremnika, u vremenskim intervalima kada energija iz spremnika nije dovoljna za pokrivanje potreba kućanstava, upalit će se kotao te dogrijati vodu izvan spremnika. Drugi slučaj odnosi se na sustav kolektorskog polja, spremnika, dizalice topline i kotla. Tada je postavljena minimalna temperatura u gornjem sloju spremnika  $20^{\circ}\text{C}$  i to je temperatura polaza vode iz spremnika prema dizalici jer dizalica radi na niskotemperaturnom režimu. U slučaju kada dizalica ne može pokriti potrebe kućanstava, upalit će se kotao, iako su to zanemarive vrijednosti. Tablica 5. prikazuje redoslijed koraka u proračunu.

Tablica 5. Redoslijed koraka u proračunu toplinskog spremnika



#### 4.5.2.1. Određivanje volumena vode koja se isporučuje u sustav daljinskog grijanja

Proračun prema normi je prilagođen za sustav daljinskog grijanja te je potražnja za toplinskom modelirana kao potrošnja PTV-a prema normi. Temperatura hladne vode jednaka je temperaturi povrata sustava daljinskog grijanja te iznosi 20°C u slučaju rada sa dizalicom topline, dok u slučaju rada sa kotlom temperatura je jednaka 60°C. Na temelju potražnje za toplinskom energijom i temperature vode u četvrtom sloju spremnika za svaki sat izračunava se potreban volumen vode. S obzirom na relativno veliki iznos toplinskih potreba, osobito u zimskim mjesecima, iz spremnika se u jednom satu maksimalno može uzeti 25% volumena, odnosno samo voda iz gornjeg sloja. Maksimalni iznos toplinske energije na raspolaganju računa se prema izrazu (21), a potrebni volumen prema izrazu (22).

$$Q_{dh,max} = V_{sto,i} \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot (\vartheta_{vol,i} - \vartheta_{w,cold}) \quad (21)$$

$$V_{sto,use} = \frac{Q_{dh}}{c_w \cdot \rho_w \cdot (\vartheta_{sto,vol,i} - \vartheta_{w,cold})} \quad (22)$$

Energija pomoćnog grijača izvan spremnika računa se prema izrazu (23).

$$Q_{sto,h,bh} = V_{sto,4} \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot (\vartheta_{H+W,sto,out,min} - \vartheta_{sto,vol,4}) \quad (23)$$

U slučaju kada je potreba za toplinskom energijom u sustavu veća od maksimalne energije koja se može isporučiti iz spremnika potrebno je izravno u sustav dovesti toplinsku energiju prema jednadžbi (24):

$$Q_b = Q_{dh} - Q_{dh,max} \quad (24)$$

#### 4.5.2.2. Temperature u spremniku nakon isporuke vode

Za proračun temperature vode po slojevima pretpostavlja se pomicanje preostalog volumena vode u spremniku prema vrhu spremnika, a pri dnu spremnika u njega utječe volumen

hladne vode jednak volumenu isporučene vode. Zamišljeni segmenti fiksirani su u spremniku te poprimaju homogenu temperaturu koja je rezultat miješanja segmenata. U slučaju u kojemu je volumen isporučene vode veći od jednog segmenta spremnika temperatura svakog segmenta spremnika postavlja se jednakom temperaturi segmenta ispod, a temperatura donjeg sloja jednaka je temperaturi hladne vode sukladno izrazima (25) i (26):

$$\vartheta_{sto,vol,i} = \vartheta_{sto,vol,i-1} \quad (25)$$

$$\vartheta_{sto,vol,1} = \vartheta_{w,cold} \quad (26)$$

Preostali iznos vode koju je potrebno dovesti u spremnik umanjuje se za nadopunjeni volumen segmenta sukladno izrazu (27):

$$V_{sto,use,W} = V_{sto,use,W} - V_{sto,vol,i} \quad (27)$$

Temperatura vode u pojedinom segmentu spremnika računa se prema jednadžbi (28):

$$\vartheta_{sto,vol,i} = \frac{\vartheta_{sto,vol,i-1} \cdot V_{sto,use,W} + \vartheta_{sto,vol,i} (V_{sto,use,i} - V_{sto,use,W})}{V_{sto,vol,i}} \quad (28)$$

#### 4.5.2.3. Indirektna predaja ili oduzimanje energije iz spremnika

U slučaju kada je temperatura vode u sloju niža od postavne temperature polaza, kotao ili dizalica se uključuju kako bi zagrijali vodu na postavnu temperaturu prema izrazu (29).

$$Q_{H,sto,vol,i} = V_{sto,vol,i} \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot (\vartheta_{sto,set} - \vartheta_{sto,vol,i}) \quad (29)$$

Postavna temperatura jednaka je polaznoj temperaturi sustava daljinskog grijanja, a povećanje temperature uzrokovano je dodatnim izvorom topline (kotao/dizalica topline) i računa se prema izrazu (30).

$$\Delta\vartheta_{vol,4} = \frac{Q_{H,sto,vol,4}}{V_{sto,vol,4} \cdot c_w \cdot \rho_w} \quad (30)$$

Izmjena topline između solarnog sustava i spremnika odvija se u donjem segmentu spremnika. Ukupna toplinska energija koja se dovodi u spremnik računa se prema prEN 15316-5:2021, a porast temperature u donjem segmentu spremnika računa se prema izrazu (31).

$$\Delta\vartheta_{vol,1} = \frac{Q_{H,sto,vol,1}}{V_{sto,vol,1} \cdot c_w \cdot \rho_w} \quad (31)$$

Porast temperature u pojedinim segmentima računa se prema izrazu (32):

$$\vartheta_{sto,vol,i} = \vartheta_{sto,vol,i} + \Delta\vartheta_{vol,1} \quad (32)$$

#### 4.5.2.4. Prirodna stratifikacija

Uslijed dovođenja topline i isporuke vode može se dogoditi da je temperatura u višem segmentu spremnika niža od temperature vode u višem sloju spremnika. U tom slučaju dolazi do adijabatskog miješanja dvaju segmenata. Proces se provodi iterativno sve dok temperaturni profil po visini spremnika ne postane stabilan. Temperatura slojeva spremnika nakon miješanja računa se prema izrazu (33):

$$\vartheta_{sto,vol,i} = \vartheta_{sto,vol,i+1} = \frac{\vartheta_{sto,vol,i} \cdot V_{sto,vol,i} + \vartheta_{sto,vol,i+1} \cdot V_{sto,vol,i+1}}{V_{sto,vol,i} + V_{sto,vol,i+1}} \quad (33)$$

## 5. REZULTATI

Kako bi se odabralo optimalno rješenje sustava solarnog daljinskog grijanja u kvartu grada Zagreba, bilo je potrebno provesti dovoljan broj simulacija te odabrati sustav sa najboljom učinkovitošću, a opet da mu je prihvatljiv period povrata investicije. Simulacije su se razlikovale prvenstveno u odabranim solarnim kolektorima koji će se nalaziti u kolektorskom polju. Također, vrlo važna je bila i njihova površina jer je prema njoj i potrebama potrošača, određen volumen spremnika. U sljedećim tablicama nalaze se podaci o različitim veličinama kolektorskih polja te broju kolektora koje ono sadrži koji su obrađeni u ovome radu. Tablica 6. odnosi se na pločasti kolektor čija površina iznosi 2,352 m<sup>2</sup>, dok Tablica 7. na vakuumski čija je površina 2,57 m<sup>2</sup>.

*Tablica 6. Veličine kolektorskog polja sa pločastim kolektorom*

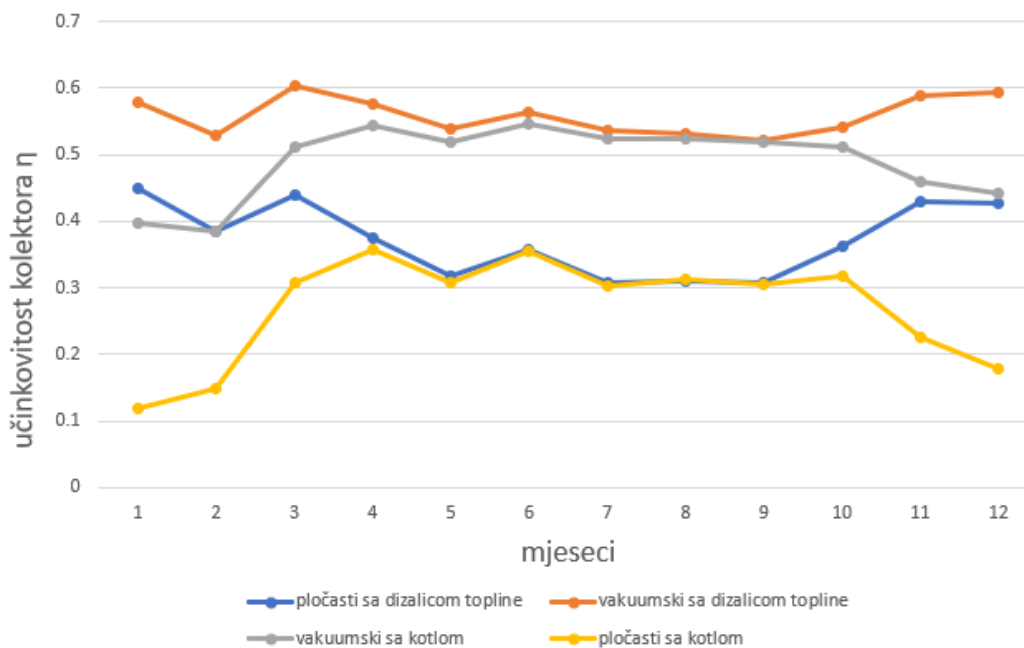
| <b>Površina kolektorskog polja [m<sup>2</sup>]</b> | <b>Broj kolektora N</b> |
|----------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>1500</b>                                        | 638                     |
| <b>1800</b>                                        | 765                     |
| <b>2000</b>                                        | 850                     |
| <b>2200</b>                                        | 935                     |
| <b>2250</b>                                        | 957                     |

*Tablica 7. Veličine kolektorskog polja sa vakuumskim kolektorom*

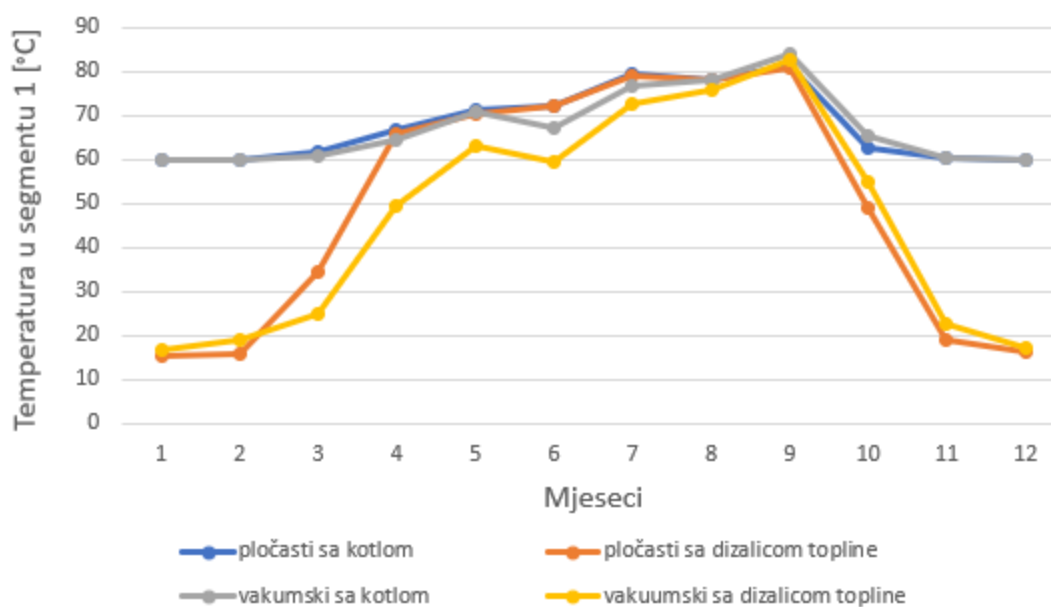
| <b>Površina kolektorskog polja [m<sup>2</sup>]</b> | <b>Broj kolektora N</b> |
|----------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>800</b>                                         | 311                     |
| <b>1000</b>                                        | 390                     |
| <b>1220</b>                                        | 475                     |

## 5.1. Učinkovitost kolektora

Učinkovitost kolektora izračunata je za svaki promatrani sustav pri volumenu spremnika od 800 000 L i površini kolektora od 2000 m<sup>2</sup>. Na Slici 20. može se vidjeti kako u oba sustava i sa dizalicom topline i sa kotlom na biomasu, vakuumski kolektor pokazuje veću učinkovitost od sustava izvedenih sa pločastim kolektorom. Sustav daljinskog grijanja sa kotlom i pločastim kolektorom pokazuje najmanju učinkovitost zimi, dok je ljeti približno jednaka sustavu sa dizalicom topline. Kod primjene solarnih sustava dimenzioniranih prema potrošnji ljeti, odnosno prema energiji za pripremu potrošne tople vode, učinkovitost pločastih kolektora više je od one kod vakuumskih. Zbog visokih temperatura ljeti, pločasti kolektor imat će manju učinkovitost od vakuumskog kolektora. Slika 21. pokazuje profile temperatura u segmentu 1 spremnika topline za analizirane slučajeve rada sustava. Dijagram pokazuje kako sustavi sa dizalicom topline postižu znatno niže temperature u spremniku topline. Sustavi sa kotlom kako je već naglašeno u radu ne postižu temperature u spremniku manje od 60°C.



Slika 20. Promjena učinkovitosti kolektora kroz godinu



Slika 21. Profil temperature vode u segmentu 1 spremnika topline

## 5.2. Optimalni kut nagiba kolektora

Kako je i jedan od bitnih faktora pri proračunu solarnog daljinskog grijanja i kut nagiba kolektora, provedene su simulacije za različite kutove. Optimizacija je provedena za kutove od 15 do 70°. Prema dobivenim rezultatima insolacija raste od 15 do 45° te ima najveći iznos kod kutova 30 i 45°. Kako nakon 45° vrijednost insolacije počinju padati, daljnji kutovi nisu uzeti u obzir. Optimalni kut nalazi se između 30 i 45°. Za očekivati je da će kod kuta nagiba od 30° insolacije u ljetnim mjesecima biti veće, dok će kod kuta od 45° biti veće u prijelaznim mjesecima. Za promatrane sustave poželjno je imati veće insolacije u prijelaznim mjesecima jer su sustavi sa sezonskim spremnikom tokom ljetnih perioda predimenzionirani. Stoga, u ovome radu prikazani su rezultati za optimalni kut nagiba od 45°. U Tablici 8. prikazane su vrijednosti ukupnih insolacija u godini za različite kutove nagiba kolektora.

Tablica 8. Vrijednosti insolacija za različite kutove nagiba kolektora

| Kut nagiba kolektora [°]                | 0       | 15      | 30      | 45      | 60      | 75      |
|-----------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Insolacija u godini [W/m <sup>2</sup> ] | 1366056 | 1505457 | 1574985 | 1562941 | 1467156 | 1297931 |



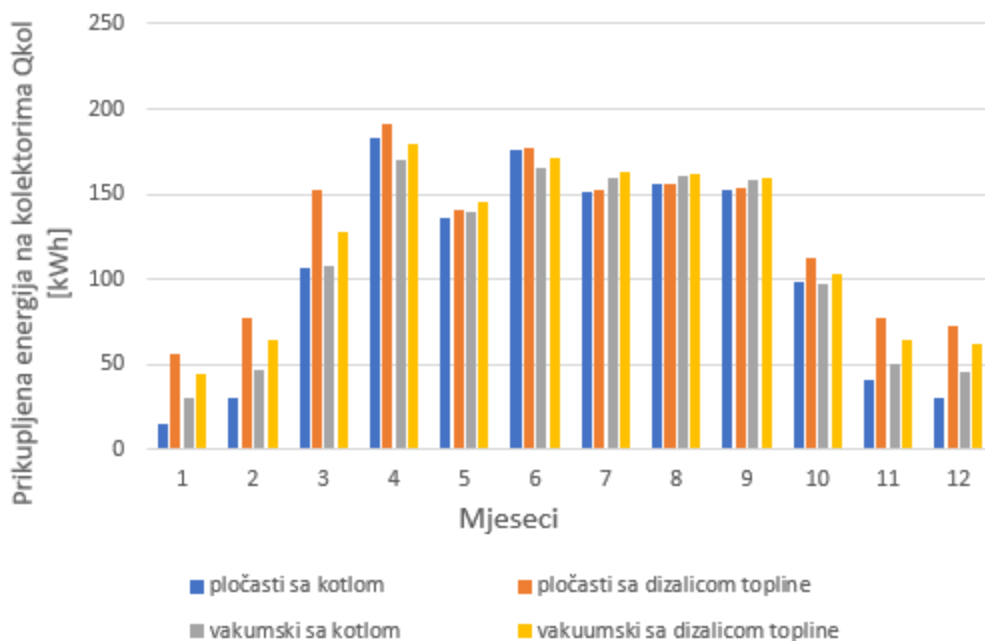
### 5.3. Specifična energija prikupljena u kolektorima

Kako bi se utvrdilo koji sustav može prikupiti najviše sunčeve energije, provedene su simulacije sa različitim vrstama kolektora u odnosu na volumena spremnika i površinu kolektorskog polja. U Tablici 9. dan je pregled analiziranih sustava ovisno o volumenu i površini te prikupljenoj energije na kolektorima. Vakuumski kolektori ne mogu imati istu površinu kolektorskog polja kao i pločasti pri istom volumenu spremnika jer tada dolazi do pregrijanja spremnika iznad 100°C. Također, drugi parametar usporedbe sustava bio je postići otprilike iste količine prikupljene energije u kolektorima.

Tablica 9. Pregled analiziranih sustava

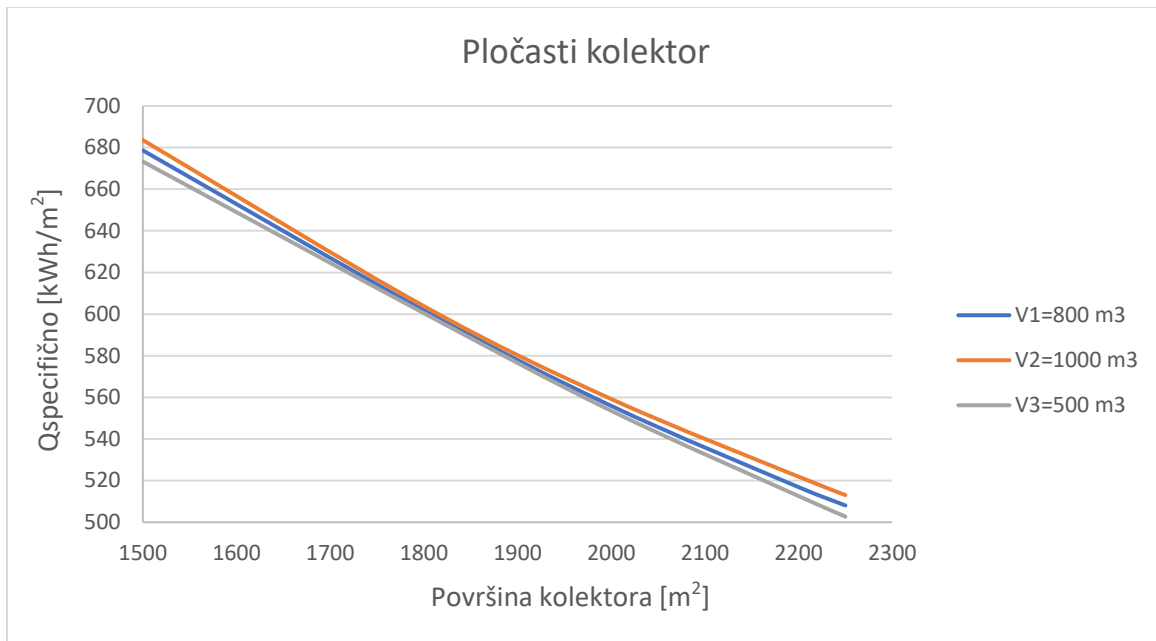
| Sustav                                 | Kapacitet spremnika V [m <sup>3</sup> ] | Površina kolektorskog polja Ak [m <sup>2</sup> ] | Specifična energija prikupljena u kolektorima [kWh/m <sup>2</sup> ] | Ukupna energija prikupljena u kolektorima [kWh] |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Pločasti kolektori + kotao na biomasu  | 800                                     | 2000                                             | 467,72                                                              | 935 440                                         |
| Pločasti kolektori + dizalica topline  | 800                                     | 2000                                             | 555,91                                                              | 1 111 820                                       |
| Vakuumski kolektori + kotao na biomasu | 800                                     | 1220                                             | 799,91                                                              | 975 890                                         |
| Vakuumski kolektori + dizalica topline | 800                                     | 1220                                             | 867,57                                                              | 1 058 435                                       |

Na Slici 22. dijagramski je prikazana ukupna energija prikupljena na kolektorima po mjesecima ovisno o vrsti kolektora i sustavu u koji su implementirani.

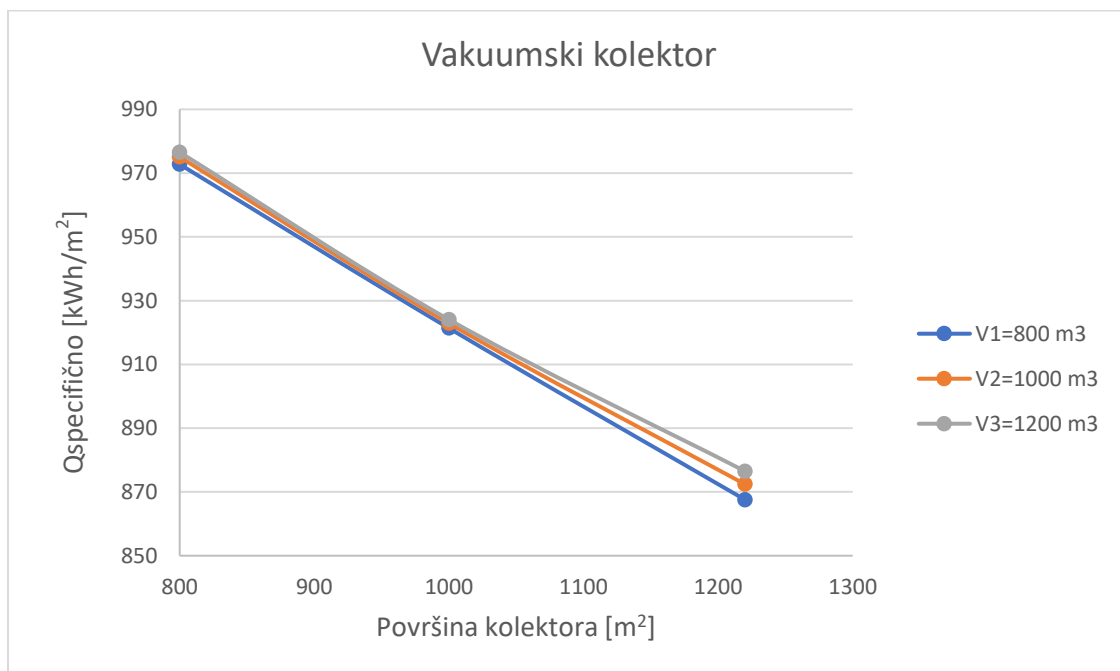


Slika 22. Ukupna energija prikupljena na kolektorima

Na temelju odabranih sustava, provedene su simulacije za različite površine kolektorskog polja i volumena spremnika. Na sljedećim slikama može se vidjeti promjena specifične energije prikupljene na kolektorima u odnosu na promjenu volumena i površine kod pločastih i vakuumskih kolektora. Iz dijagrama se može zaključiti kako puno više energije po kvadratu površine može prikupiti vakuumski kolektor u odnosu na pločasti. Također, bitno je napomenuti kako su vakuumski kolektori duplo skuplji od pločastih što može biti bitan kriterij prilikom odabira sustava.



Slika 23. Prikupljena energija u pločastom kolektoru



Slika 24. Prikupljena energija u vakuumskom kolektoru

## 6. PERIOD POVRATA INVESTICIJE

Kod perioda povrata investicije usporedili su se svi sustavi analizirani u ovome radu. Konačna površina solarnog kolektorskog polja i volumena spremnika odabrani su na temelju najmanje jednostavnog perioda povrata uvažavajući pri tome tehnička ograničenja. Jednostavni period povrata računa se kao kvocijent ukupnih investicijskih troškova prilikom sustava sa solarnim kolektorima i dizalicom topline te godišnje uštede. Godišnja ušteta računala se u odnosu na neki referentni sustav. Kao referentni sustav uzet je kotao na biomasu. Za referentni sustav izračunata je isporučena energija gorivom, što je u ovome slučaju bila drvena sječka. Isporučena energija izračunata je kao zbroj ukupne energije za grijanje i pripremu tople vode podijeljen sa efikasnosti kotla. Vrijednost efikasnosti kotla  $\eta$ , uzeta je 0,9. Cijena dizalice topline uzeta je milijun eura. Investicijski troškovi sustava solarnih kolektora  $I_{sol}$  uzeti su 200 eura/m<sup>2</sup> pločastog kolektora, a 400 eura/m<sup>2</sup> za vakuumske kolektore. Investicija spremnika topline  $I_{sto}$  uzeta je 300 eura/m<sup>3</sup> dok se troškovi dizalice  $I_{DT}$  procjenjuju na milijun eura, a ostali troškovi  $I_{oth}$  15000 eura. Kako je prikazano izrazom (34), svi navedeni investicijski troškovi su zbrojeni i dobivena ukupna investicija sustava.

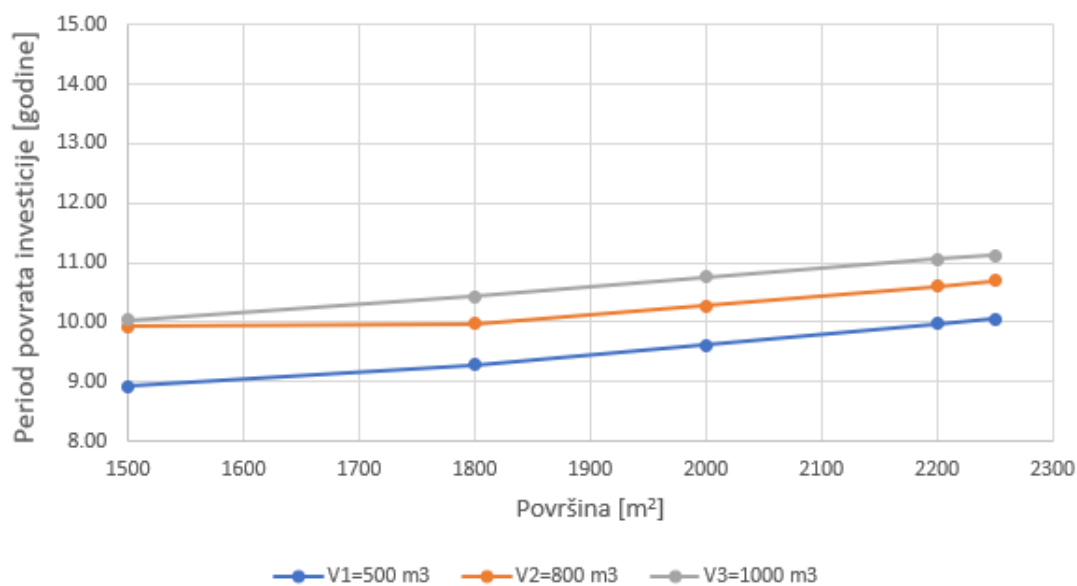
$$I_{uk} = I_{sol} + I_{sto} + I_{DT} + I_{oth} \quad (34)$$

Kako bi period povrat investicije bio izračunat, uz investicijske troškove potrebno je izračunati uštedu  $S$  kao razliku troškova postojećeg sustava daljinskog grijanja sa kotlom na biomasu i troškova novog sustava sa solarnim kolektorima i dizalicom topline. Troškovi su izračunati za cijenu drvne sječke 0,1 eura/kWh, a industrijska cijena električne energije uzeta je 0,14 eura/kWh. Ušteta je izračunata prema izrazu (35). Troškovi sustava sa dizalicom određeni su kao cijena električne energije potrebne za rad kompresora. Naposljetku, period povrata investicije izračunat je prema izrazu (36).

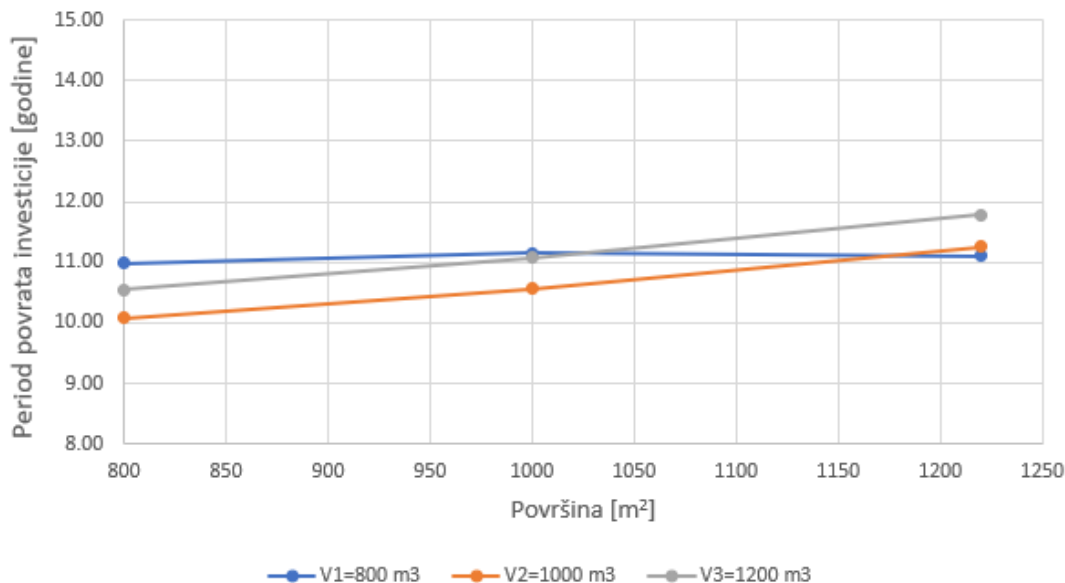
$$S = \text{Troškovi kotla na biomasu} - \text{Troškovi solara sa dizalicom topline} \quad (35)$$

$$P = \frac{I_{UK}}{S} \quad (36)$$

Na Slikama 25. i 26. prikazane su dobivene vrijednosti perioda investicije. Proračun povrata investicije proveden je za slučaj kada je sustav izveden sa dizalicom topline, pošto su se sustavi sa kotlom provedenim analizama pokazali neučinkoviti. Slika 25. prikazuje povrat investicije za pločasti kolektor u odnosu na različite veličine volumena spremnika i površine kolektorskog polja, dok Slika 26. prikazuje povrat investicije za vakuumski kolektor.



Slika 25. Period povrata investicije za pločasti kolektor



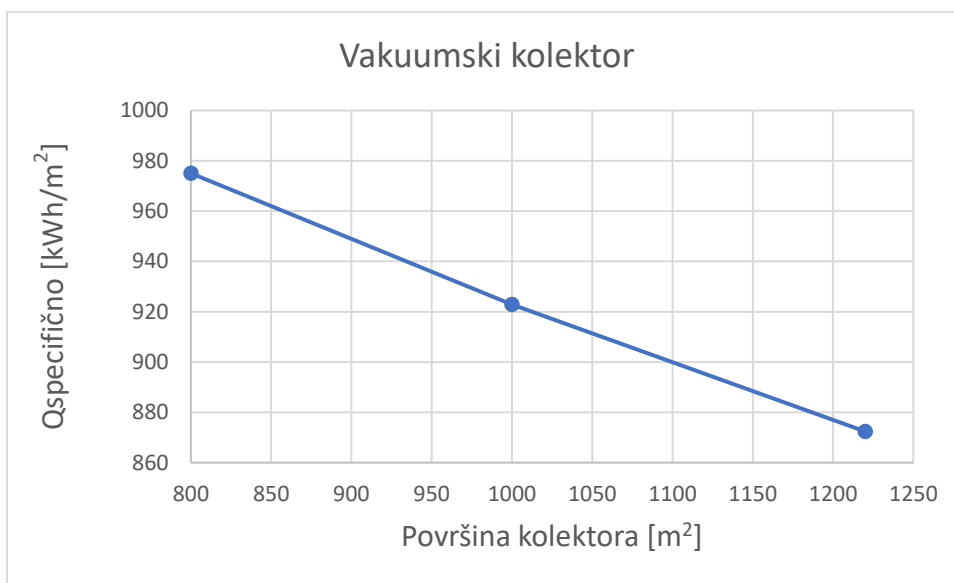
Slika 26. Period povrata investicije za vakuumski kolektor

Uzevši u obzir period povrata investicije, učinkovitost kolektora te prikupljenu energiju na kolektorima odabran je optimalni sustav za solarno daljinsko grijanje za kvart na području grada Zagreba. Osim povoljnih svojstava i visoke učinkovitosti, sustav sa vakuumskim kolektorom i dizalicom topline ima kraći period povrata investicije od pločastog kolektora sa dizalicom topline, iako je sama cijena kolektora otprilike dvostruko veća. Vakuumski kolektor sa volumenom spremnika 1000 m<sup>3</sup> i površinom kolektorskog polja 800 m<sup>2</sup> može prikupiti najveću količinu energije po kvadratu kolektora te se pokazao kao sustav sa najvećom učinkovitosti preko cijele godine. Također, postoji mana, a to je da će kompresor trošiti nešto više električne energije nego što je to slučaj kod ostalih izvedbi.

## 7. ODABRANI SUSTAV

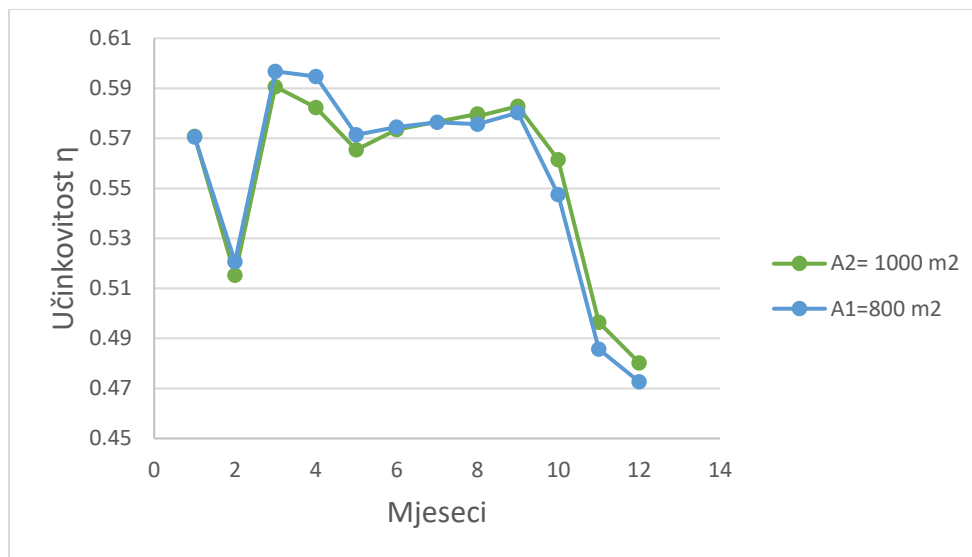
Nakon provedenih simulacija i proračuna perioda povrata sa različitim volumenima spremnika, površinama kolektorskih polja i vrstama kolektora, odabran je sustav solarnog daljinskog grijanja sa vakuumskim kolektorima i dizalicom topline. Sustavi sa kotlom pokazali su se neučinkoviti te se u budućnosti teži njihovoj zamjeni. Sustav sa najboljim karakteristikama je sustav sa površinom kolektorskog polja 800 m<sup>2</sup> i volumenom spremnika 1000 m<sup>3</sup>. Odabrani sustav ima najveću učinkovitost tijekom cijele godine. Na Slici 27. može se vidjeti promjena specifične

energije prikupljene po kvadratu vakuumski kolektora za volumen spremnika od  $1000 \text{ m}^3$ . Kada se analizira ukupno prikupljena energija u kolektorima, najveći iznos je pri površini kolektora od  $800 \text{ m}^2$ , ali razlika u odnosu na površinu od  $1000 \text{ m}^2$  je  $50 \text{ kWh/m}^2$ . Specifična prikupljena energija na kolektorima iznosi  $922 \text{ kWh/m}^2$  čime se pokriva  $40,73\%$  toplinskih potreba potrošača.



Slika 27. Promjena specifične energije prikupljene na kolektorima

Prema prije prikazanim analizama, vakuumski kolektori pokazuju znatno veću učinkovitost od pločastih. Prilikom odabira sustava, bitno je analizirati učinkovitost vakuumskih kolektora pri volumenu spremnika  $1000 \text{ m}^3$  i dvjema površinama kolektora koje imaju sličnu krivulju učinkovitosti. Na Slici 28. prikazane su krivulje učinkovitosti za različite površine kolektorskih polja. Plava krivulja pokazuje učinkovitost kolektorskog polja od  $800 \text{ m}^2$ , dok zelena od  $1000 \text{ m}^2$ . Maksimalne vrijednosti učinkovitosti iznose oko  $60\%$  u travnju, a razlog tomu je odabrani kut nagiba kolektora od  $45^\circ$  pod kojim se tada prikupljaju najveće vrijednosti dozračene energije Sunca. Iako u drugoj polovici godine učinkovitost kolektorskog polja površine  $800 \text{ m}^2$  pada u odnosu na površinu od  $1000 \text{ m}^2$ , treba imati na umu kako je povrat investicije ipak kraći kod sustava sa manjom površinom.



Slika 28. Krivulja učinkovitosti vakuumskih kolektora

Uz isplativost sustava, potrebno je pratiti i profil temperatura vode u sezonskom spremniku kako ne bi prekoračili postavljena ograničenja. Temperatura u spremniku ne prelazi 60°C te će sustav zbog dizalice topline raditi učinkovitije na nižim temperaturama.

## 8. SUSTAV FOTONAPONSKIH PANELA SA DIZALICOM TOPLINE

Nakon odabranog sustava solarnog daljinskog grijanja sa vakuumskim kolektorima i dizalicom topline, provedena je optimizacija površine fotonaponskih panela. Prema normi EN 15316-4-6:2008 odabrane su karakteristike monokristalnih fotonaponskih panela sa učinkovitošću od 0,15 te rad sa dizalicom topline sa SCOP-om vrijednosti 3. Proračun je proveden uz uvjet da je energija potrebna za rad kompresora kod odabranog vakuumskog sustava jednaka razlici energije za rad kompresora kod fotonaponskog sustava i prikupljenoj energiji na fotonaponskim panelima. Energija za rad kompresora kod fotonaponskog sustava izračunata je kao zbroj potrebne energije za grijanje i pripremu potrošne tople vode, podijeljene sa sezonskim COP-om. U izrazima (37) i (38) prikazan je postupak proračuna koji je proveden za svaki sat u godinu. Nakon provedene



simulacije, dobivena je konačna površina fotonaponskih panela sa prije objašnjenim uvjetima te ona iznosi 1954 m<sup>2</sup>.

$$Q_{komp\_vakuum} = Q_{komp\_fotonapon} - Q_{fotonapon} \quad (37)$$

$$Q_{komp\_fotonapon} = \frac{Q_{H,nd} + Q_w}{SCOP} \quad (38)$$

Tablica 11. Obilježja odabranog sustava fotonaponskih panela sa dizalicom topline

|                                                        |               |
|--------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Učinkovitost</b>                                    | 0,15          |
| <b>Vrsta panela</b>                                    | monokristalni |
| <b>Ukupna površina [m<sup>2</sup>]</b>                 | 1954          |
| <b>Energija potrebna za rad kompresora [kWh]</b>       | 603 632.5     |
| <b>Ukupna prikupljena energija [kWh/m<sup>2</sup>]</b> | 214,33        |
| <b>SCOP</b>                                            | 3             |

Kao i kod solarnih toplovodnih sustava, izračunat je period povrata investicije za fotonaponske panele sa dizalicom topline. Cijena fotonaponskog panela uzeta je 1000 eura, dok su troškovi dizalice ostali isti. Ukupno proizvedena energija na fotonaponskim panelima iznosi 458 074,6 kWh te je prema tome izračunat čisti novčani tok u godini dana. Novčani tok izračunat je kao umnožak prikupljene energije i cijene 0,5 eura/kWh te iznosi 183 229,84 eura sa odbijenim PDV-om od 20%. Naposljetku, izračunat je period povrata investicije kao količnik investicije i novčanog toga te iznosi 16,15 godina što je puno dulji period povrata u odnosu na toplovodne solarne kolektore.

## 9. ZAKLJUČAK

U ovome radu dan je detaljan pregled sustava solarnog daljinskog grijanja u Europi. Kako je pokazano, predvodnik u razvoju takvih sustava je Danska te mnoge zemlje EU razvijaju sustave po uzoru na izvedene danske sustave. Istraživanja provedena u Danskoj pokazuju kako su solarni sustavi daljinskog grijanja isplativi i ekološki prihvatljiviji u odnosu na klasične sustave daljinskog grijanja. Sustavi sa solarima izvedeni su na brojne načine, sa kotlovima na plin ili biomasu kao i sa dizalicama topline. Vodeći se primjerom sustava iz Graza („Big Solar Graz“) koji se sastoji od velikog kolektorskog polja, sezonskog spremnika topline i dizalice topline, provedena je simulacija takvog sustava za područje grada Zagreba. Pretpostavljeno je 25 zgrada sa ukupno 4 000 potrošača te izračunata potrebna energija za grijanje i pripremu potrošne tople vode. Zbroj te dvije energije čini ukupno opterećenje te iznosi 1811 MWh godišnje. Simulacije rada sustava provedene su za pločasti i vakuumski tip kolektora. Ukupna dozračena energija od Sunca izračunata je prema *Algoritmu za pripremu meteoroloških podataka kod izračuna energijskog svojstva zgrada [9]* za kutove nagiba kolektora od 15 do 70° te je odabran nagib od 45°. Jedno od ograničenja ove analize je da optimizacija kuta nije provedena zajedno sa proračunom, već zasebno. Temeljem toga izračunata je energija prikupljena na kolektorima za sustave različitih površina kolektorskog polja i kapaciteta spremnika topline. Termodinamički model spremnika topline proveden je prema normi prEN 15316–5:2021 uz ograničenje da temperatura u spremniku ne prijeđe 100°C. Provedene simulacije pokazuju kako su sustavi sa pločastim kolektorskim polje i kotlom manje učinkoviti, dok sa dizalicom topline pokazuju bolje rezultate zbog mogućnosti rada na nižem temperaturnom režimu. Dizalica topline analizirana u ovome radu pretpostavljena je sa vrijednosti COP-a koju ostvaruju slični sustavi u praksi, a koji iznosi 4,6. Kao optimalni sustavi pokazali su se oni sa vakuumskim kolektorima i dizalicom topline. Imaju najveću učinkovitost te količinu specifične prikupljene energije u kolektorima. Kod vakuumskih kolektora postižu se niže temperature u spremniku u odnosu na pločaste. Niži temperaturni režime doprinose boljem radu dizalice topline. Također, rezultati dobiveni za period povrata investicije pokazuju kako je vrijeme povrata investicije prihvatljivo, iako im je cijena veća od pločastih kolektora. Period povrata investicije u odnosu na pločaste kolektore je dvije godine dulji. Kao sustav sa optimalnim karakteristikama odabran je onaj sa površinom vakuumskog kolektorskog polja 800 m<sup>2</sup> i

volumenom spremnika od 1000 m<sup>3</sup>. Učinkovitost takvih sustava iznosi oko 60%, dok specifična energija prikupljena u kolektorima iznosi 922 kWh/m<sup>2</sup> čime se pokriva 40,73% toplinskih potreba potrošača s obzirom na klasične sustave gdje vrijednosti specifične energije prikupljene u kolektorima iznose između 500 i 600 kWh/m<sup>2</sup>. Na kraju je provedena analiza sustava sa fotonaponskim panelima i dizalicom topline. Karakteristike fotonaponskih panela i proračun, preuzeti su iz norme EN 15316-4-6:2008. Odabrani su monokristalni fotonaponski paneli sa učinkovitošću 0,15. Dizalica topline koja je spojena na sustav fotonaponskih panela ima vrijednost SCOP-a 3. Proračun je proveden uz uvjet da je energija potrebna za rad kompresora kod odabranog vakuumskeg sustava jednaka razlici energije za rad kompresora kod fotonaponskog sustava i prikupljenoj energiji na fotonaponskim panelima. Konačna površina fotonaponskih panela iznosi 1954 m<sup>2</sup>, dok ukupna prikupljena energija na panelima iznosi 214,33 kWh/m<sup>2</sup>. U usporedbi sa solarnih toplovodnim sustavima, investicijski troškovi fotonaponskih panela su veći te period povrata investicije iznosi 16,15 godina.

## 10. LITERATURA

- [1] Daniel Trier, Christian K. Skov, Simon S. Sørensen, Federico Bava: Solar district heating and possibilities, Danska 2018.
- [2] Patrick Reiter, Hannes Poier, Christian Holter: BIG Solar Graz: Solar district heating in Graz, Austrija 2015.
- [3] Roman Marx, Dan Bauer, Harald Drucek: Energy Efficient Integration of Heat Pumps into Solar District Heating Systems with Seasonal Thermal Energy Storage, Stuttgart, 2013.
- [4] Dović, Damir: Obnovljivi izvori energije, Uporaba sunčeve energije u termotehničkim sustavima, FSB, Zagreb, 2012.
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=WDyHSHD-aHI&t=186s>, SDHp2m: Coaching webmeeting – solar and biomass DH, 2018.
- [6] EN 15316-4-6:2008
- [7] prEN 15316–5:2021
- [8] HRN EN 15316-4-3:2017
- [9] Dović, Damir: Algoritam za pripremu meteoroloških podataka kod izračuna energijskog svojstva zgrada, FSB, Zagreb, 2020.