Optimizacija rada centraliziranog toplinskog sustava baziranog na tehnologijama brzog odziva

Kastrapeli, Šimun

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:148837

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Šimun Kastrapeli

Zagreb, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr.sc. Tomislav Pukšec

Student:

Šimun Kastrapeli

Zagreb, rujan 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Tomislavu Pukšecu te asistentu Hrvoju Dorotiću, mag.ing. na pruženoj stručnoj pomoći i savjetima tokom izrade ovog rada.

Dodatno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili velika podrška tijekom cijelog preddiplomskog studija.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Šimun Kastrapeli** Mat. br.: **0035204345**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija rada centraliziranog toplinskog sustava baziranog na tehnologijama brzog odziva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of district heating system operation based on power-to-heat technologies**

Opis zadatka:

Centralizirani toplinski sustavi (CTS) imaju mogućnost proizvodnje toplinske energije na središnjoj lokaciji koja se zatim putem toplovoda distribuira do krajnjih potrošača. Njihovim korištenjem moguće je postići niže specifične troškove kapitala i vođenja sustava te iskoristiti postojeće niskotemperaturne izvore toplinske energije uporabom dizalica topline. Oni će imati ključnu ulogu u budućim energetskim sustavima s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije kao što su sunce i vjetar. Tijekom perioda visoke proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, cijena električne energije će biti relativno niska. To će omogućiti jeftinu proizvodnju toplinske energije u CTS-u koja se potom može skladištiti u toplinskim spremnicima za korištenje u periodima visoke potražnje za toplinskom energijom. Cilj ovoga rada je provesti optimizaciju rada takvih sustava uzimajući u obzir različite parametre poput tržišne cijene energije i različitih tehnologija.

U sklopu rada potrebno je:

1. Izraditi detaljan pregled literature o centraliziranim toplinskim sustavima;
2. Opisati integraciju sustava proizvodnje toplinske i električne energije te opisati princip rada tržišta energije;
3. Unaprijediti postojeći model optimizacije rada centraliziranog toplinskog sustava, razvijenog na Katedri za energetska postrojenja i energetiku;
4. Predložiti barem tri konfiguracije sustava uzimajući u obzir različite tehnologije proizvodnje i skladištenja toplinske energije;
5. Izraditi tehno-ekonomsku analizu i napraviti usporedbu rezultata.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Dr. sc. Tomislav Pukšec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA iii
POPIS TABLICA iv
POPIS KRATICA v
POPIS OZNAKA vi
SAŽETAK vii
SUMMARY viii
1. UVOD 1
2. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI 2
2.1. Razvoj i povijest CTS-a 2
2.1.1. Prva generacija CTS-a 3
2.1.2. Druga generacija CTS-a 3
2.1.3. Treća generacija CTS-a 3
2.1.4. Četvrta generacija CTS-a 3
2.1.5. Peta generacija CTS-a 3
2.2. Izvori topline 4
2.2.1. Fosilna goriva 4
2.2.2. Geotermalna energija 4
2.2.3. Dizalice topline 5
2.3. Distribucijski sustav 5
2.4. CTS u Europskoj Uniji 5
2.5. CTS u Republici Hrvatskoj 6
2.6. Kogeneracijska postrojenja 8
2.6.1. Postrojenje s protutlačnom turbinom 8
2.6.2. Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare 9
2.6.3. Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova 10
2.6.4. Trigeneracija 10
2.6.5. Kogeneracija u Hrvatskoj 11
3. TRŽIŠTE ENERGIJE 12
3.1. Tržište električne energije 12
3.2. Tržište toplinske energije 12
4. MODEL OPTIMIZACIJE 13
4.1. Unaprijeđenje modela 16
4.2. Analiza ulaznih podataka 17

4.2.1. Ovisnost COP dizalice topline o temperaturi mreže 17
4.2.2. Ovisnost Cb o temperaturi mreže 18
4.2.3. Ovisnost $ST_{specific}$ o temperaturi mreže 19
5. OPTIMIZACIJA TRI RAZLIČITA SCENARIJA 21
5.1. Metoda usporedbe 21
5.2. Scenarij 1 (HOB + CHP + TES) 23
5.2.1. Podscenarij 1.1 (Visokotemperaturna mreža) 24
5.2.2. Podscenarij 1.2 (Srednjetemperaturna mreža) 25
5.2.3. Podscenarij 1.3 (Niskotemperaturna mreža) 25
5.2.4. Usporedba podataka za scenarij 1 26
5.3. Scenarij 2 (HOB + CHP + HP + TES) 28
5.3.1. Podscenarij 2.1 (visokotemperaturna mreža) 29
5.3.2. Podscenarij 2.2 (srednjetemperaturna mreža) 29
5.3.3. Podscenarij 2.3 (niskotemperaturna mreža) 30
5.3.4. Usporedba podataka za scenarij 2 31
5.4. Scenarij 3 (HOB + CHP + HP + ST + TES) 33
5.4.1. Scenarij 3.1 (visokotemperaturna mreža) 33
5.4.2. Scenarij 3.2 (srednjetemperaturna mreža) 33
5.4.3. Scenarij 3.3 (niskotemperaturna mreža) 34
5.4.4. Usporedba podataka za scenarij 3 34
6. ANALIZA REZULTATA 36
7. ZAKLJUČAK 41
Izvori 42

POPIS SLIKA

Slika 1. Grafički prikaz generacija CTS-a[5] 2
Slika 2. Shema CTS-a pete generacije[6] 4
Slika 3. Prikaz udjela različitih goriva u CTS-u 6
Slika 4. Udjeli potrošnje energije iz CTS-a 7
Slika 5. Pregled CTS-ova u Hrvatskoj[9] 7
Slika 6. Shema kogeneracijskog postrojenja s protutlačnom turbinom[11] 9
Slika 7. Shema kogeneracijskog postrojenja s reguliranim oduzimanjem pare[11] 9
Slika 8. Shema kogeneracijskog postrojenja s korištenjem otpadne topline DP[11] 10
Slika 9. Potreba za toplinskom energijom 14
Slika 10. Specifična proizvodnja topline iz solara 14
Slika 11. Satna cijena električne energije 15
Slika 12. COP dizalice topline 15
Slika 13. Vanjska temperatura 16
Slika 14. Temperature mreže 17
Slika 15. Odnos temperature polaza i COP-a DT 18
Slika 16. Ovisnost Cb o T_DH[13] 19
Slika 17. Odnos temperature polaza i Cb 19
Slika 18. Odnos temperature mreže i $ST_{specific}$ 20
Slika 19. Utjecaj smanjenja temperature mreže na LCOH i RC, scenarij 1 26
Slika 20. Odnos troškova pogona i investicije, scenarij 1 26
Slika 21. Odnos fiksnih, varijabilnih i troškova goriva, scenarij 1 27
Slika 22. Utjecaj smanjenja temperature mreže na LCOH i RC, scenarij 2 31
Slika 23. Odnos troškova pogona i investicije, scenarij 2 31
Slika 24. Odnos fiksnih, varijabilnih i troškova goriva, scenarij 2 32
Slika 25. Utjecaj smanjenja temperature mreže na LCOH i RC, scenarij 3 34
Slika 26. Odnos troškova pogona i investicije, scenarij 3 35
Slika 27. Odnos fiksnih, varijabilnih i troškova goriva, scenarij 3 35
Slika 28. Zahtjev za toplinskom energijom i period korištenja tehnologija, scenarij 1 37
Slika 29. Napunjenost spremnika toplinske energije, scenarij 1 37
Slika 30. Zahtjev za toplinskom energijom i period korištenja tehnologija. scenarij 2 38
Slika 31. Napunjenost spremnika toplinske energije, scenarij 2 38
Slika 32. Zahtjev za toplinskom energijom i period korištenja tehnologija, scenarij 3 39

Slika 33. Napunjenost spremnika toplinske energije, scenarij 3 39

POPIS TABLICA

Tablica 1. COP dizalice topline 18
Tablica 2. Vrijednosti za izračun LCOH različitih tehnologija 22
Tablica 3. Isprobane konfiguracije scenarija 1 24
Tablica 4. Isprobane konfiguracije sustava za scenarij 2 28
Tablica 5. LCOH svih devet konfiguracija 36

POPIS KRATICA

Kratica	Puni naziv
BE	Bioenergana
CHP	Kogeneracijsko postrojenje (engl. *Cogeneration heat plant*)
CO_2	Ugljični dioksid
CTS	Centralizirani toplinski sustav
DP	Dimni plinovi
EL	Elektrana
EU	Europska Unija
HEP	Hrvatska elektroprivreda
HOB	Bojler (engl. *Heat-only boiler*)
HP	Dizalica topline (engl. *Heat pump*)
INA	Industrija nafte
MIT	Massachusetts Institute of Technology
OIE	Obnovljivi izvori energije
RH	Republika Hrvatska
SAD	Sjedinjene Američke Države
ST	Solari (engl. *Solar thermal*)
TE	Termoelektrana
TES	Spremnik toplinske energije (engl. *Thermal energy storage*)
TO	Toplana

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_1	$W/(K*m^2)$	Gubitak topline prvog reda
a_2	$W/(K^2*m^2)$	Gubitak topline drugog reda
C_b	-	Koeficijentproizvodnje električne energije
COP	-	Koeficijent učinkovitosti dizalice topline (engl. *Coefficient of performance*)
C_{TES}	MWh	Kapacitet spremnika toplinske energije
DEM	MW	Zahtjev za toplinskom energijom
E_t	MWh	Godišnje proizvedena toplinska energija
f_L	-	Lorenzov faktor
F_t	€	Godišnji trošak goriva
G_k	W/m^2	Globalna solarna ozračenost
I_{EL}	€	Prihod CHP-a od proizvodnje električne energije
I_t	€	Investicijski troškovi
LCOH	€/MWh	Iznivelirana cijena topline (engl. *Levelised cost of heat*)
M_t	€	Godišnji troškovi održavanja
$M_{t:fix}$	€	Godišnji fiksni troškovi održavanja
M_{t_var}	€	Godišnji varijabilni troškovi održavanja
n	god	Očekivani vrijek trajanja postrojenja
P_{CHP}	MW	Maksimalna snaga kogeneracije
P_{HOB}	MW	Maksimalna snaga bojlera
P_{HP}	MW	Maksimalna snaga dizalice topline
r	-	Diskontna stopa
RC	€/MWh	Troškovi pogona (engl. *Running costs*)
$ST_{specific}$	W/m^2	Specifična toplina proizvedena na solaru
T_{DH}	°C	Temperatura polaza mreže
T_m	°C	Prosječna temperatura mreže
T_{out}	°C	Temperatura vanjskog zraka
η_0	-	Optička iskoristivost solara

SAŽETAK

Centralizirani toplinski sustavi tehnologija su kojom se toplinska energija proizvodi na jednoj lokaciji te zatim toplovodnim ili vrelovodnim sustavima distribuira do potrošača. Korištenjem ovakvih sustava nasuprot lokalnih mogu se postići niži troškovi proizvodnje i vođenja sustava. U CTS-ove novijih generacija također lako se implementiraju sustavi s OIE poput vjetra ili solara, a pomoću dizalica topline mogu se iskoristiti i niskotemperaturni izvori topline.

U sklopu ovog rada analizirano je kako se CTS-ovi s različitim tehnologijama proizvodnje i skladištenja toplinske energije brzog odziva mogu optimizirati da se u svakom satu toplinska energija dobiva iz točno onog izvora koji je u tom trenutku najisplativiji. Proučavane su tri različite konfiguracije sustava s obzirom na to koje se tehnologije koriste. Također svaka od konfiguracija je dodatno podijeljena u tri scenarija kako bi se analizirao utjecaj smanjenja temperature polaznog voda CTS-a. Tri korištene tehnologije imaju varijable koje su izravno ovisne o temperaturi mreže te je promatrano kako će smanjenje temperature mreže utjecati na njih te cijenu proizvodnje toplinske energije.

U prvom scenariju korištene su samo dvije tehnologije, kogeneracija na biomasu i bojler te je utjecaj smanjenja temperature mreže promatran preko omjera električne i toplinske snage kogeneracijskog postrojenja. U drugom scenariju dodana je još i dizalica topline zrak-voda čiji COP također ovisi o temperaturi mreže pa je promatran utjecaj na dva faktora. Konačno u trećem scenariju u konfiguraciju su dodani i solarni paneli za proizvodnju topline. Kod njih je u ovisnosti s temperaturom mreže specifična proizvedena toplina kao treći faktor čiji se utjecaj promatrao.

U svakom od scenarija smanjenje temperature mreže dovelo je do smanjenja LCOH te RC odnosno manjih troškova proizvodnje toplinske energije. Također pokazalo se da uvođenjem dizalice topline i solarnih panela dodatno pada LCOH što je činjenica koja ide u prilog ugrađivanju novijih i čišćih tehnologija proizvodnje toplinske energije. Spremnik toplinske energije također je pokazao svoju korist kada se koriste novije tehnologije preuzimajući toplinu koju su one proizvodile po niskoj cijeni, a koja bi bez prisutnosti spremnika bila beskorisna te bi se vjerojatno kasnije toplina morala proizvoditi po višoj cijeni.

S čisto ekonomskog gledišta najbolja je kombinacija iz drugog scenarija s niskotemperaturnom mrežom koja je ostvarila najbolji LCOH. Ipak i scenarij sa solarnim panelima je vrlo sličnog LCOH te nižih troškova proizvodnje, a i koristi obnovljive izvore energije pa se može opravdati i opcija korištenja te konfiguracije.

SUMMARY

In district heating systems heat is generated at a centralized location and then distributed to the consumers through a piping system. Using this kind of systems instead of local heating can result in lower operation and maintenance costs. Also, renewable energy sources like wind or solar power are easily incorporated into new generation DH systems.

This paper offers theoretical analysis on optimization of DH systems with different heat generating and storing technologies. The goal was to optimize those in a way that every hour the heat comes from most cost-effective source. Three different configurations of DH system were used. Also, every configuration had threes subscenarios in which effect of lowering the DH system temperature was analysed. Three heat generating technologies have variables which are affected by lowering the DH system temperature so the insight on those effects is offered.

First scenario uses only two technologies, biomass cogeneration heat plant and biomass heat only boiler. Lowering of system temperature had effect on power to heat ratio of the cogeneration plant. In the next scenario air-water heat pump was added to the configuration. Its COP is also dependent on the system temperature so there was two varibles affected by changing the temperature. Third scenario uses solar thermal panels as the fourth heat generation technology. Specific heat generated by solar thermal plant is the variable which indirectly depends on the system temperature.

In every scenario lowering the system temperature had an effect of lowering the LCOH and RC which results in lower costs of generating heat. Also implementing the heat pump and solar thermal plant had the further effect of lowering LCOH which contributes to the idea of implementing RES technologies. Thermal energy storage also had its use because it stored the excess heat generated in times of low costs which would have been useless if there was no sstorage and the heat would probably have to be generated at higher cost later when needed.

From the economic point of view, the second scenario low DH system temperature configuration is the best because it offers the best LCOH. The third scenario is better from the ecology and running costs point of view because it uses RES so the usage of that configuration can also be justified.

1. UVOD

Globalno zagrijavanje uzrokovano visokim emisijama stakleničkih plinova veliki je problem našeg planeta. Na to nam konstantno ukazuju razni podaci. Tako su prosječne svjetske temperature u neprestanom porastu kao i koncentracija ugljičnog dioksida i ostalih stakleničkih plinova dok se ledene kape sve više otapaju i posljedično uzrokuju podizanje morske razine.

Ove promjene su izravno izazvane čovjekovim djelovanjem te iz tog razloga treba povlačiti poteze koji će te promjene usporiti te u konačnici i zaustaviti. Iz tog razloga donose se regulative na svjetskoj, ali i na EU razini koje baš to imaju za cilj. Prvi globalni korak prema tome bio je Kyoto protokol kojim su se 192 potpisnice obvezale pratiti emisije stakleničkih plinova [1] te ukoliko su poptisale i dodatni aneks i smanjiti te emisije u odnosu na baznu godinu. Hrvatska je protokol potpisala 2007. godine te se obvezala u periodu 2008-2012. smanjiti emisije na 95% emisija 1990. godine. Idući korak bio je Pariški sporazum potpisan 2015. godine kojim su se potpisnice (187 država svijeta) obvezale uložiti napore da se porast globalne temperature u ovom stoljeću održi ispod 2°C, a ako je moguće i ispod 1,5°C[2]. Prema postojećim scenarijima za uspjeh u ovom naumu potrebno je vrlo brzo smanjivati emisije stakleničkih plinova, a do 2050. godine dovesti ih vrlo blizu nule. Također se zahtjeva i povećanje udjela OIE u ukupnoj proizvodnji energije.

Dodatno je na razini EU donesena strategija 20-20-20 cilj koje je da u 2020. godini emisije budu smanjene za 20%, energetska učinkovitost povećana 20% te udio OIE također 20% u odnosu na referentnu 1990. godinu[3]. To se planira postići putem pametnog i održivog razvoja prema čemu trebaju ići napori svih država članica. Naknadno su doneseni dodatni planovi kako bi se energetski razovj trebao kretati do 2030. godine te do 2050. godine do kada bi EU trebala postati klimatski neutralna[4].

Veliku ulogu u ispunjavanju ovih ciljeva imati će prelazak na dobivanje energije iz obnovljivih izvora. Tim procesom padati će i cijena energije jer unatoč tome što su početna ulaganja veća, eksploatacija je jeftinija što će na liberaliziranom tržištu dovesti do pada cijena. Bitnu ulogu odigrati će i centralizirani toplinski sustavi, pogotovo što je u CTS-ove novijih generacija vrlo lako implementirati OIE kojima se dobiva niskotemperaturna toplina.

CTS-ovi u kombinaciji s dizalicama topline imati će veliku ulogu u budućim energetskim sustavima. U trenucima kada je velika proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora cijena će biti vrlo niska što će potencijalno dizalice topline učiniti vrlo isplativima. Ove tehnologije kao i tehnologije skladištenja tako dobivene toplinske energije su u sve većem razvoju. Ovaj rad će prezentirati rad baš takvih sustava te mogućnosti optimizacije dobivanja toplinske energije na opisani način.

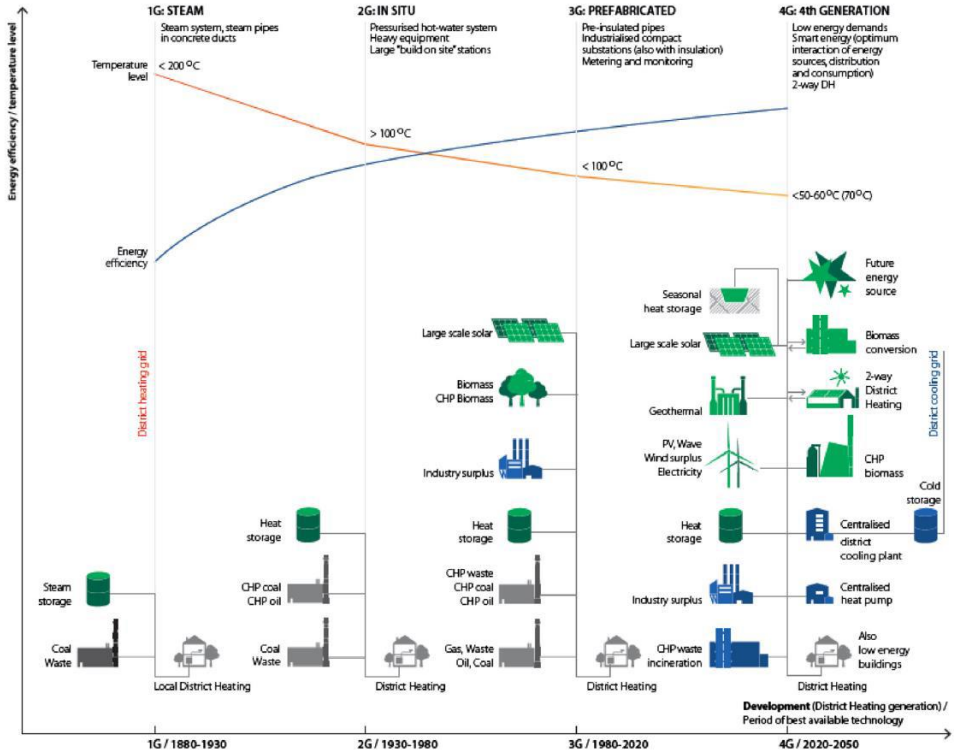
2. CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAVI

Centralizirani toplinski sustavi ili sustavi daljinskog grijanja su sustavi za proizvodnju toplinske energije kod kojih se toplinska energija u obliku vodene pare ili tople vode proizvodi na središnjoj lokaciji te zatim toplovodima distribuira prema potrošačima. Korištenjem CTS-a postižu se niži troškovi kapitala i vođenja sustava. Također postiže se niža razina emisija zagađivača te je moguće preciznije optimirati proizvodnju toplinske energije nego kada se ista vrši decentralizirano. Kao izvor topline u CTS-u se može koristiti širok raspon tehnologija, a u današnje vrijeme posebno je važno što se lako mogu implementirati i obnovljivi izvori energije. Isplativo je i korištenje dizalica topline jer se pomoću njih mogu iskoristiti postojeće niskotemperaturne izvore. To će biti ključno kod energetskih sustava budućnosti koji će imati visoke udjele varijabilnih izvora energije poput vjetra ili Sunca.

Toplina za zagrijavanje vode u CTS-u može se dobiti iz vrlo velikog broja izvora. Primarni način dobivanja topline je spaljivanje goriva odnosno biomase, fosilnih goriva ili otpada. Često se dobiva i u kogeneracijskim termoenergetskim postrojenjima u kojima se istovremeno proizvodi električna i toplinska energija. Posljednjih godina sve se više koriste i OIE poput solarne i geotermalne energije ili električna energija za pogon dizalica topline.

2.1. Razvoj i povijest CTS-a

Prve primarne preteče modernih CTS-a razvijene su još u Rimskom Carstvu koji su vruću vodu koristili u svojim termama. Prvim *pravim* CTS-om smatra se distribucijski sustav u francuskom gradiću Chaudes-Aigues iz 14. stoljeća gdje je geotermalna energija korištena za dobavu topline za tridesetak kuaćnstva. Prvi komercijalno uspješan CTS je izveden u Lockportu u SAD-u 1877. godine.



Slika 1. Grafički prikaz generacija CTS-a[5]

2.1.1. Prva generacija CTS-a

Prvi sustavi pojavili su se u SAD-u 80ih godina 19. stoljeća. Toplina se dobivala spaljivanjem ugljena te distribuirala u obliku vodene pare relativno visokih temeperatura. Zbog toga te neizoliranih cijevi parovoda toplinski gubici su bili vrlo veliki odnosno efikasnost sustava niska. Zbog mnogih nedostataka većina mreža koje su koristile ovaj sustav je danas zamijenjena nekim od sustava novijih generacija, ali su u nekim gradovima poput Pariza i New Yorka još uvijek prisutni.

2.1.2. Druga generacija CTS-a

Ova generacija pojavila se 30-ih godina 20. stoljeća i bila je aktualna četrdesetak godina. Još uvijek se kao izvor topline najviše koriste fosilna goriva, uz ugljen prisutno je i spaljivanje mazuta. Napredak je postignut u sustavu prijenosa topline. Zahvaljujući napretku u proizvodnji cijevi omogućeno je korištenje vrele vode pod tlakom odnosno u kapljevitom stanju na temperaturama polaza većim od 100°C. Korištenje vode u kapljevitom stanju te postojanje povratnog voda smanjilo je toplinske gubitke sustava. Ovakvi sustavi također su doveli do smanjenja potrošnje primarne energije jer su funkcionirali na principu kogeneracije. Karakteristični su za istočnoeuropske države, pogotovo bivše sovjetske republike.

2.1.3. Treća generacija CTS-a

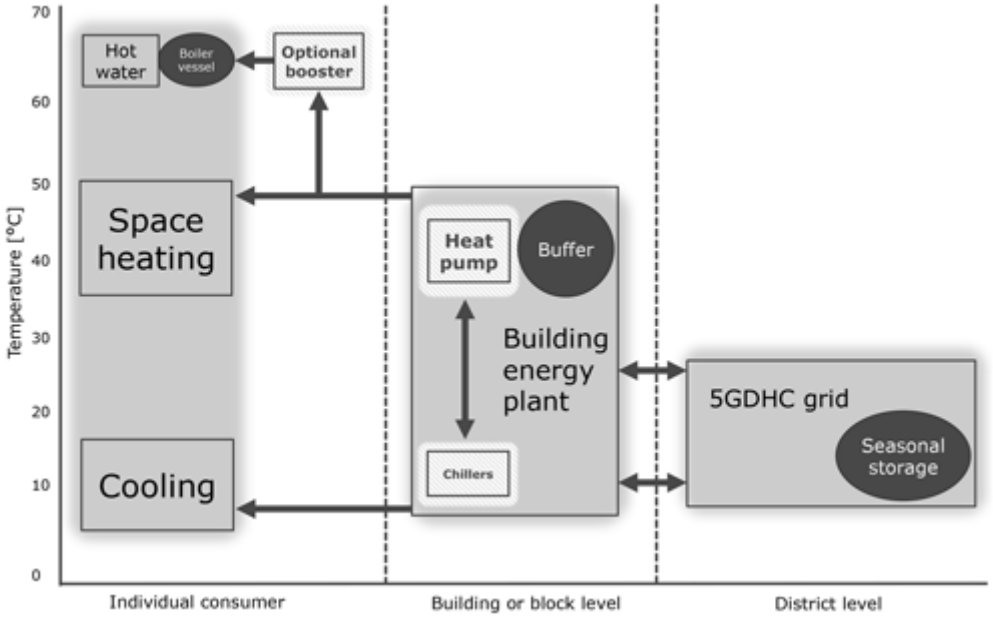
Razvijena tijekom 70ih godina 20. stoljeća kao odgovor na naftnu krizu 1973. godine i korištena u svim sustavima proizvedenim nakon tog razdoblja. Za prijenos topline koriste se cijevi provedene kroz tlo, a kao glavna mjera štednje uvedena je temperatura polaza ispod 100°C. S obzirom na to da je poticaj za razvoj bila enstašica nafte, njeni derivati nisu korišteni kao izvor topline već su to ugljen, biomasa i otpad. Sve više su korišteni i OIE, pogotovo geotermalna i solarna energija.

2.1.4. Četvrta generacija CTS-a

Još je u procesu razvoja te se očekuje veća implementacija u nadolazećem razdoblju. Razvija se kao odgovor na klimatske promjene što znači da uključuje visoki udio OIE te dodatno smanjenje temperature polaza ispod 70°C. U proizvodnju topline također se uključuju i „power to heat“ tehnologije poput dizalica topline. Ovi sustavi bi također trebali omogućiti veću fleksibilnost tržišta električne energije. Važan preduvjet za korištenje četvrte generacije je i visoka toplinska učinkovitost zgrada jer je zbog relativno niske temperature polaza moguće zadovoljenje samo niskih toplinskih potreba.[5]

2.1.5. Peta generacija CTS-a

Poznata i pod nazivom *CTS neutralne temperature*, ova tehnologija toplinu distribuira pri gotovo sobnoj temperaturi čime su toplinski gubici svedeni na minimum. Svaki korisnik povezan na ovu mrežu ima vlastitu dizalicu topline koja ovisno o toplinskim potrebama može grijati ili hladiti prostor. Također za petu generaciju ključna je upotreba toplinskih spremnika kako bi se mogao preskočiti periode preskupe električne energije za isplativo korištenje tih dizalica topline.[6]



Slika 2. Shema CTS-a pete generacije[6]

2.2.Izvori topline

U centraliziranim toplinskim sustavima moguće je koristiti širok raspon izvora topline. U starijim sustavima najčešće se koriste fosilna goriva dok se u novije vrijeme sve više koriste obnovljivi izvori energije. Također je moguće implementirati i kogeneracijske sustave kako bi se dodatno povećala iskoristivost proizvodnje energije.

2.2.1. Fosilna goriva

Kod sustava koji koriste fosilna goriva toplina se u toplanama najčešće dobiva izgaranjem prirodnog plina, ugljena ili naftnog derivata mazuta. Na ovaj način se dobiva visoko-temperaturna toplina što nije dobro s gledišta eksergetske iskoristivosti, ali je energetska iskoristivost vrlo visoka. Kao nuspojava izgaranja fosilnih goriva također dolazi visoka razina stakleničkih plinova što je u današnje vrijeme vrlo nepoželjno. Iz ovih razloga se u razvijenim državama teži prelasku na OIE kao izvor topline.

Središnji element ovakvih sustava je bojler za toplinu u kojem se zagrijava voda ili para koja se zatim distribuira prema potrošačima. S obzirom da sustav mora biti projektiran tako da zadovolji vršnu potrošnju zimi, u ostalim razdobljima velik dio proizvedene topline se baca. Zbog toga ih se često pretvara u kogeneracijska postrojenja koja uz toplinu proizvode i električnu energiju te se tim potezom povećava iskoristivost postrojenja. Ovakav potez povećava energetsku iskoristivost postrojenja, ali i dalje ne eliminira emisiju stakleničkih plinova.

2.2.2. Geotermalna energija

Geotermalna energija je sadržana u zagrijanom fluidu u unutrašnjosti Zemlje. Fluid ovisno o tlaku i temperaturi može biti kapljevita voda, zasićena mokra para ili pregrijana para. Smatra se čistim i obnovljivim izvorom topline, ali upotreba je moguća samo na lokacijama s visokim geotermalnim potencijalom. a potrebe grijanja isplativo je korištenje niskotemperaturnih nalazišta odnosno onih s temperaturom nalazišta ispod 100°C.

Da bi se iskoristio geotermalni potencijal buše se rupe u zemlji kroz koje se postavljaju cijevi te preko sustava pumpi zagrijani fluid dovodi na površinu. Može se koristiti izravno odnosno bez pretvorbe u druge oblike energije, izravno u sustav ili može predavati toplinu preko izmjenjivača nekom drugom radnom fluidu koji se zatim distribuira kroz sustav.

Korištenjem geotermalne energije kao izvora topline postiže se visoka efikasnost te vrlo niska emisija štetnih plinova u atmosferu. Također sustav nema peći i dimnjaka te je održavanje jeftino i rijetko potrebno zbog visokog vijeka trajanja komponenti. Glavni nedostatak je što je mali broj područja koja su isplativa za korištenje geotermalnih sustava te koja bi mogla opravdati visoka inicijalna ulaganja potrebna za implementaciju ovog sustava.

2.2.3. Dizalice topline

Sve se češće u CTS-ima koriste dizalice topline za dobivanje potrebne topline ili kao sredstvo povećanja iskoristivosti sustava. Dizalice topline mogu se koristiti na raznim lokacijama, ali glavni princip je uvijek isti. Niskotemperaturna toplina se izvlači iz okoliša te zatim lijevokretnim kružnim procesom podiže na višu temperaturu koja se zatim koristi za grijanje. Kao toplinski izvor za dizalicu topline može se koristiti voda (more, jezera, rijeke), tlo ili okolišni zrak.

Ovakvi sustavi su psoebno isplativi u zemljama s visokim udjelom OIE u proizvodnji električne energije. Tada se sve češće događa da je proizvodnja puno veća od potražnje u danom trenutku, a skladištenje je još uvijek uglavnom preskupo. Tu nastupaju dizalice topline koje taj višak električne energije znatno jeftinije i efikasnije iskorištavaju taj višak za proizvodnju topline. Time se dobiva efikasnija i isplativija cjelokupna energetska mreža, a nema negativnih utjecaja na okoliš.

2.3. Distribucijski sustav

Nakon što je toplina proizvedena, distribuira se do potrošača sustavom cjevovoda. Cjevovod, kroz koji najčešće struji voda ili para, sastoji se od odlaznog i dolaznog voda. Najčešće se postavlaju pod zemlju kako ne bi bespotrebno zauzimale prostor. Kod suvremenih sustava sve se više koriste niže temperature polaza vode jer to donosi veću efikasnost, a i niskotemperaturno grijanje je higijenski prihvatljivije. Prednost pare kao medija je mogućnost iskorištenja u industrijskim procesima, ali dolazi do mnogo većih toplinskih gubitaka zbog vrlo visoke temperature medija odnosno temperaturne razlike pare i okoliša.

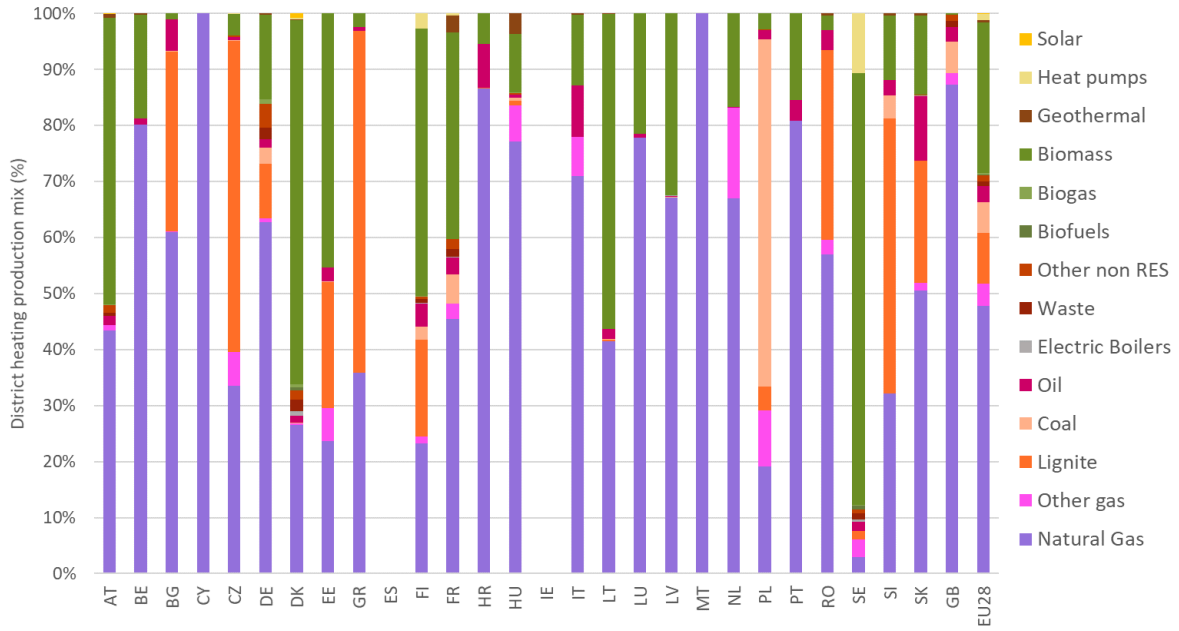
Završni dio distribucijske mreže je sami dolazak do potrošača. Toplinska mreža potrošača je preko izmjenjivača topline spojena s CTS-om te se tamo predaje toplina ogrjevnom mediju u samom sustavu potrošača. Mediji iz ova dva sustava se najčešće ne miješaju već su to dva zatvorena kruga koja samo izmjenjuju toplinu.

2.4. CTS u Europskoj Uniji

Sektor zgradarstva u EU pridonosi čak 40% ukupne potrošnje energije te 36% emisija CO_2. Već iz tih podataka je vidljivo da u ovom sektoru postoji ogroman potencijal za uštedu energije te smanjenje zagađenja. Od ukupne potražnje toplinske energije tek 9% se proizvodi u CTS-ima. Glavni izvori topline su još uvijek fosilna goriva, najviše plin i ugljen, a veliki udio ima i biomasa. Zbog toga je još 2004. donesena direktiva[7] kojom se želi potaknuti integracije visokoefikasnih kogeneracisjkih postrojenja. 2016. godine donesena je strategija koja naglašava prednosti CTS-a i kogeneracijskih postrojenja i potiče dekarbonizaciju i povećanje efikasnosti

toplinskih sustava. Pogotovo se želi potaknuti proizvodnja toplinske energije i OIE te korištenje otpadne topline i dizalica topline.[8]

Na razini EU postoji velika diskrepancija u udjelu potražnje za toplinskom energijom koji je pokriven CTS-om. Najveći udio je postignut u skandinavskim te baltičkim zemljama pa se tako u Danskoj preko 50% ukupne potražnje toplinske pokriva iz CTS-a, a i Švedska, Finska i Litva su preko 40%. Najveću ukupnu proizvodnju u CTS-ima ima Njemačka s 63 TWh_{th} godišnje, ali za njih to iznosi tek oko 9% ukupne potražnje zbog visokog broja stanovnika te visoke gospodarske i industrijske aktivnosti. Također je vrlo heterogena i raspodjela tehnologija koje se koriste za dobivanje toplinske energije u CTS-ima. Na razini cijele EU daleko najzastupljeniji je prirodni plin s gotovo 50% dok je visok udio i biomase te svih vrsta ugljena. Najveći udio biomase koriste skandinavske i baltičke države, a Poljska ima vrlo visok udio ugljena od čak 62%.

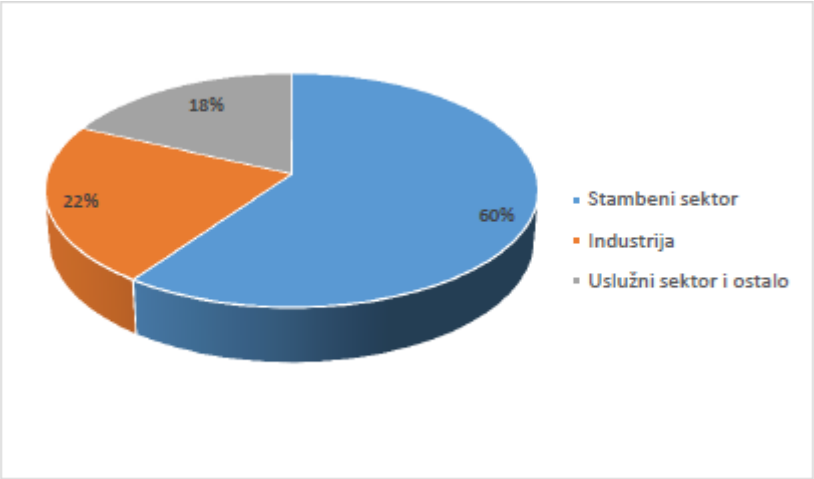


Slika 3. Prikaz udjela različitih goriva u CTS-u

2.5. CTS u Republici Hrvatskoj

U sektoru toplinarstva na području Hrvatske instalirano je 110 sustava koji godišnje isporučuju 9.678 TJ toplinske energije. Ukupna snaga instalacije iznosi 1.800 MW. Ovi sustavi pokrivaju oko 155.000 krajnjih kupaca što čini oko 10% ukupne potražnje za toplinskom energijom.

Većina toplinske energije proizvedene u CTS-ima isporučuje se domaćinstvima, a manjim dijelom i industriji te uslužnom sektoru, ako što se može vidjeti iz grafa na slici niže. Na sustave CTS-a priključeno je oko 11% svih domaćinstava u RH. Za dobivanje toplinske energije kao gorivo se koristi gotovo isključivo prirodni plin s udjelom od oko 85% dok ostatak čine ekstra lako lož ulje i lož ulje.



Slika 4. Udjeli potrošnje energije iz CTS-a

U Republici Hrvatskoj CTS-ovi su instalirani u 18 gradova i općina. To su abecednim redom Ivanić Grad, Karlovac, Ogulin, Osijek, Pokupsko, Požega, Rijeka, Sisak, Slavonski Brod, Split, Topusko, Varaždin, Velika Gorica, Vinkovci, Virovitica, Vukovar, Zagreb i Zaprešić. U idućoj tablici dan je pregled osnovnih parametara tih 18 sustava. Na područjima gradova Osijeka, Siska i Zagreba toplina se djelomično dobiva u kogeneracijskim postrojenjima, a u istim gradovima se vrši i proizvodnja i isporuka tehnološke pare za potrebe industrije.

Tvrtka	Grad	Broj potrošača	Grijana površina kućanstava	Grijana površina ostalih potrošača	Isporučena toplinska energija	Duljina distribuc. mreže	Gorivo **
		-	m^2	m^2	MWh	km	-
HEP Toplinarstvo d.o.o.*	Sisak	4.133	230.024	n/p	61.507	10	PP
	Osijek	11.692	602.063	n/p	180.702	56	PP, LU, LUEL
	Zagreb***	108.347	5.623.363	-	1.869.200	285	PP, LU, LUEL
Brod plin d.o.o.	Slavonski Brod	3.769	176.353	22.719	38.774	6	PP, LU
Plin VTC d.o.o.	Virovitica	483	23.517	6.613	3.430	1	PP
Hvidra d.o.o.	Split	908	62.864	1.711	2.204	1	LU, LUEL
Energo d.o.o.	Rijeka	10.010	537.776	42.908	73.639	16	PP, LU, LUEL
Grijanje Varaždin d.o.o.	Varaždin	1.860	99.791	4.102	16.180	2	PP
Tekija d.o.o.	Požega	417	19.839	-	2.378	1	PP
GTG Vinkovci d.o.o.	Vinkovci	1.698	86.352	2.845	8.919	2	PP, LU, LUEL
Tehnostan d.o.o.	Vukovar	3.712	186.271	19.236	19.128	7	PP, LUEL
Toplana d.o.o.	Karlovac	8.094	407.447	102.078	66.281	21	PP, LU, LUEL
Termalna voda d.o.o.	Topusko	191	8.980	14.837	-	2	GEO
Ivakop d.o.o.	Ivanić Grad	3	-	6.451	772	1	PP
SKG d.o.o.	Ogulin	192	7.503	4.187	8.545	1	LU, LUEL
UKUPNO		**155.509**	**8.072.143**	**227.687**	**2.351.659**	**412**	

** Uključuje i isporuku tehnološke pare*

*** PP-prirodni plin, LU-loživo ulje, LUEL-ekstralako loživo ulje, GEO-geotermalna*

**** HEP Toplinarstvo Zagreb uključuje Veliku Goricu, Zaprešić i Samobor*

Slika 5. Pregled CTS-ova u Hrvatskoj[9]

Unaprjeđenje CTS-a u Hrvatskoj je određeno kao jedan od prioriteta energetske politike. Prilike za daljni razvoj toplinarstva su mnoge i mogle bi dovesti do povećanja udjela u ukupnoj proizvodnji toplinske energije. Najveća prilika je u uvođenju novih tehnologija , prvenstveno kogeneracije te spaljivanja biomase i/ili otpada. Također na nekim lokacijama postoji i

mogućnost integriranja geotermalnih izvora. Postoji potreba i za modernizacijom cjevovodne mreže koje su neučinkovite i zastarjele te zbog toga i u sustavu distribucije nastaju veliki gubici.[10] Dvije najveće prepreke ovom napretku su financijske te tradicijske prirode. Za modernizaciju sustava bila bi potrebna veća financijska ulaganja dok na mnogim lokacijama postoji otpor prema uvođenju ovih sustava jer se favorizira prirodni plin ili biomasa kao lokalni način zadovoljavanja toplinskih potreba.

2.6. Kogeneracijska postrojenja

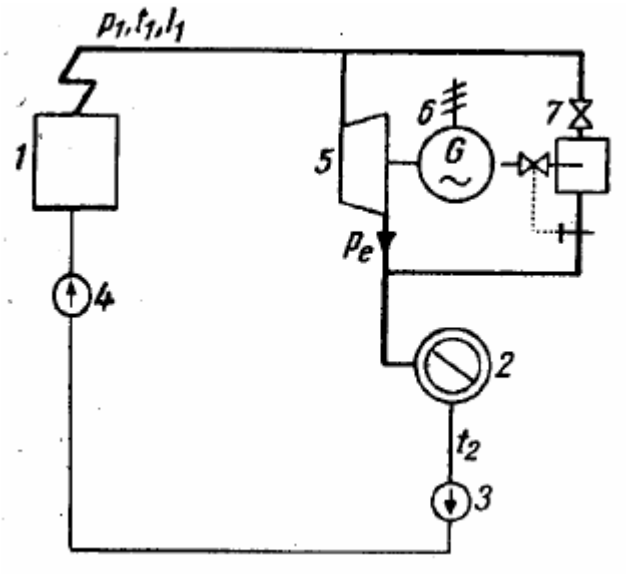
Zbog velikih gubitaka koji nastaju u termoenergetskim postrojenjima primorani smo razmišljati o načinima povećanja iskoristivosti istih. Iskoristivost modernih TEP-ova na fosilna goriva ne prelazi granicu od 40% što znači da više od polovice ukupno dobivene energije nepovratno trošimo. Veliki dio toga se samo baca u okoliš zbog visokih temperatura dimnih plinova na izlazu iz postrojenja, a primjetni su i visoki gubici na kondenzatoru. S obzirom da naravno nije poželjno bacati proizvedenu energiju primjenjuju su kogeneracijska postrojenja. U ovakvom tipu postrojenja se uz toplinsku energiju dobiva i mehanički rad. Taj mehanički rad se uglavnom koristi za dobivanje električne energije dok se toplinska energija koristi na uobičajene načine, za grijanje ili za tehnološke procese. Korištenjem ovakvih postrojenja iskoristivost raste i do 75-80% što je značajan porast u odnosu na pojedinačno dobivanje svakog od ova dva tipa energije.

Goriva koja se pretežno koriste u kogeneracijskim postrojenjima još uvijek su većinom fosilna goriva, ali udio OIE se vrlo brzo povećava te je u zadnjih deset godina udvostručen na 20% na razini EU. Kao pozitivna posljedica visoke iskoristivosti kogeneracijskih postrojenja ističe se smanjenje emisije stakleničkih plinova.

Pri izgaranju goriva u ložištu za proizvodnju električne energije nastaju vrlo visoke temperature od 1500-1600°C. Kada se ti plinovi odmah koriste za zagrijavanje pare ili tople vode na temperature potrebne za grijanje (70-200°C) gubici nepovrativosti su visoki zbog velike temperaturne razlike. Zbog toga se dimni plinovi prvo koriste za dobivanje pare visokih parametara za proizvodnju električne energije na generatoru. Nakon toga se kad ekspanzijom u turbini para dođe do nižih parametara vrši odvajanje pare koja se koristi u tehnološkim procesima ili za grijanje. Ovakav proces može se vršiti u nekoliko različitih tipova postrojenja

2.6.1. Postrojenje s protutlačnom turbinom

Ovakav tip postrojenja je najjednostavniji i najčešće se koristi u današnjim kogeneracijskim postrojenjima. Vrlo jednostavno, sastoji se od proizvodnje pare u generatorima pare , ekspanzije do određenog tlaka te razvođenja pare u sustav grijanja. Para proizvedena u generatoru pare dovodi se u protutlačnu turbinu u kojoj ekspandira do tlaka s temperaturom zasićenja koja odgovara temperaturi u sustavu grijanja. Zagrijavanje pare ili vode najčešće se vrši u grijalici. Ovakvi sustavi uglavnom su manjih snaga te su samim time jednostavnije i jeftinije izvedbe.

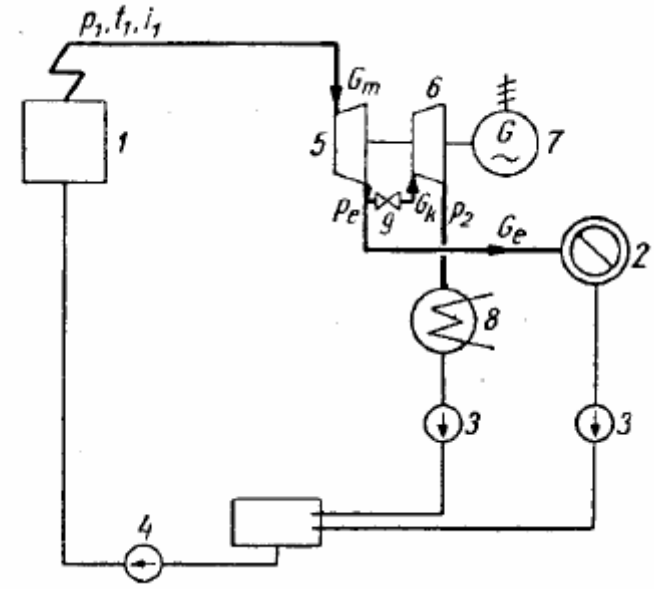


Slika 6. Shema kogeneracijskog postrojenja s protutlačnom turbinom[11]

Naravno, nemoguće je očekivati da se potreba za toplinskom i električnom energijom uvijek poklapaju pa je postrojenje opremljeno i rješenjima za takve situacije. Ukoliko je potreba za toplinskom energijom veća dio pare se pušta kroz obilazni vod s reducir ventilom. Tamo se samo prigušuje tlak na željenu vrijednost i onda odvodi u grijalicu. U suprotnom slučaju se dio pare koji nije potreban za grijanje jednostavno ispušta u atmosferu.

2.6.2. Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare

Kod ovakvog rješenja kogeneracije turbina mora imati najmanje dva stupnja – visokotlačni i niskotlačni. Postupak je sličan prethodnom, ali je pozitivna stvar što se ekspanzija pare za dobivanje električne energije može izvršiti do nižeg tlaka. Proces se sastoji u tome da dobivena para u VT dijelu turbine ekspandira do tlaka na kojem se izvrši oduzimanje dijela pare potrebnog za grijanje. Ostatak pare odlazi u NT dio turbine gdje ekspandira na nižu vrijednost tlaka te se time dobiva još mehaničkog rada te time i električne energije.

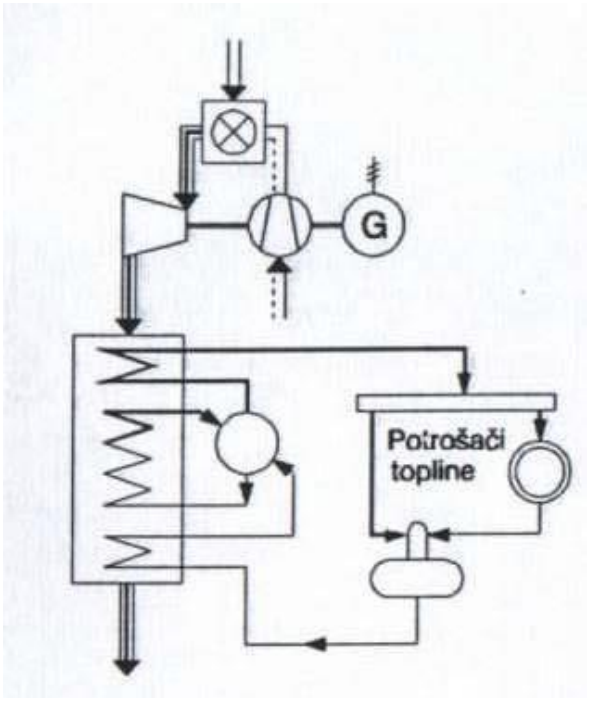


Slika 7. Shema kogeneracijskog postrojenja s reguliranim oduzimanjem pare[11]

Ovakva postrojenja se najčešće koriste u grdskim toplanama, a prikladna su i kada je potreban autonoman izvor električne energije kao što je u rafinerijama ili petrokemijskim procesima koji si ne mogu dopustiti prekide u opskrbi. Naravno zbog poboljšanja regulacije i u ovakvim postrojenjima postoji mogućnost rada u graničnim uvjetima odnosno proizvodnje samo toplinske ili samo električne energije. Kod čistog kondenzacijskog pogona sva para odlazi u NT dio turbine te se isključivo koristi za dobivanje električne energije. Druga krajnost je kada je potražnja za toplinskom energijom toliko velika da se vrši gotovo čisti protutlačni pogon, odnosno sva para se odvaja u grijalicu. U NT dio tada odlazi tek oko 10% nazivnog protoka pare kako bi se osiguralo hlađenje lopatica u tom dijelu turbine.

2.6.3. Postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova

Ova vrsta postrojenja kao način dobivanja električne energije koristi plinsku, a ne parnu turbinu kao prethodna dva primjera. Kao gorivo za zagrijavanje kotla u kojem se dobiva para služi otpadna toplina dimnih plinova. Te temperature iznose i do 600°C pa se može koristiti za proizvodnju pare za tehnološke procese ili grijanje. Također ovdje se dodatno može koristiti i kombinirani proces plinske i parne turbine čime se dodatno povećava iskoristivost cjelokupnog postrojenja. To znači da se otpadna toplina koristi za za zagrijavanje pare do visokih parametara te se onda ekspanzijom u turbini prvo dobiva još električne energije, a zatim se ostatak pare nižih parametara na neki od prethodnih načina koristi za grijanje ili tehnološke procese.



Slika 8. Shema kogeneracijskog postrojenja s korištenjem otpadne topline DP[11]

2.6.4. Trigeneracija

Trigeneracija je dodatni način unaprijeđenja postrojenja. U ovakvim postrojenjima se uz električnu energiju i toplinsku energiju za grijanje proizvodi i toplinska energija za hlađenje prostora. Dodavanjem apsorpcijskih uređaja toplinska energija koristi se za hlađenje te se time dodatno povećava iskoristivost postrojenja. Također uvođenjem trigeneracije može se značajno smanjiti opterećenje elektroenergetskog sustava tijekom ljetnih mjeseci kada je potrebna velika količina energije za hlađenje prostora. Trigeneracija se osim za hlađenje također može koristiti

i kod proizvodnih industrijskih procesa u kojima su zahtjevane niske temperature. Osim povećavanja iskoristivosti zbog korištenja otpadne topline iz kogeneracije prisutna je i ekološka komponenta jer kod trigeneracije nema ispuštanja vrlo štetnih freona u atmosferu.

2.6.5. Kogeneracija u Hrvatskoj

Na području RH trenutno rade četiri termoenergetska postrojenja na principu kogeneracije. To su TE-TO Zagreb na Žitnjaku, EL-TO Zagreb na Trešnjevci, TE-TO Osijek i TE-TO Sisak. Sva četiri postrojenja u standardnom radu koriste prirodni plin kao gorivo te uz električnu energiju proizvode i ogrjevnu toplinu i tehnološku paru a potrebe industrije. Na lokacijama Osijek i Sisak 2017. godine je u pogon pušten po jedan novi BE-TO blok odnosno bioelektrana toplana koji kao gorivo koristi biomasu.

Osim ovih velikih pogona sve više raste i broj manjih kogeneracijskih postrojenja u privatnom vlasništvu. Te bioenergane kao gorivo korsite drvnu biomasu te su manjih snaga.

3. TRŽIŠTE ENERGIJE

3.1.Tržište električne energije

Tržište električne energije u biti je po principu funkcioniranja slično burzi. Na tržištu čak i unutar jednog dana postoje velike varijacije u cijeni koje su posljedica nemogućnosti skladištenja energije. Na te varijacije najviše utječu OIE, pogotovo vjetroelektrane i solarne elektrane jer njihova proizvodnja izravno ovisi o meteorološkim uvjetima. Također važno je primjetiti da energija iz OIE ima prednost pri ulasku u mrežu jer ju se ne može kontrolirati, a i cilj je što veći udio OIE. Električna energija iz OIE ima i najnižu cijenu proizvodnje, a za solarne i vjetrolektrane ona je gotovo jednaka nuli.

U Hrvatskoj se trgovanje također vrši kroz dražbu, a cijena se za svaki sat određuje dan unaprijed prema pravilu jedinstvene cijene. Za izračun ovih cijena zadužena je Hrvatska burza električne energije (CROPEX). Za svaki sat se formiraju sumarne krivulje ponude i potražnje te sjecište tih krivulja predstavlja tržišnu cijenu za taj sat. Na cijenu izravno utječe niz faktora, na primjer potražnja je po noći niža pa je samim time i cijena električne energije niža. Ako je proizvodnja iz OIE visoka cijena će također padati dok je u slučaju dana s lošijim vremenom cijena viša jer u sustav mora ući puno više energije proizvedene iz skupljih izvora kao što su termoelektrane.

Trenutno u Hrvatskoj postoji samo jedno tržište električne energije. Odabran je model bilateralnog tržišta na kojem se trgovanje provodi na temelju ugovora među sudionicima. Od 1. srpnja 2008. godine tržište je potpuno otvoreno. Postoje dvije vrste kupaca, tarifni i povlašteni, a razlika je u tome da povlašteni kupci mogu samostalno birati opskrbljivača. Većina proizvodnje odlazi na HEP Proizvodnju dok su još prisutni i TE Plomin te INA. Također RH ima 50%-tni udio u NE Krško u Sloveniji što omogućava 338 MW energije te je visokonaponskim vodom povezana s Mađarskom.

3.2.Tržište toplinske energije

Sektor toplinarstva u Hrvatskoj pruža usluge grijanja i pripreme potrošne tople vode. Većinu potrošača, čak oko 95% predstavljaju kućanstva. Tvrtke koje obavljaju poslove u sektoru toplinarstva u državnom su vlasništvu ili u vlasništvu jedinica lokalne samouprave. Kao što je ranije navedeno, samo tri hrvatska grada (Zagreb, Osijek i Sisak) imaju kogeneracijska postrojenja za dobivanje toplinske energije. U većini gradova toplinarska postrojenja su vrlo zastarjela, prosječne starosti preko 20 godina. To naravno zbog dotrajalosti opreme donosi velike gubitke odnosno smanjenu iskoristivost postrojenja. Također većina postrojenja radi na fosilna goriva što donosi velika zagađenja, ali i veliki trošak goriva koji se u većini slučajeva ne može pokriti maloprodajnom cijenom energije. Zbog toga većina ovih toplinarskih tvrtki konstantno posluje s velikim financijskim gubicima.

4. MODEL OPTIMIZACIJE

Na Katedri za energetska psotrojenja i energetiku Fakulteta strojarstva i brodogoradnje razvijen je računalni model s ciljem optimizacije rada CTS-a. U sklopu ovog završnog rada izvršena su dodatna poboljšanja kako bi model što bolje simulirao i optimizirao rad sustava s kombinirajući različite konfiguracije sustava uzevši u obzir različite tehnologije proizvodnje te skladištenja toplinske energije.

Kod simuliranja modela uzete su u obzir četiri različite tehnologije proizvodnje toplinske energije:

- Kogeneracijsko postrojenje na biomasu (engl. *Cogeneration heat plant*)
- Bojler za proizvodnju topline (engl. *Heat-only boiler*)
- Dizalica topline zrak-voda (engl. *Heat pump*)
- Solari (engl. *Solar thermal*)

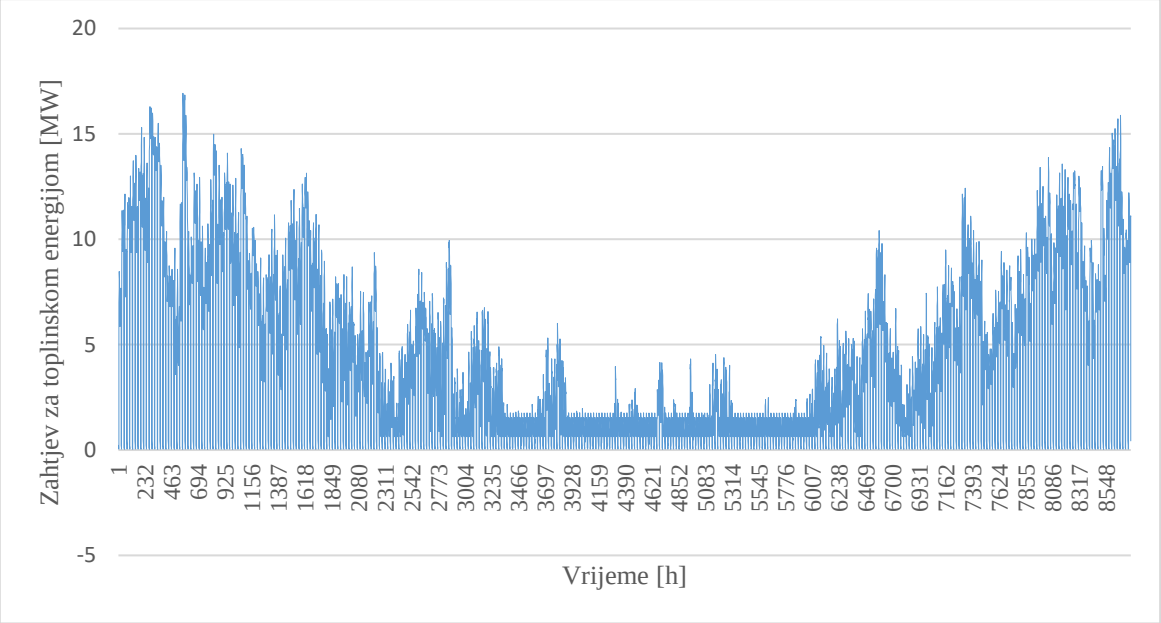
Dodatno je korišten i spremnik toplinske energije kako bi se mogla uskladištiti energija proizvedena dok je to jeftinije te onda ispuštala iz spremnika kada je proizvodnja na bilo kojoj od tehnologija ekonomski neisplativa.

Program je izrađen u programskom jeziku Julia. Julia je besplatan open-source jezik pod licencom MIT-a. Sintaksa je slična MATLAB-u te Pythonu što omogućuje jednostavno kombiniranje s ta dva jezika u slučaju potrebe. Za samu optimizaciju korišten je JuMP, jezik za matematičko optimiziranje ugrađen u Juliu.

Program vrši optimizaciju tako da za svaki sat provjerava koliki su troškovi proizvodnje iz pojedinih tehnologija te odabire onu kombinaciju koja daje najmanji trošak. Prvi i glavni uvjet je da zahtjev za toplinskom energijom uvijek mora biti zadovoljen odnosno ne smije se dogoditi da korisnici ostanu bez toplinske energije. Ukoliko je svim tehnologijama proizvodnja skupa toplina se preuzima iz toplinskog spremnik. Kao uvjet je također postavljeno da se sva toplinska energija proizvedena na solarima mora ubaciti u mrežu. To u biti znači da se kada ima Sunca energija u sustav prvo predaje iz solara, a onda ostatak nadoknađuje iz najjeftinije tehnologije. To naravno ima smisla jer je proizvodnja iz solara vrlo jeftina i čista.

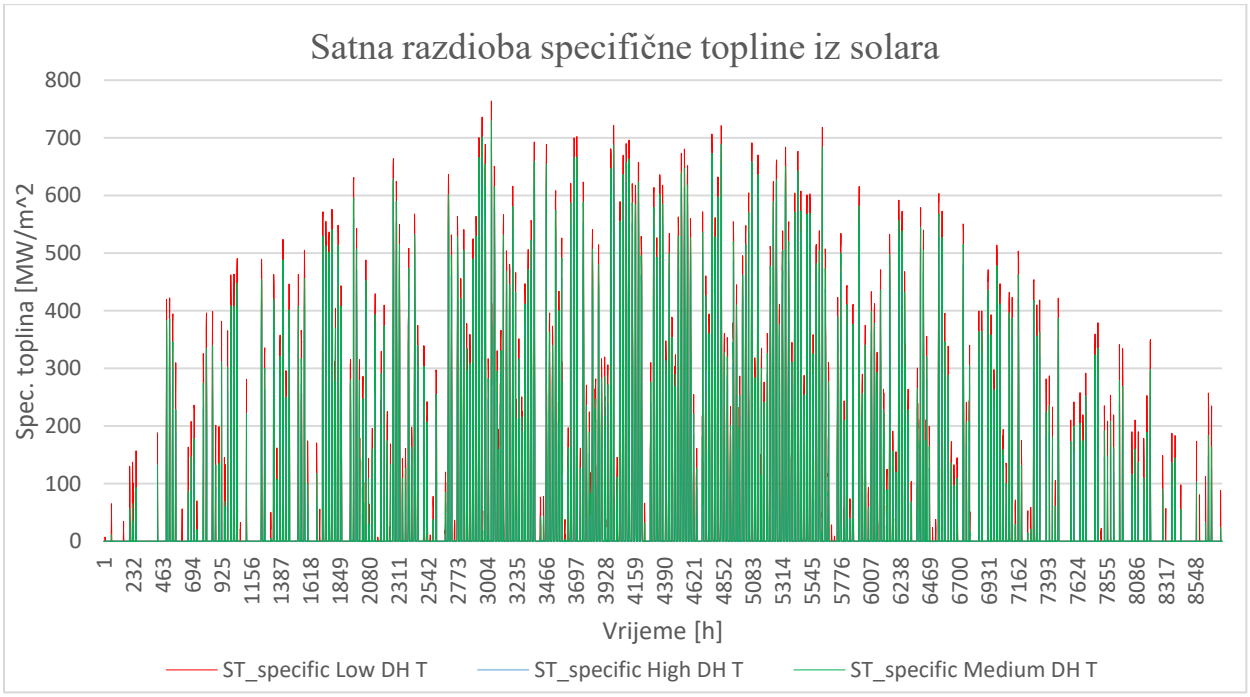
U sam program se učitavaju četiri .csv datoteke koje daju potrebne podatke za optimizaciju na satnoj bazi:

- Zahtjev za toplinskom energijom



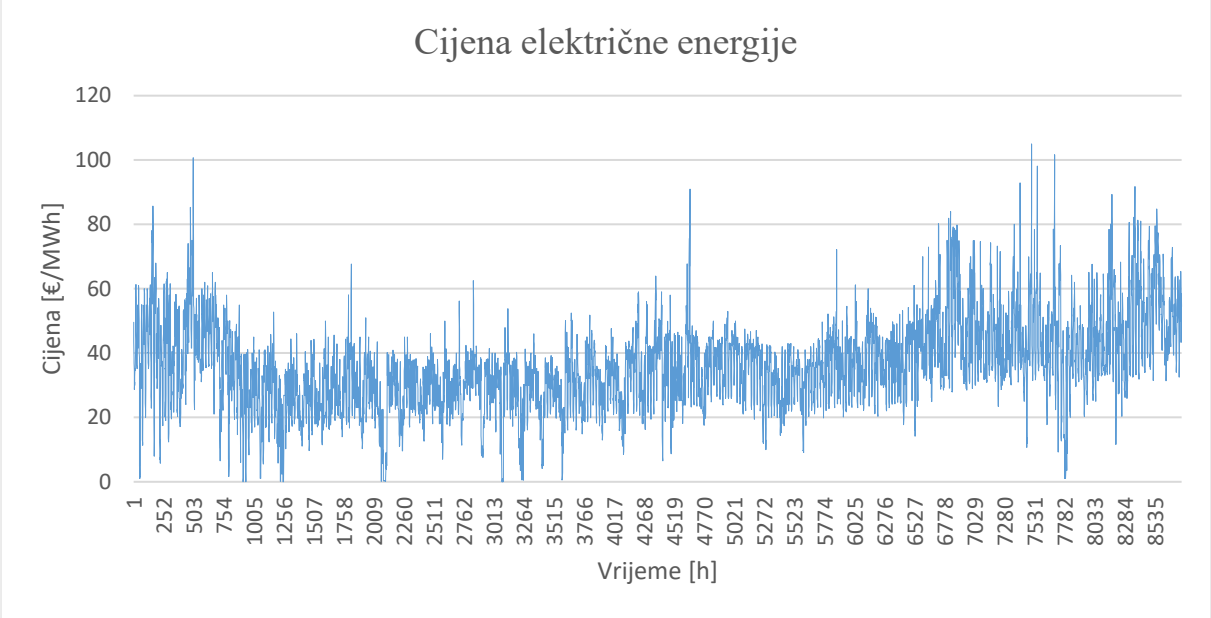
Slika 9. Potreba za toplinskom energijom

- Specifična proizvodnja iz solara



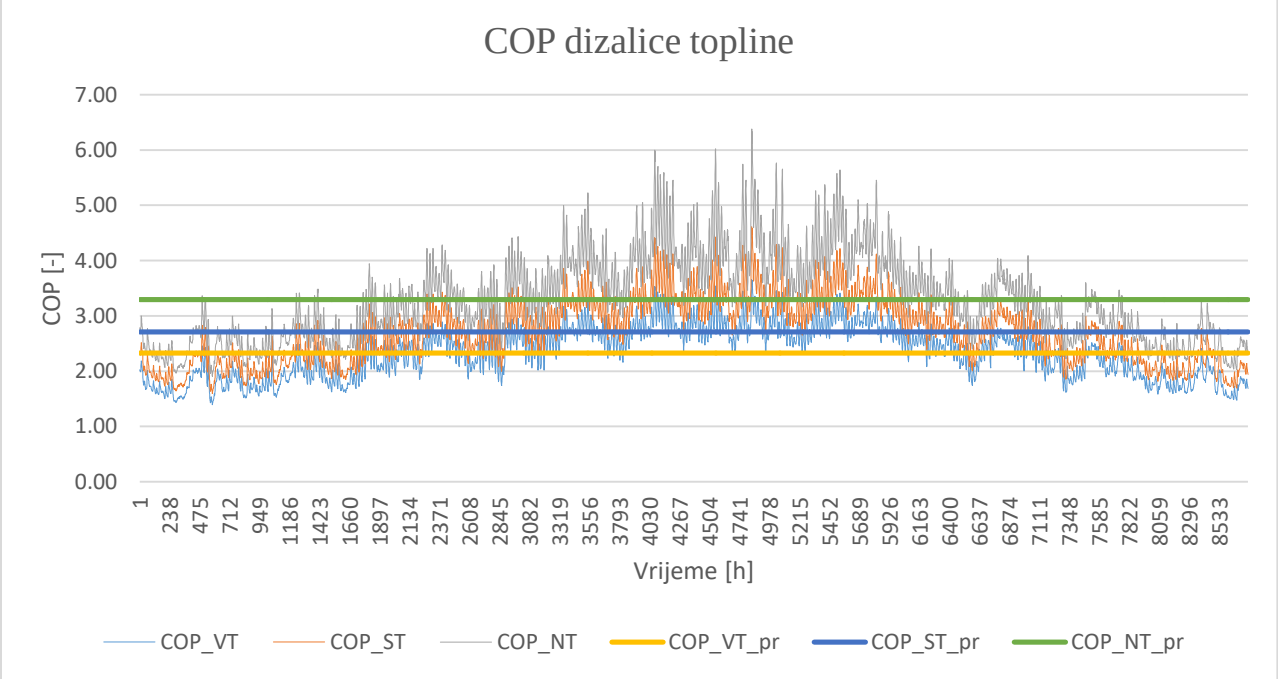
Slika 10. Specifična proizvodnja topline iz solara

- Cijena električne energije



Slika 11. Satna cijena električne energije

- COP dizalice topline



Slika 12. COP dizalice topline

Osim ovih podataka za svaku od tehnologija potrebno je unijeti još neke podatke kako bi energetske i ekonomske podatke kako bi pogram mogao optimizirati proizvodnju:

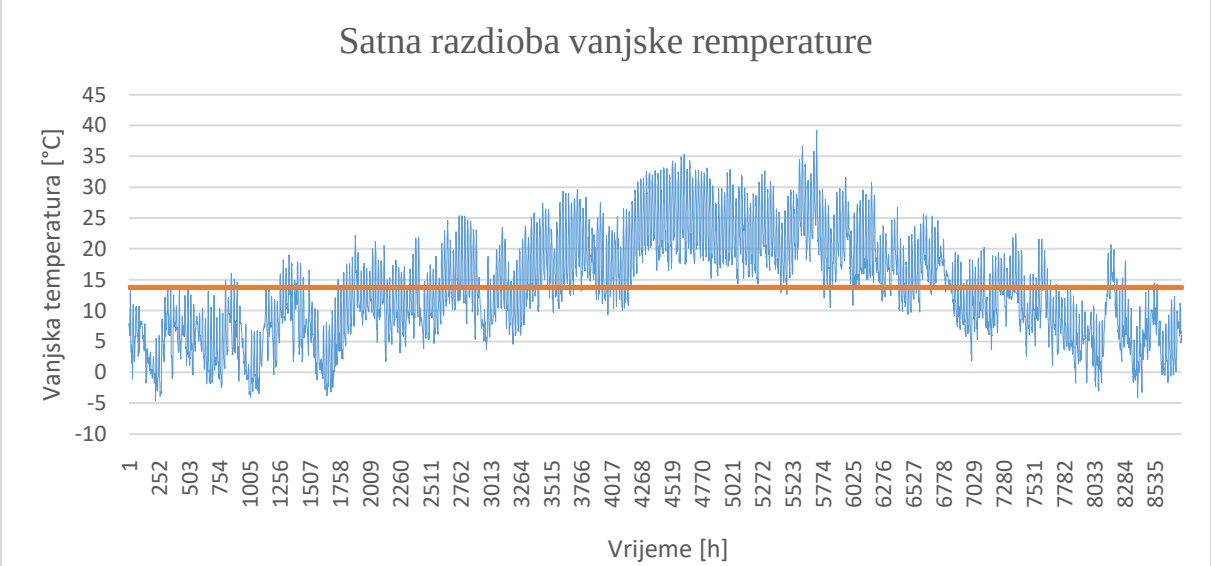
- Maksimalna snaga tehnologije
- Iskoristivost
- Varijabilni troškovi proizvodnje
- Cijena goriva

Kod je napravljen tako da se optimizira da se svaka od tehnologija u određenom scenariju koristi u optimalnom vremenu. Vremenski korak simulacije je postavljen na jedan sat, a trajanje simulacije iznosi cijelu godinu odnosno 8760 sati. Ukoliko se u sustav uključe sve tehnologije na primjer u satima kada je cijena električne energije niska u punom pogonu biti dizalica topline jer je tada njeno gorivo jeftino, a iskoristivost joj je velika pa je najisplativija. S druge strane kada je cijena električne energije visoka, na maksimumu će raditi kogeneracijsko postrojenje jer ono proizvodi i električnu energiju uz toplinsku koju onda predaje u sustav te se time jako smanjuju troškovi proizvodnje. U vremenskim periodima kada niti jedna tehnologija nije dovoljno isplativa toplina će se preuzimati iz spremnika koji se punio tijekom perioda nižih troškova neke od tehnologija. Ako je spremnik u tom trenutku prazan program će odabrati korištenje tehnologije koja tad ima najmanji gubitak.

4.1. Unaprijeđenje modela

Unaprijeđenje postojećeg modela koje je razmatrano u sklopu ovog rada je išlo u smjeru preciznijeg predviđanja COP-a dizalice topline zrak-voda te specifične proizvedene topline nasolaru na satnoj bazi te faktora proizvodnje električne energije kogeneracije kao funkcije temperature polaza mreže.

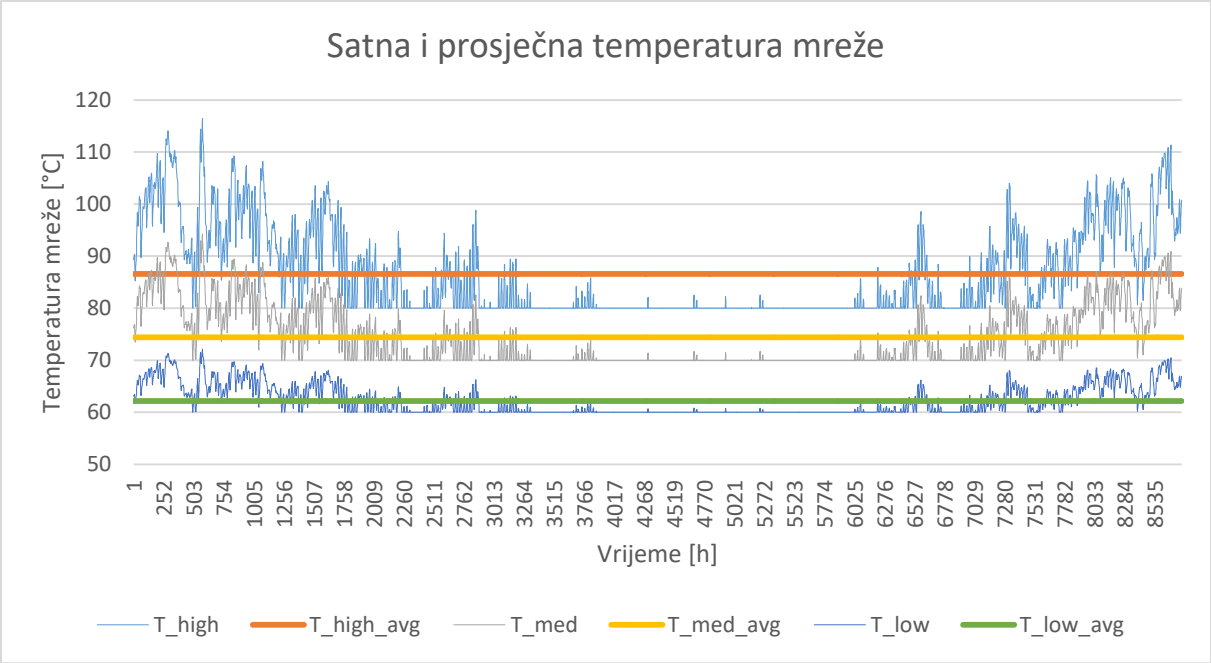
Za referetne klimatske podatke o vanjskoj temperaturi korišteni su podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) za mjernu postaju Zagreb-Grič na satnoj bazi. Time su dobiveni najprecizniji mogući podaci za predviđanje rada dizalice topline na zagrebačkom području.



Slika 13. Vanjska temperatura

Ulazni podaci za temperaturu mreže za početni izračun odabrani su za tri različita sustava grijanja kako bi se podaci mogli uspoređivati i dokazati kako promjena temperatura mreže utječe na iskoristivost dizalice topline:

- Visokotemperaturni sustav
- Srednjetemperaturni sustav
- Niskotemperaturni sustav



Slika 14. Temperature mreže

Za visokotemperaturni sustav odabrana je minimalna temperatura polaza od 80°C odnosno nešto i veća u slučaju potrebe u hladnijim mjesecima. Taj princip odabran je za sva tri sustava kako bi se naravno u hladnijim periodima objekti korisnika mreže mogli brže zagrijati. Temperaturna razlika visokotemperaturnog sustava postavljena je na 30°C. Kod srednjetemperaturnog sustava odabrana je sustav s minimalnom temperaturom polaza od 70°C te razlikom 25°C dok je za niskotemperaturni sustav minimalna polazna temperatura iznosila 60°C, a temperaturna razlika plaza i povrata 20°C.

4.2.Analiza ulaznih podataka

Podaci za sva tri scenarija uspoređivani su međusobno na bazi tri različita parametra, naravno za iste referentne klimatološke podatke.

- COP dizalice topline
- Omjer električne i toplinske snage kogeneracije (Cb)
- Specifična proizvodnja iz solara ($ST_{specific}$)

4.2.1. Ovisnost COP dizalice topline o temperaturi mreže

Na COP utječu dva faktora, temperatura vanjskog izvora topline, u ovom slučaju vanjskog zraka te temperatura toplinskog ponora, odnosno temperatura mreže kojoj se predaje toplina. Prema prvom zakonu termodinamike teoretski mogući COP ovisi o ove dvije temperature te Lorenzovom faktoru:

$$COP_{HP} = f_L \cdot \frac{T_{DH}}{T_{DH} - T_{out}}$$

Lorenzov faktor daje odnos stvarnog COP-a dizalice topline te teoretski maksimalno ostvarivog te u biti pokazuje o kvaliteti rada dizalice topline[12]. U ovom radu korištena je vrijednost:

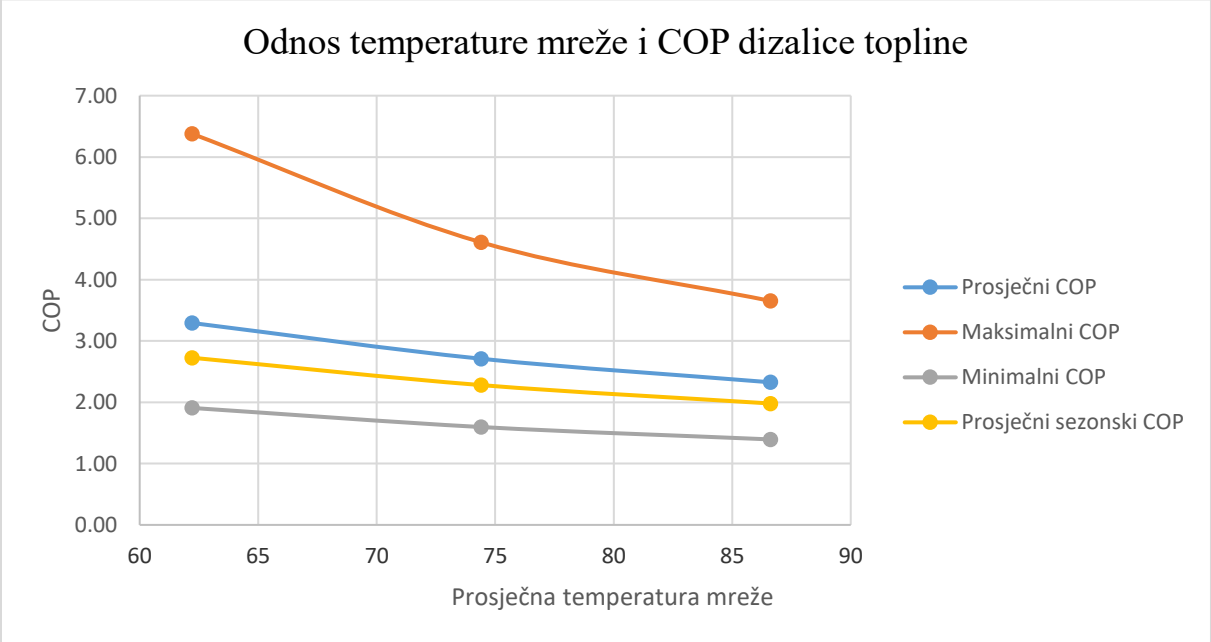
$$f_L = 0.45$$

Iz formule je jasno da će se COP povećavati sa smanjenjem razlike temperatura toplinskog izvora i toplinskog ponora. To je razlog zašto su dizalice topline puno isplativije ukoliko se koriste za niskotemperaturno grijanje u odnosu na srednje ili visokotemperaturno. U ovom segmentu je promatrano kako će se COP za našu dizalicu topline mijenjati s promjenom temperature mreže jer je to faktor na koji možemo utjecati za razliku od vanjske temperature koja je rezultat meteoroloških prilika.

Ovom kratkom simulacijom se i pokazalo da će se smanjenjem temperature polaza mreže povećati COP dizalice topline kao što se moglo i očekivati.

Tablica 1. COP dizalice topline

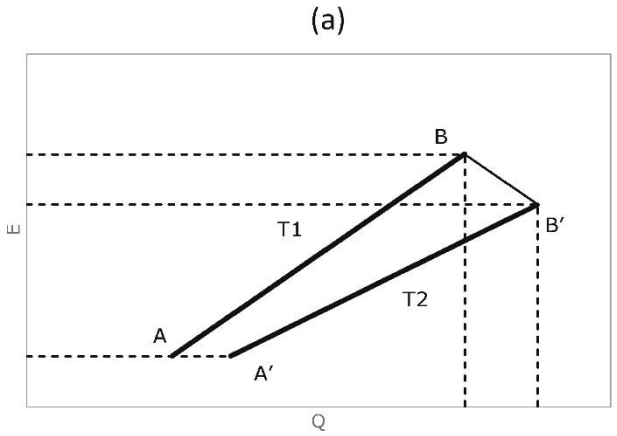
	Prosječni COP	Maksimalni COP	Minimalni COP	Prosječni sezonski COP
Visokotemperaturni sustav	2.33	3.65	1.39	1.98
Srednjetemperaturni sustav	2.71	4.61	1.60	2.28
Niskotemperaturni sustav	3.29	6.38	1.91	2.73



Slika 15. Odnos temperature polaza i COP-a DT

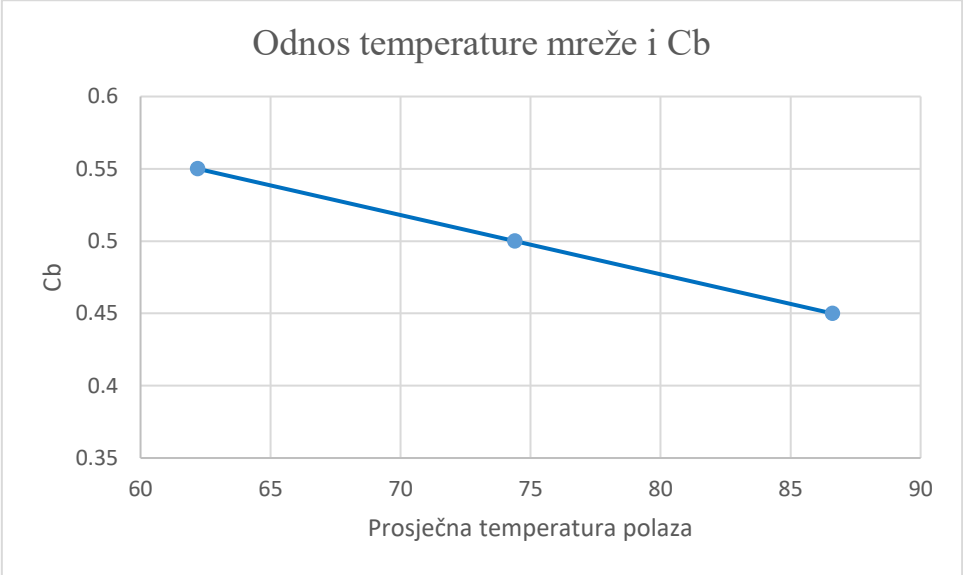
4.2.2. Ovisnost Cb o temperaturi mreže

Omjer električne i toplinske snage iz kogeneracijskog postrojenja također je izravno ovisan o temperaturi mreže. To je tako jer je u slučaju niže temperature mreže potrebno potrošiti manju temperaturnu razliku u dijelu ciklusa za proizvodnju toplinske energije. Zbog toga para odlazi s višom temperaturom i tlakom prema turbini na kojoj se proizvodi električna energija, a konačni tlak i temperatura ostaju isti pa se dobiva veća količina električne energije. S obziorm da je količina proizvedene toplinske energije stalno jednaka, omjer ove dvije vrijednosti raste. Time se dobiva veća zarada kogeneracijskog postrojenja jer može prodati više električne energije u mrežu nego što je to slučaj kod sustava s višom temperaturom mreže.



Slika 16. Ovisnost Cb o T_DH[13]

Na slici 16 Cb predstavlja nagib pravca između točaka A i B. T_1 je niža od temperature T_2 te je pravac koji povezuje točke A i B zbog toga strmiji. Vrlo lako je uočljivo da se za jednaku toplinu Q za temperaturu T_1 dobiva više električne energije E. Samim time omjer električne energije i toplinske energije kogeneracijskog postrojenja je veći te CHP radi s boljom isplativošću.



Slika 17. Odnos temperature polaza i Cb

4.2.3. Ovisnost $ST_{specific}$ o temperaturi mreže

Treća vrijednost na koju je utjecala temperatura mreže, a promatrana je u sklopu ovog rada je specifična toplina proizvedena iz solara koja se računa prema formuli:

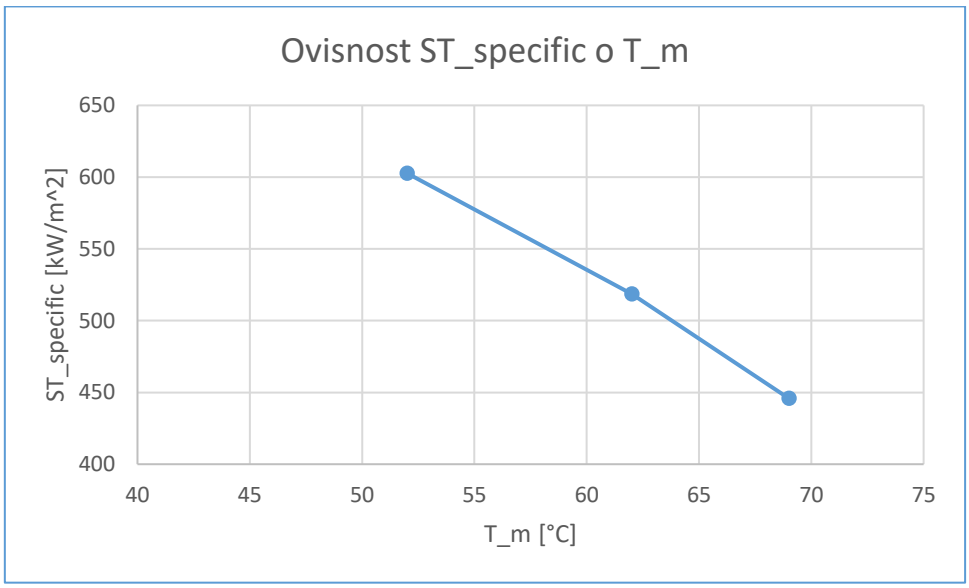
$$ST_{specific} = \left(\eta_0 - \frac{a_1 \cdot (T_m - T_{out})}{G_k} - \frac{a_2 \cdot (T_m - T_{out})^2}{G_k}\right) \cdot G_k$$

$$\eta_0 = 0.75$$

$$a_1 = 4$$

$$a_2 = 0.01$$

Iskoristivost solarnih ploča te toplinski gubici su konstantne vrijednosti kao što je navedeno. Ostala tri podatka učitavana su iz zasebnih datoteka za satne podatke. Iz formule je vidljivo da će niža temperatura mreže rezultirati manjim vrijednostima prvog i drugog razlomka, obzirom da se oni oduzimaju od iskoristivosti, dati će veći iznos specifične topline iz solara. Ova jednadžba naravno može dati i negativne rezultate te u tom slučaju solari ne proizvode toplinu dok se u situacijama kad proizvode kao što je već naglašeno cjelokupna toplina odmah ubacuje u mrežu.



Slika 18. Odnos temperature mreže i $ST_{specific}$

5. OPTIMIZACIJA TRI RAZLIČITA SCENARIJA

U sklopu ovog rada odabrane su tri različite konfiguracije CTS-a korištenjem različitih kombinacija ranije navedenih tehnologija. Cilj je tehno-ekonomskom analizom utvrditi kako je za poznatu potražju za toplinom najbolje kombinirati moguće tehnologije proizvodnje i skladištenja toplinske energije.

- Bojler, kogeneracija i spremnik toplinske energije
- Bojler, kogeneracija, dizalica topline i spremnik
- Bojler, kogeneracija, dizalica topline, solari i spremnik

Kao što je vidljivo u svakom od scenarija korišten je spremnik toplinske energije (TES) kako bi se energija mogla proizvoditi i skladištiti u razodbljima kada je to za neku od tehnologija vrlo jeftino te onda kasnije koristiti kad sve tehnologije imaju visoku cijenu proizvodnje toplinske energije.

5.1.Metoda usporedbe

Metoda kojom su tehnologije uspoređivane je iznivelirana cijena toplinske energije (engl. *Levelised cost of heat, LCOH*). Ta metoda omogućava uspoređivanje različitih tehnologija proizvodnje toplinske energije tako što njihove troškove svodi na jedinicu energije, najčešće megavatsat te se onda mogu uspoređivati različite tehnologije ili kombinacije tehnologija. Naravno tehnologija ili njihova kombinacija je bolja čim je iznos LCOH niži jer to znači da je potrebno manje ulaganje kako bi se proizveo jedan MWh toplinske energije, a računa se prema sljedećoj formuli:

$$LCOH = \frac{suma\ troškova\ kroz\ očekivani\ vijek\ trajanja}{suma\ toplinske\ energije\ proizvedena\ kroz\ očekivani\ vijek\ trajanja}$$

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \qquad [\frac{€}{MWh}]$$

$$M_t = M_{t_{var}} + M_{t_{fix}}$$

Kod korištenja ove metode potrebno je pažljivo odrediti sve parametre za svaku od tehnologija kako ne bi došlo do pogrešnih podataka, a time i pogrešnih zaključaka oko toga koju tehnologiju koristiti i kako ih kombinirati. Također ova tehnologija ne predviđa neke troškove poput poreza ili nepredviđenih troškova održavanja već samo one koji se mogu predvidjeti pa je stoga cijena energije uvijek zapravo nešto veća nego je dobivena ovom teoretskom metodom. Potrebno je pažljivo uračunati i investicijske troškove koji se realno plaćaju u nultoj godini, ali za potrebe ove metode potrebno ih je razvući kroz cijeli očekivani vijek trajanja postrojenja.

Tablica 2. Vrijednosti za izračun LCOH različitih tehnologija

Tehnologija	HOB	CHP	HP	ST	TES
Investicija [€/MW]	300,000	3,000,000	700,000	190 /m^2	4,500
Fiksni troškovi [€/MW]	32,000	45,000	2,000	0.04 /m^2	8.6 / MWh
Varijabilni troškovi [€/MWh]	1.0	3.8	3.3	0.2	/
Cijena goriva [€/MWh]	20	20	Struja	0	/
Vijek trajanja [god]	25	25	25	25	40
Diskontna stopa	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Upis 'struja' kod dizalice topline odnosi se na to da je cijena njenog goriva struje varijabilna te je s obzirom na to učitavana iz posebne datoteke kako bi se što preciznije simulirala cijena te razodblje korištenja tehnologija ovisnih o istoj (HP i CHP).

Uz LCOH promatrani su i troškovi pogona, ali je taj podatak gledan samo kao dodatna referenca i nije bio ključan u odabiru konfiguracije sustava. Troškovi pogona uračunavaju samo cijenu goriva te varijabilne i fiksne troškove pogona, a izuzimaju investiciju iz proračuna. Također ovdje se vrijednosti ne diskontiraju jer za tim nema potrebe obzirom da se svi troškovi stvarno plaćaju u godini za koju se računa.

$$RC = \frac{M_t + F_t}{E_t}, \qquad [\frac{€}{MWh}]$$

5.2. Scenarij 1 (HOB + CHP + TES)

U prvom scenariju odabrane su za analizu dvije tehnologije, a to su bojler na biomasu te kogeneracijsko postrojenje na biomasu. Kao pogonsko gorivo za obje tehnologije odabrana je biomasa kao obnovljivi i čišći izvor energije u odnosu prirodni plin ili čak ugljen u slučaju kogeneracije.

S obzirom da u ovom scenariju nisu korišteni dizalica topline i solari, temperatura mreže utjecala je jedino na Cb i s obzirom na taj podatak su uspoređivani podscenariji. Očekivano je da s padom temperature mreže raste faktor proizvodnje električne energije što izravno donosi veće prihode od prodaje, a time i manji LCOH kogeneracije te cijelog sustava.

Velika prednost kogeneracijskog postrojenja je kao što je već ranije opisano da osim toplinske proizvodi i električnu energiju. Proizvedena električna energija prodaje se izravno u mrežu te se time pokriva dio troškova proizvodnje. Zbog toga je paljenje ovakve vrste postrojenja najisplativije u periodima vrlo visoke cijene električne energije kako bi ta ostvarena dobit bila što veća. To je naravno potrebno predvidjeti i kod računanja LCOH pa tako formula za kogeneraciju glasi:

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t - I_{EL}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \qquad [\frac{€}{MWh}]$$

Bojler je tehnologija koja kao što je vidljivo iz priložene tablice ima puno manje troškove i kod početne investicije i kasnije kod korištenja. Naravno, nema mogućnost proizvodnje struje, ali je zato čim cijena struje padne isplativiji za korištenje. Zbog toga se ove dvije tehnologije vrlo dobro nadopunjuju te imaju dobru mogućnost kombiniranja u sustavu.

Spremnik toplinske energije služi kako bi se višak jeftino proizvedene topline mogao pospremiti te u razoblju kada je proizvodnja skupa svim tehnologijama koristiti za zagrijavanje mreže. Spremnik ima vrlo niske troškove i ugradnje i korištenja te je zbog toga vrlo isplativ za korištenje te u svim kombinacijama ima vrlo nizak LCOH pa je poželjno koristiti ga što je moguće češće.

Konačna odluka o najboljoj instaliranoj kombinaciji snaga i vremena korištenja ovih tehnologija donesena je na temelju zajedničkog LCOH odnosno odabrana je ona kombinacija kod koje je bio najmanji mogući.

$$LCOH_{uk} = \frac{LCOH_{HOB} * E_{HOB} + LCOH_{CHP} * E_{CHP} + LCOH_{TES} * E_{TES}}{E_{HOB} + E_{CHP} + E_{TES}}$$

Tablica 3. Isprobane konfiguracije scenarija 1

	P_{HOB}	P_{CHP}	C_{TES}	$LCOH_{uk}$	RC
1	10	10	100	95.75	31.26
2	8	8	100	81.09	30.71
3	5	10	100	88.35	30.01
4	5	8	100	76.17	30.74
5	10	5	100	66.85	27.22
6	10	3	100	58.08	24.37
7	10	3	50	60.04	25.11
8	10	3	200	59.44	25.07

Proveden je niz simulacija s različitim vrijednostima maksmalnih snaga bojlera i kogeneracije te kapaciteta bojlera kao što je vidljivo u tablici. Može se primjetiti kako je $LCOH_{uk}$ bolji čim je ukupna instalirana snaga manja jer to smanjuje investicijske i fiksne troškove. Optimalna veličina spremnika toplinske energije dobivena je na 100 MWh dok za veće i manje vrijednosti kapaciteta ukupni $LCOH_{uk}$ lagano raste.

Također je vidljivo kako su u nekim konfiguracijama s nešto većim LCOH troškovi pogona manji. To se događa jer bojler najveću razliku radi na investicijskim troškovima koji su mnogo manji nego kod kogeneracije, ali je i dalje bitnije kakav je LCOH za ocjenu konfiguracije.

$$P_{HOB} = 10\ MW$$

$$P_{CHP} = 3\ MW$$

$$C_{TES} = 100\ MWh$$

Sva tri podscenarija bit će uspoređivana prema ovoj konfiguraciji sustava kako bi usporedba izravno ovisila samo o promjeni Cb.

5.2.1. Podscenarij 1.1 (Visokotemperaturna mreža)

Za visokotemperaturnu mrežu, srednje temperature polaza 86.6°C, faktor Cb iznosi 0.45. To u biti znači da se za svaki proizvedeni megavatsat toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju proizvede 0.45 megavatsati električne energije.

U ovoj kombinaciji obje tehnologije proizvodnje su dobro iskorištene te proizvode kroz cijelu godinu. Bojler radi 3801 sat od čega 454 na maksimalnoj snazi jer u ostalim satima to nije potrebno. Za to vrijeme proizvede 19,888.59 MWh toplinske energije koju predaje u sustav, a LCOH iznosi 53.71 €/MWh.

Kogeneracija proizvodi 5381 sat od čega čak 5334 sat na maksimalnoj snazi te za to vrijeme proizvede 16,079.75 MWh toplinske energije. Također za to vrijeme se proizvede i 7,235.89 MWh električne energije od čega se zaradi 310,686.35 €. Zahvaljujući tome LCOH kogeneracijskog postrojenja iznosi 74.54 €/MWh.

Iz spremnika se u mrežu isporuči ukupno 4,309.58 MWh toplinske energije uz vrlo nizak LCOH od samo 19.27 €/MWh.

Kombinacija ovih vrijednosti postiže konačnu vrijednost:

$$LCOH_{uk} = 58.08 \ \frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 24.37 \ \frac{€}{MWh}$$

5.2.2. Podscenarij 1.2 (Srednjetemperaturna mreža)

Kod srednjetemperaturne mreže, srednje temperature polaza 74.4°C, faktor Cb iznosi 0.5. Taj porast odnosa proizvedene električne i toplinske energije trebao bi donijeti porast proizvedene struje te time smanjenje pogonskih troškova te LCOH.

I u ovom podscenariju obje tehnologije rade dug period vremena te proizvedu podjednaku količinu toplinske energije. Bojler radi nešto kraće, 3570 sati od čega 395 na punoj snazi te samim time naravno proizvede nešto manje energije nego u prvom podscenariju, 18,926.26 MWh te malo raste i njegov LCOH te sada iznosi 55.37 €/MWh.

Tu toplinsku energiju sad nadoknađuje kogeneracija koja sada radi 5705 sati od čega 5652 na punoj snazi. Za to vrijeme proizvede se 17,044.65 MWh toplinske te 8,522.33 MWh električne energije od čega se zaradi 357,911.11 €. LCOH kogeneracije zahvaljujući svemu ovome se prilično smanjuje te iznosi 68.89 €/MWh.

Toplinski spremnik je ostao na sličnim brojkama, isporuči 4,548.33 MWh topline uz LCOH od 18.72 €/MWh.

Konačna vrijednost LCOH u ovom podscenariju iznosi:

$$LCOH_{uk} = 56.96 \ \frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 23.25 \ \frac{€}{MWh}$$

5.2.3. Podscenarij 1.3 (Niskotemperaturna mreža)

Prosječna polazna temperatura niskotemperaturne mreže iznosi 62.2°C te u toj situaciji Cb iznosi 0.55. Naravno očekuje se daljnji rast korištenja CHP-a te smanjenje $LCOH_{uk}$.

Bojler ovdje radi još kraće, 3339 sati od čega 371 na punoj snazi. Ukupna proizvedena toplinska energija iznosi 18,181.27 MWh, a LCOH 56.78 €/MWh. Kogeneracijsko postrojenje proizvodi još više, radi 5951 sati od čega 5907 na punoj snazi. Za to vrijeme proizvede 17,793.26 MWh toplinske energije te 9,786.30 MWh električne energije od čega zarada iznosi čak 403,536.05 €. LCOH kogeneracije se ovime dodatno smanjuje na 64.43 €/MWh.

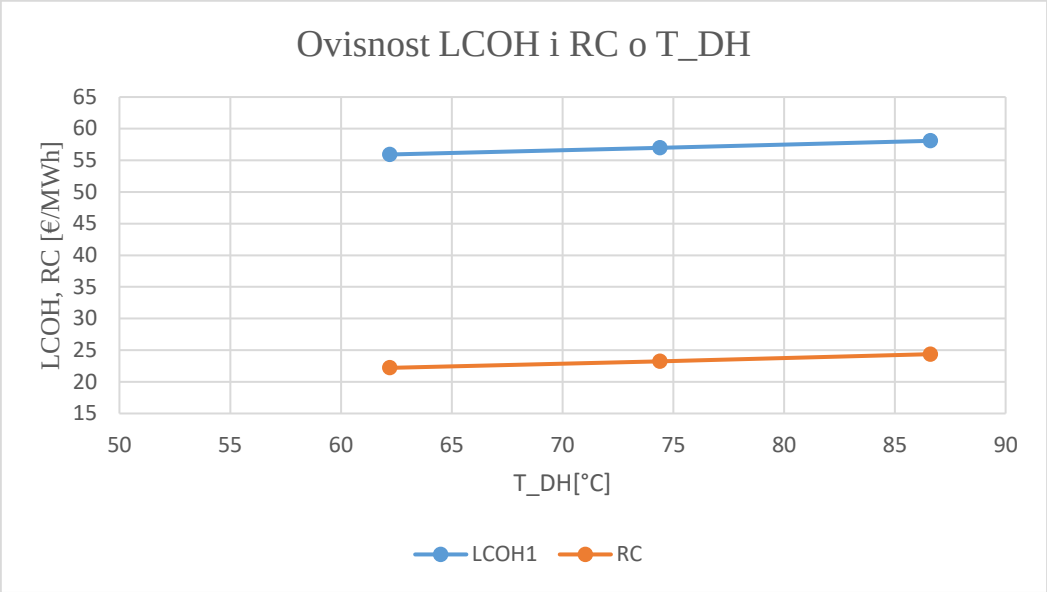
Toplinski spremnik isporučuje nešto više energije nego u prva dva podscenarija, 4,795.57 MWh uz uobičajeno nizak LCOH od 18.20 €/MWh.

Konačne vrijednosti LCOH i RC u trećem podscenariju iznose:

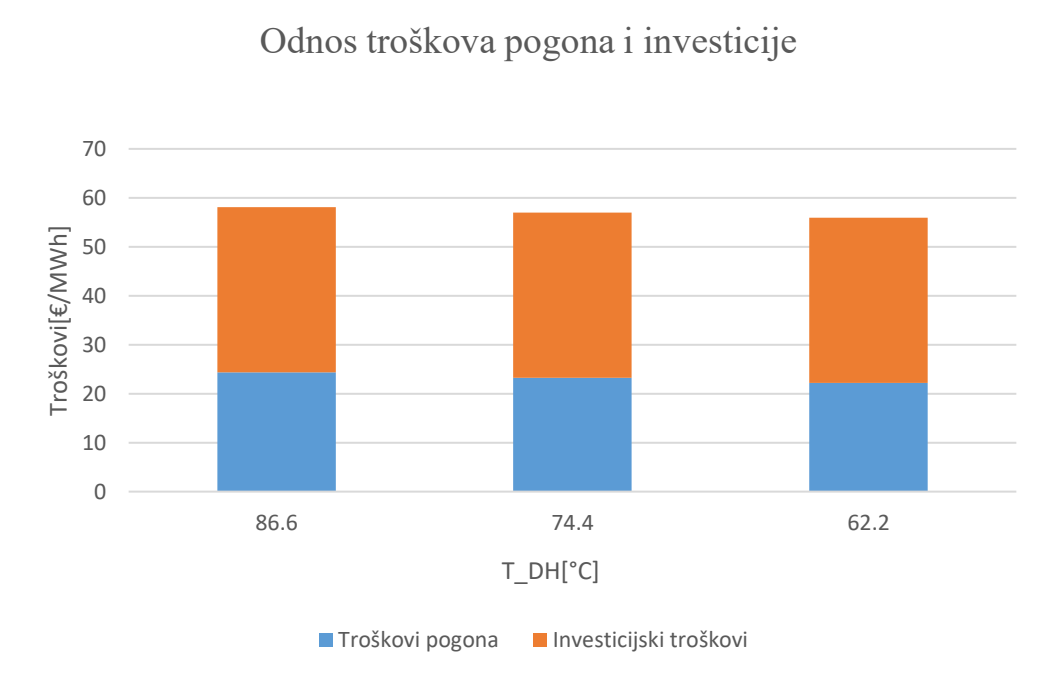
$$LCOH_{uk} = 55.92 \ \frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 22.21 \ \frac{€}{MWh}$$

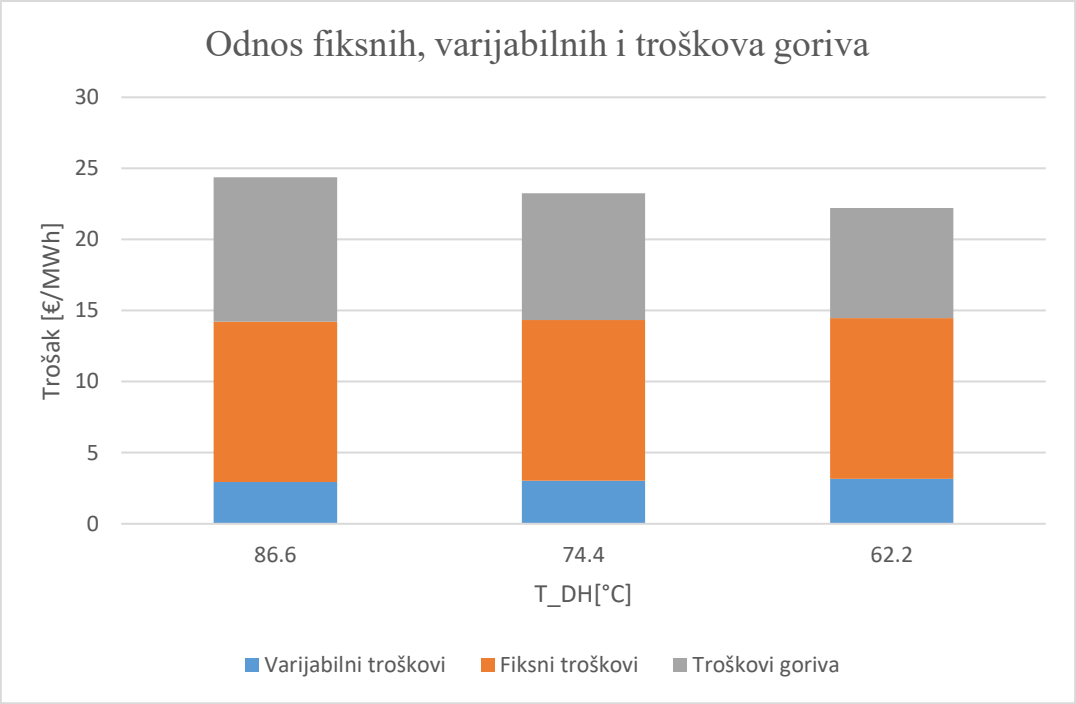
5.2.4. Usporedba podataka za scenarij 1



Slika 19. Utjecaj smanjenja temperature mreže na LCOH i RC, scenarij 1



Slika 20. Odnos troškova pogona i investicije, scenarij 1



Slika 21. Odnos fiksnih, varijabilnih i troškova goriva, scenarij 1

Iz ovih podataka vidljivo je da se smanjenjem temperature mreže povećava Cb kogeneracijskog postrojenja te se time izravno utječe na smanjenje troškova konfiguracije jer padaju i LCOH i RC. Ukupno smanjenje $LCOH_{uk}$ iznosi 2.16 €/MWh odnosno 3.7% što donosi uštedu u cijeloj godini od gotovo 78,000 € samo kroz smanjenje troškova za vrijeme rada konfiguracije, bez mijenjanja bilo kojeg drugog parametra.

U ovom scenariju investicijski troškovi su iznose oko 60% ukupnih troškova dok ostatak odlazi na troškove pogona kao što se vidi na Slici 18. Smanjenjem temperature mreže naravno udio pogonskih troškova opada jer se isti iznos energije proizvede za manje sati rada, a i dobit od prodaje struje kogeneracije se povećava.

Od svih troškova pogona, varijabilni troškovi su najmanji, iznose 12-15% svih troškova pogona, a sa smanjenjem temperature mreže lagano rastu. Fiksni troškovi konstantno iznose 11.3 €/MWh što daje 46-50% ukupnih troškova pogona. Troškovi goriva naravno najviše variraju, a smanjenjem temperature mreže se smanjuje i njihov iznos i postotni udio.

5.3. Scenarij 2 (HOB + CHP + HP + TES)

U drugom scenariju osim tehnologija korištenih u prvom scenariju uključena je i dizalica topline zrak – voda. Kao izvor topline koristi se vanjski zrak čije su temperature kroz godinu uzete iz stvarnih podataka meteorološke postaje Zagreb-Grič na satnoj bazi. Toplinski ponor je voda koja se koristi kao izvor topline za zagrijavanje potrošača. Iz podataka o temperaturama vanjskog zraka i podataka o temperaturi mreže izrađeni su podaci za COP dizalice topline opisani u ranijem dijelu ovog rada. Podaci za COP se iz zasebne datoteke uvoze u program kako bi se dobili što realniji podaci. Kako bi se dodatno mogao usporediti utjecaj COP-a na proizvedenu toplinsku energiju te troškove ovaj scenarij podijeljen je na tri dijela. U svakom od njih korišten je različit COP dobiven iz različitih temperatura mreže opisan u ranijem dijelu rada.

Dizalica topline koja kao gorivo koristi električnu energiju najisplativija je naravno kada je cijena električne energije vrlo niska. U tim periodima ona je daleko najisplativija tehnologija u konfiguracijama opisanim u ovom radu. Također u usporedbi s kogeneracijom ima daleko manje investicijske i pogonske troškove dok je početno ulaganje veće nego kod bojlera, ali su Troškovi pogona niži, a i cijena goriva je vrlo često niža, a to su naravno razdoblja kada se ona koristi.

Tablica 4. Isprobane konfiguracije sustava za scenarij 2

	P_HOB	P_CHP	P_HP	C_TES	LCOH	RC
1	5	5	5	100	65.32	17.37
2	5	5	10	100	69.00	16.54
3	10	5	10	100	76.12	19.83
4	3	3	10	100	51.65	15.18
5	2	2	10	100	43.74	14.81
6	2	2	10	200	43.67	14.41

Odabrana konfiguracija za sva tri podscenarija je jednaka kako bi se mogli relevantno uspoređivati odnosno izravno vidjeti kako COP utječe na troškove proizvodnje.

$$P_{HOB} = 2\ MW$$

$$P_{CHP} = 2\ MW$$

$$P_{HP} = 10\ MW$$

$$C_{TES} = 200\ MWh$$

Odmah se može vidjeti da je optimalna kombinacija kada se najveći udio toplinske energije dobiva iz dizalice topline što je rezultat niže cijene njenog goriva. Kogeneracija i bojler služe kao pomoć u razdobljima previsoke cijene električne energije. Ovdje je isplativije imati veći spremnik toplinske energije u odnosu na prvi scenarij jer se može uskladištiti veći dio toplinske energije koju proizvede dizalica topline. Nakon toga se u razdobljima rasta cijene električne energije prvo koristi ta toplina jer je trošak puno manji nego da se pokreće bojler ili kogeneracijsko postrojenje.

5.3.1. Podscenarij 2.1 (visokotemperaturna mreža)

Prvi podscenarij koji je proveden vršen je za visokotemperaturnu mrežu prosječnog iznosa COP 2.33. Unutar samog programa je kao što je navedeno za svaki sat posebno računat COP odnsono unesen iz zasebne datoteke kako bi se vidjele varijacije. Kombiniranjem tog podatka i satne cijene električne energije te uspoređivanjem s satnim pogonskim troškovima ostalih tehnologija program odabire kada bi bilo optimalno koristiti dizalicu topline. Naravno Cb faktor za visokoremperaturnu mrežu je jednak kao u scenariju 2.1 i iznosi 0.45

Iako proizvede daleko najveću količinu topline, dizalica topline nema najdulji period rada jer ima najveću moguću snagu te veliki dio topline šalje u spremnik za kasniju upotrebu. Tako dizalica topline radi 2624 sata od čega 2457 na maksimalnoj snazi. Za to vrijeme proizvede 25,327.18 MWh topline. Trošak električne energije potrebne za tu proizvodnju iznosi 322,065.12 €, a LCOH iznosi 44.95 €/MWh.

Kogeneracija i u ovoj situaciji radi u najduljem vremenskom periodu, ukupno 3376 sati od čega 3369 na punoj snazi. Za to vrijeme proizvede 6,743.3 MWh toplinske energije te 3,034.48 MWh električne energije što donosi zaradu od 140,194.09 €, a LCOH iznosi 114.38 €/MWh.

Bojler je nešto manje u pogonu nego u prvom scenariju, 2027 sati, ali zato puno češće, čak 2015 sati na punoj snazi. Za to vrijeme proizvede 4,041.67 MWh toplinske energije te mu LCOH iznosi 53.19 €/MWh.

U ovoj situaciji i spremnik isporuči puno veću količinu toplinske energije jer ga je u puno većem vremenskom periodu isplativo puniti, a korištenje uskladištene energije je često jeftinije od proizvodnje bilo kojom tehnologijom. Tako spremnik preda 18,273.87 MWh topline uz vrlo nizak LCOH od tek 13.64 €/MWh.

Ovakvom kombinacijom tehnologija, čak i uz relativno nizak COP zbog visoke temperature mreže ukupni LCOH se drastično smanjuje.

$$LCOH_{uk} = 43.67 \frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 14.41 \ \frac{€}{MWh}$$

5.3.2. Podscenarij 2.2 (srednjetemperaturna mreža)

Kao što je već naglašeno jedina razlika u odnosu na prethodni scenarij je temperatura mreže odnosno COP dizalice topline koji je izravno ovisan o temperaturi mreže. Za očekivati je naravno da će biti još isplativije koristiti dizalicu topline u nešto duljem periodu odnosno da će granica cijene električne energije kada je isplativa malo porasti. Također očekivano je da se i LCOH dizalice topline te ukupni LCOH sustava smanji.

COP je ponovno unesen iz zasebne datoteke, izračunat za satnu distribuciju srednje temperaturne mreže dok je faktor Cb iznosio 0.5.

Dizalica topline koristi se nešto više, 2675 sati od čega 2507 pri punoj snazi. Za to vrijeme DT proizvede 25,828.28 MWh za što se potroši 289,440 € električne energije. LCOH dizalice topline u ovom podscenariju iznosi 42.84 €/MWh.

Kogeneracijsko postrojenje također radi nešto više, 3420 sati od čega 3413 na punoj snazi te za to vrijeme proizvede 6,833.92 MWh toplinske te 3,416.96 MWh električne energije od čega se zaradi 158,671 €. LCOH kogeneracije ovdje iznosi 110.48 €/MWh.

Period rada bojlera se prilično skraćuje, na 1727 sati od čega 1720 na punoj snazi te naravno proizvede puno manje topline, 3,447.53 MWh uz porast LCOH na 58.74 €/MWh.

Spremnik ostaje na sličnim brojevima, 18,200.39 MWh isporučene energije te LCOH od 13.66 €/MWh.

Ukupni LCOH i RC smanjuju se na:

$$LCOH_{uk} = 42.58 \frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 13.30 \ \frac{€}{MWh}$$

5.3.3. Podscenarij 2.3 (niskotemperaturna mreža)

Kao što je bilo za očekivati s dodatnim porastom COP-a i Cb-a dodatno se smanjio LCOH te dvije tehnologije te cjelokupnog sustava.

Dodatno se produljilo vrijeme korištenja dizalice topline, samim time i proizvedena toplina iz tog izvora. Ovdje dizalica topline radi 2821 sati od čega 2652 u punoj snazi te proizvede 27,225.21 MWh energije, a trošak električne energije utrošene za to je manji, 266,857.64 €. LCOH tako pada na samo 39.86 €/MWh.

Kogeneracijsko postrojenje se također koristi još više, 3491 sat od čega 3485 na punoj snazi. Za to vrijeme proizvede se 6,978.67 MWh toplinske energije te 3,838.27 MWH električne energije za što se zaradi 178,988.41 €. LCOH kogeneracije iznosi 105.77 €/MWh.

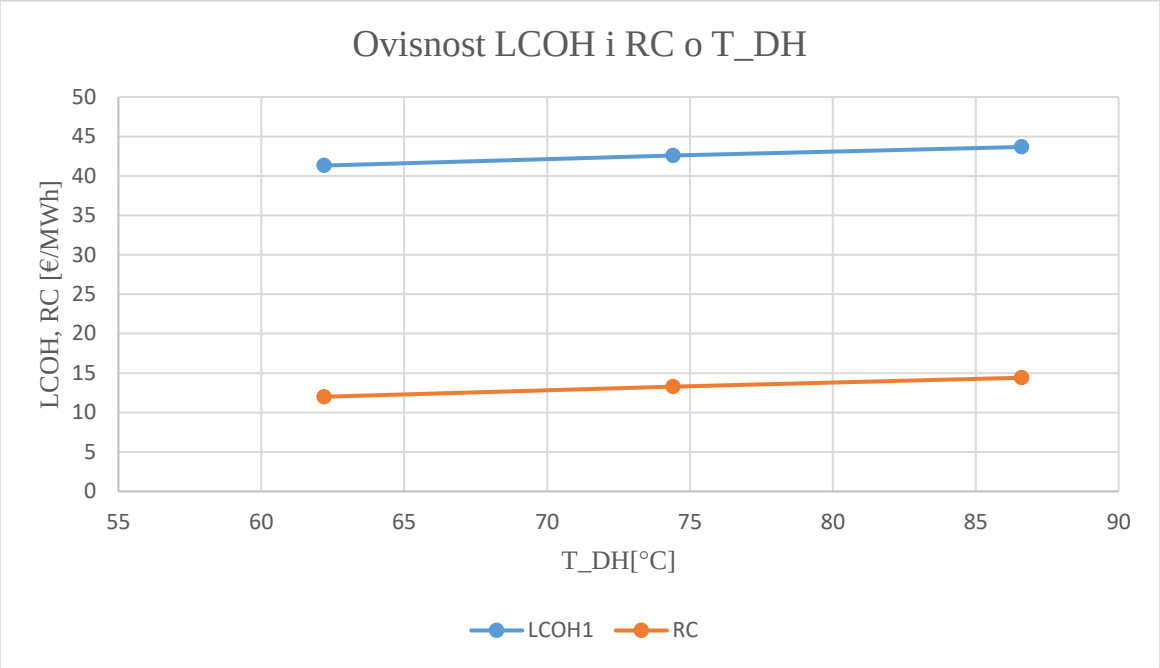
Bojler se koristi još manje, samo u iznimnim situacijama, 957 sati od čega 950 na punoj snazi. Za to vrijeme proizvede se 1,906.13 MWh toplinske energije uz LCOH 89.25 €/MWh.

Dodatnim porastom COP-a naravno dodatno je pao i ukupni LCOH i RC konfiguracije:

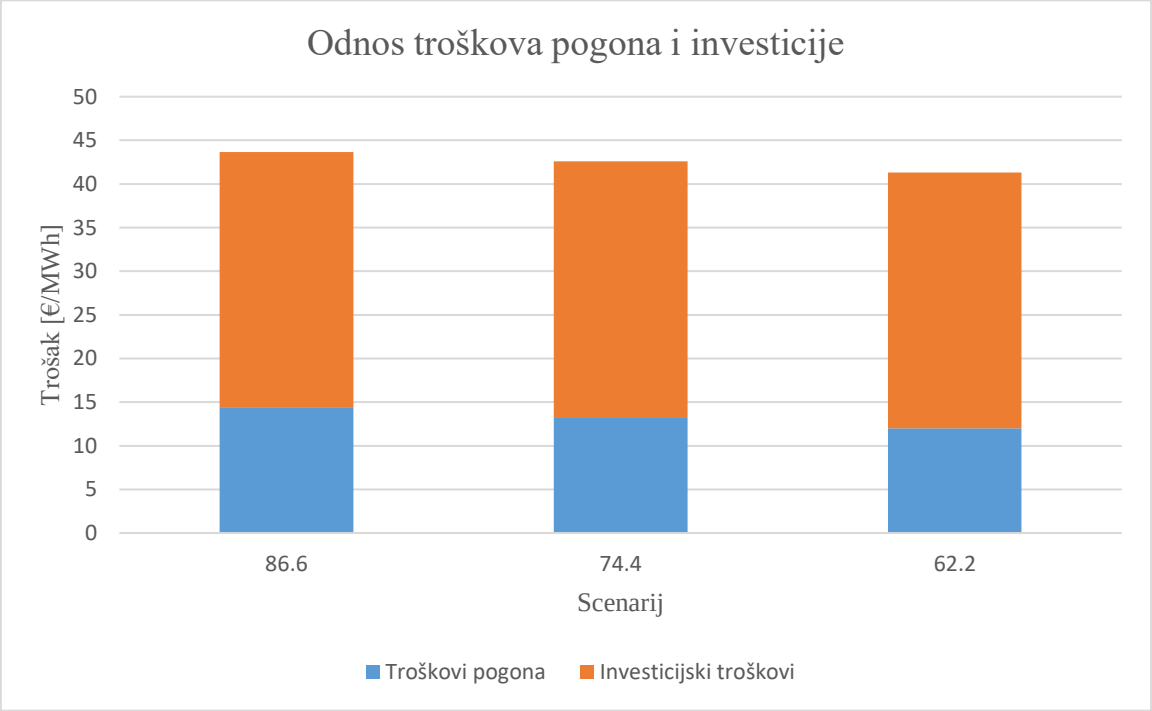
$$LCOH_{uk} = 41.31 \frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 12.00 \ \frac{€}{MWh}$$

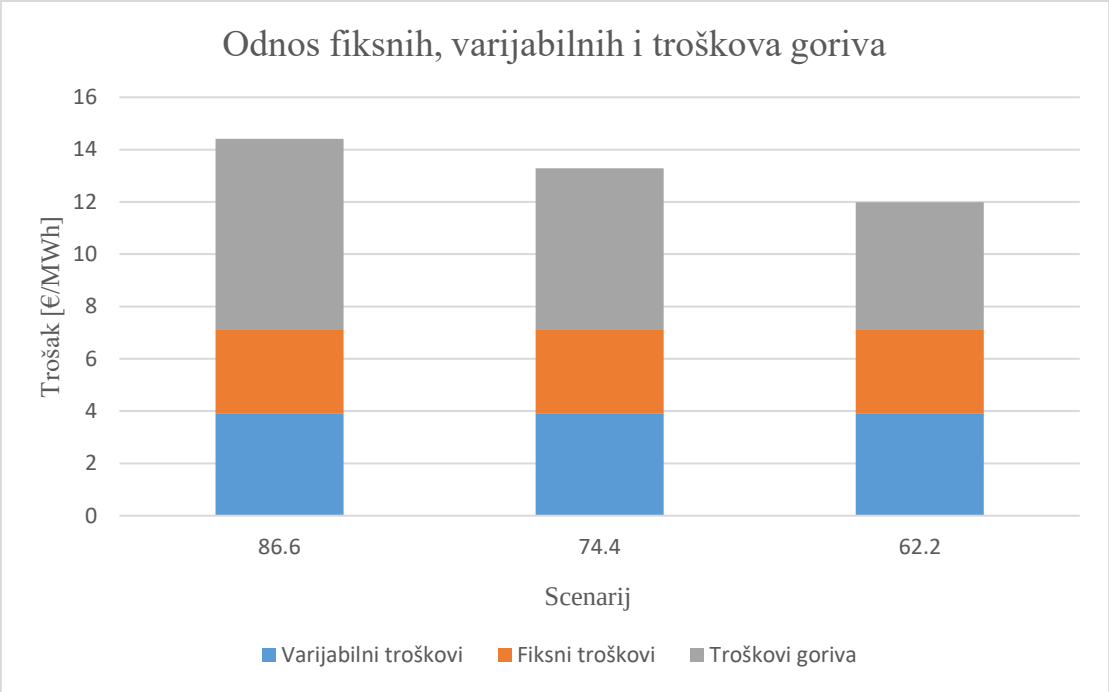
5.3.4. Usporedba podataka za scenarij 2



Slika 22. Utjecaj smanjenja temperature mreže na LCOH i RC, scenarij 2



Slika 23. Odnos troškova pogona i investicije, scenarij 2



Slika 24. Odnos fiksnih, varijabilnih i troškova goriva, scenarij 2

I u ovom scenariju vidljivo je da je smanjenje temperature mreže bitno utjecalo na LCOH i RC sustava. To je u ovom scenariju još uočljivije nego u prvom jer je pozitivno utjecalo na dva faktora. LCOH sustava se smanji za 2.36 €/MWh što je i u apsolutnom iznosu i u postotnom iznosu (5.4%) još veća ušteda nego u prvom scenariju. Ukupna godišnja ušteda ovom promjenom je ponovno značajna te iznosi gotovo 85,000 €.

Troškovi pogona u ovom scenariju iznose oko 33% te se njihov udio naravno i ovdje smanjuje sa smanjenjem temperature mreže. Fiksni troškovi iznose 3.2 €/MWh što je 22-26% ukupnih troškova pogona, a varijabilni troškovi su također gotovo konstantni te su 27-33% svih troškova, naravno udio i jednih i drugih raste sa smanjenjem temperature mreže. Troškovi goriva smanjuju se primjetno u aposlutnom iznosu te je njihov udio tek oko 40% u tropkovima pogona podscenarija 2.3.

5.4. Scenarij 3 (HOB + CHP + HP + ST + TES)

U ovom scenariju uključena je i četvrta tehnologija proizvodnje toplinske energije, a to su solari. Velika prednost solara je što je njihovo gorivo Sunce odnosno solarna energija potpuno besplatna. Negativna strana je da mogu raditi samo kada su vremenski uvjeti pogodni odnosno samo po danu i to kada je sunčano vrijeme. Zbog toga što je toplinska energija iz solara jeftina, a ovisi o vremenskim uvjetima imaju apsolutnu prednost pri ulasku u mrežu odnosno sva toplina proizvedena na solarima odmah se ubacuje u mrežu ili spremnik ako je proizvodnja u tom trenutku veća od potražnje.

Odabrana je vrlo slična konfiguracija prethodnoj. Snage prethodne tri tehnologije su ostale iste, samo je nadodano 5,000 m^2 solara. U ovoj situaciji LCOH je nešto viši nego u Scenariju 2, ali to je prihvatljivo jer je toplina iz solara mnogo čišća i potpuno obnovljiva pa je taj mali rast troškova dopustiv. Troškovi pogona dodatno padaju jer solari imaju vrlo niske varijabilne i fiksne troškove dok troškova za gorivo nema.

5.4.1. Scenarij 3.1 (visokotemperaturna mreža)

Vrijednosti COP-a i Cb-a za ovaj sustav jednaki su kao i u prva dva visokotemperaturna scenarija. Specifična toplina iz solara varijabilna je, a ukupni godišnji iznos je 445.85 kW/m^2.

U ovom scenariju solari proizvedu ukupno 2,229.27 MWh toplinske energije uz LCOH od 47.24 €/MWh, a rade ukupno 1868 sati. Dizalica topline i dalje proizvodi najviše toplinske energije, 23,236.86 MWh uz LCOH od 48.05 €/MWh. Kogeneracija proizvede 6,657.81 MWh toplinske i 2,996.01 MWH električne energije od čega se dodatno zaradi 138,560 €, a LCOH iznosi 115.78 €/MWh. Bojler proizvodi 3,997.85 MWh energije godišnje uz LCOH 53.54 €/MWh.

Ukupni LCOH je kao što je već navedeno nešto viši nego u scenariju 2.1, ali su Troškovi pogona zahvaljujući niskoj cijeni pogona solara niži:

$$LCOH_{uk} = 45.67 \frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 14.01 \frac{€}{MWh}$$

5.4.2. Scenarij 3.2 (srednjetemperaturna mreža)

Naravno, obzirom da smanjenje temperature mreže sada utječe na čak tri tehnologije, ukupni LCOH te RC su se smanjili u odnosu na prvi podscenarij. Iznos specifične topline proizvedene iz solara u ovom slučaju je 518.49 kW/m^2.

U ovom scenariju solari proizvedu ukupno 2,592.46 MWh toplinske energije uz LCOH od 40.65 €/MWh, a rade ukupno 2079 sati. Dizalica topline i proizvodi nešto više toplinske energije, 23,454.65 MWh uz LCOH od 46.23 €/MWh. Kogeneracija proizvede 6,670.60 MWh toplinske i 3,335.30 MWH električne energije od čega se dodatno zaradi 155,200 €, a LCOH iznosi 113.12 €/MWh. Bojler proizvodi 3,405.12 MWh energije godišnje uz LCOH 59.21 €/MWh.

Naravno, ukupni LCOH te troškovi pogona dodatno su se smanjili:

$$LCOH_{uk} = 44.61 \frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 12.95\ \frac{€}{MWh}$$

5.4.3. *Scenarij 3.3 (niskotemperaturna mreža)*

Ovaj scenarij donosi jako veliko poboljšanje zahvaljujući još većoj proizvodnji iz solara, specifična proizvedena toplinska energija iznosi 602.74 kW/m^2.

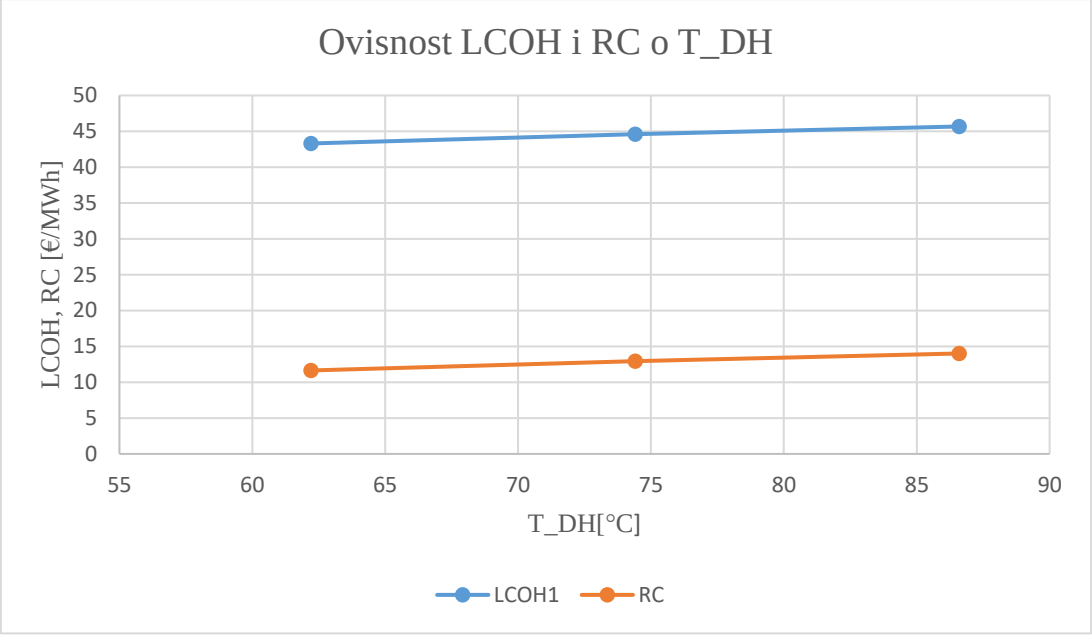
Solari u ovom scenariju rade 2335 sati i za to vrijeme proizvedu 3,013.7 MWh toplinske energije uz LCOH 34.99 €/MWh. Dizalica topline također proizvodi više zahvaljujući poboljšanom COP-u, taj iznos je 24,504.67 MWh uz LCOH od 43.38 €/MWh. Malo je porastao i iznos proizvedene energije iz kogeneracije pa tako sada iznosi 6,714.80 MWh toplinske te 3,693.13 MWh električne energije od koje se zaradi 172,571.4 €, a LCOH iznosi 109.92 €/MWh. Bojler ponovno radi vrlo kratak period te za to vrijeme proizvede 1,891.2 MWh topline uz LCOH 89.79 €/MWh.

Ukupni LCOH je nešto viši nego u scenariju 2, ali troškovi pogona su najmanji od svih scenarija.

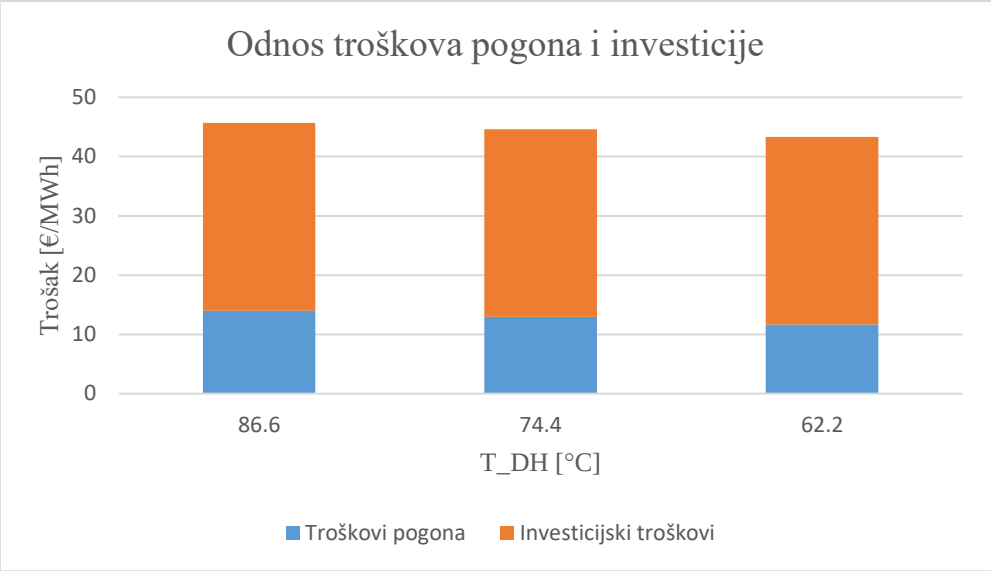
$$LCOH_{uk} = 43.30\frac{€}{MWh}$$

$$RC_{uk} = 11.64\ \frac{€}{MWh}$$

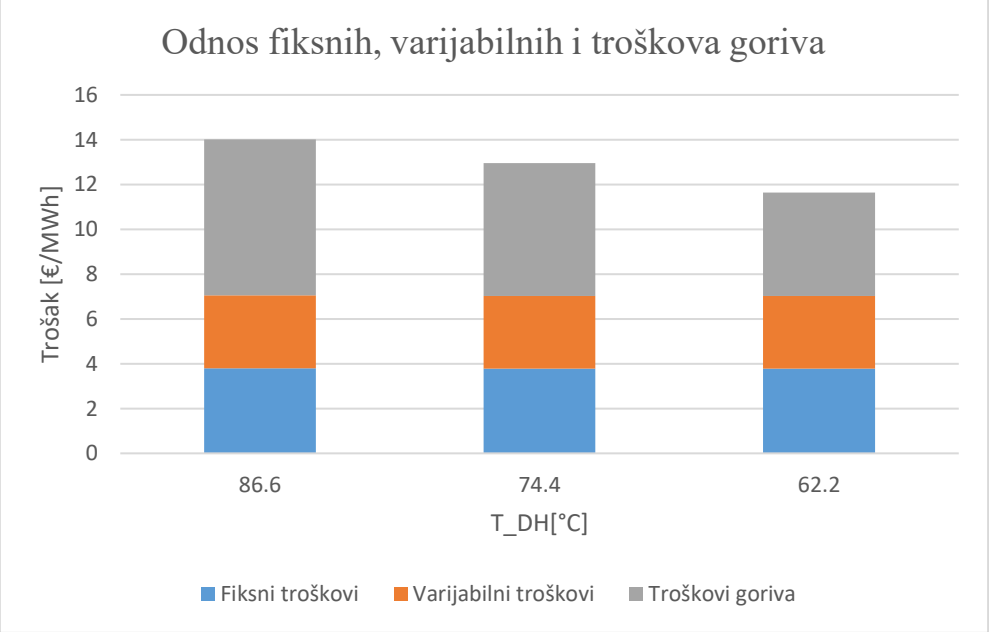
5.4.4. *Usporedba podataka za scenarij 3*



Slika 25. Utjecaj smanjenja temperature mreže na LCOH i RC, scenarij 3



Slika 26. Odnos troškova pogona i investicije, scenarij 3



Slika 27. Odnos fiksnih, varijabilnih i troškova goriva, scenarij 3

U ovom scenariju utjecaj smanjenja temperatura mreže je najveći i najjočitiji. To je naravno i logično jer se smanjenjem temperature mreže unaprijeđuju čak tri vrijednosti za tri različite tehnologije. LCOH sustava se ovim potezom smanjuje za 2.37 €/MWh odnosno 5.2%. Ukupna godišnja ušteda zahvaljujući tome iznosi oko 85,000 €.

Udio troškova pogona još je manji jer su se isti smanjili, a investicijski troškovi porasli tako da su troškovi pogona na manje od 30%. Najviše se smanjuju naravno troškovi goriva dok su varijabilni i fiksni troškovi konstantno. Troškovi gorva su se smanjili s udjela na 50% na tek 40% sa smanjenjem temperature mreže.

6. ANALIZA REZULTATA

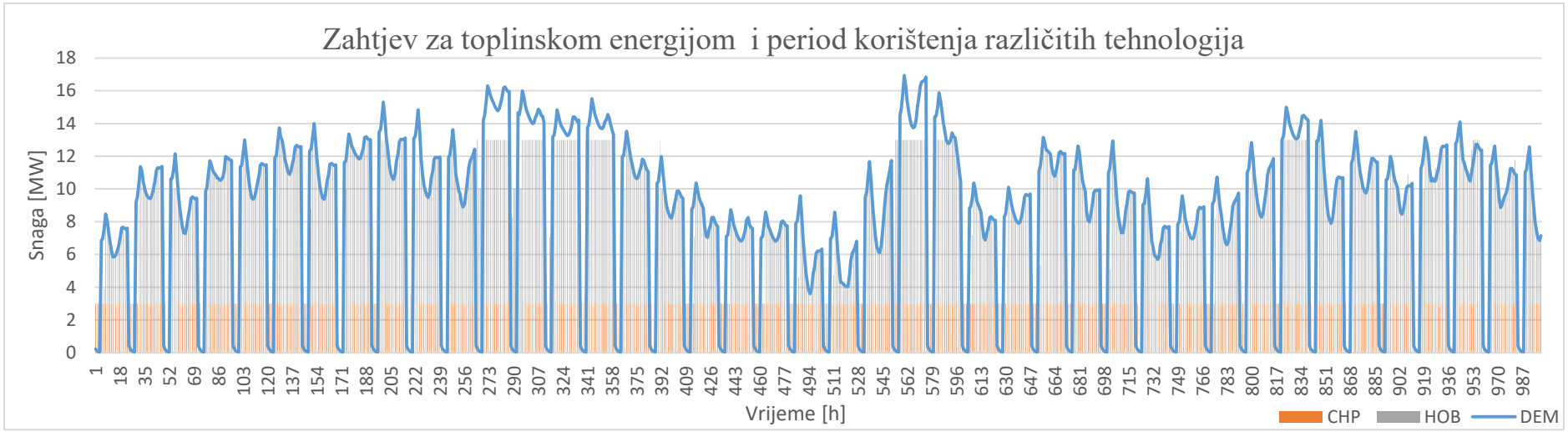
Nakon provedenih simulacija na tri različite konfiguracije toplinskog sustava s tri različite temperature mreže mogli smo vidjeti kakav utjecaj na sustav ima ubacivanje dvije nove tehnologije. Dizalica topline zrak-voda unaprijeđenje je donijela jer je često njeno gorivo, električna energija vrlo jeftina pa su troškovi pogona niski, a investicija je značajno manja nego kod kogeneracijskog postrojenja. Solari u sustav ubacuju toplinsku energiju dobivenu na potpuno čist način te su troškovi pogona gotovo na nuli, jedini trošak je fiksni trošak održavanja dok varijabilni troškovi te troškovi goriva iznose nula.

Tablica 5. LCOH svih devet konfiguracija

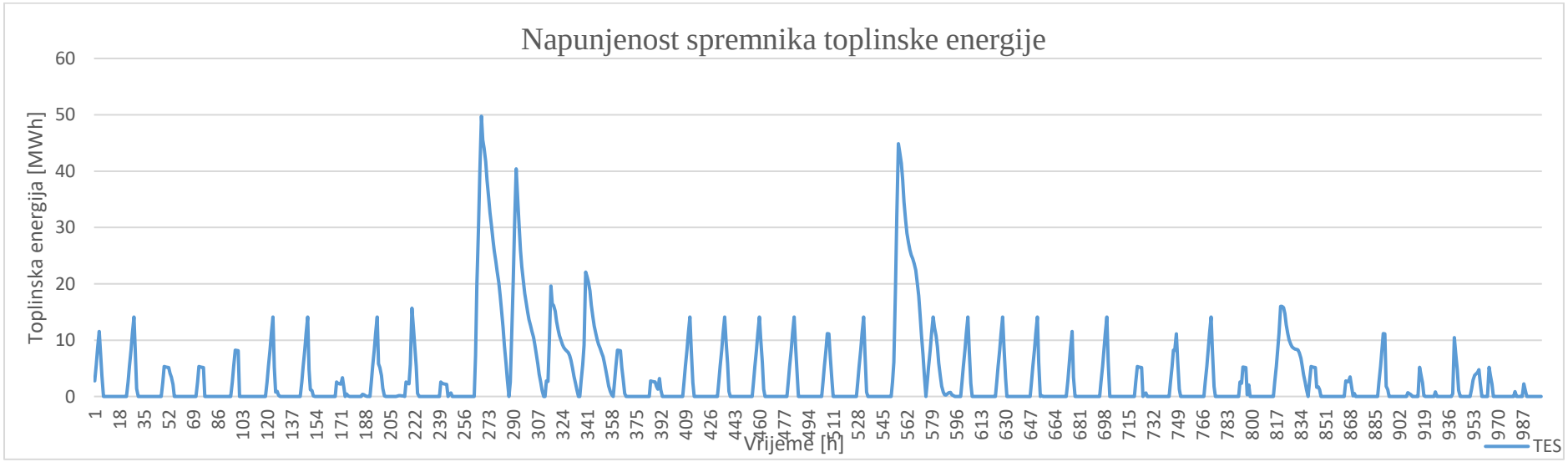
LCOH [€/MWh]	**Scenarij 1**	**Scenarij 2**	**Scenarij 3**
VT	58.08	43.67	45.67
ST	56.96	42.58	44.61
NT	55.92	41.31	43.30

Kao što se moglo očekivati, uvođenjem suvremenijih tehnologija s visokom iskoristivošću i jeftinijim gorivom može se dovesti do velikih ušteda. Primjenom dizalice topline i solara može se čak i bez mijenjanja temperarure mreže dovesti do ušteda od gotovo 12.5 €/MWh. Ipak to bi zahtijevalo dodatna ulaganja u sustave koji nisu tako u početku zamišljeni pa vjerojatno sama ušteda ne bi bila stvarno tolika. S druge strane promjena temperature mreže zahtijeva puno manja ulaganja, a ima vrlo dobar povrat kao što je navedeno u samim usporedbama podataka pojedinih scenarija.

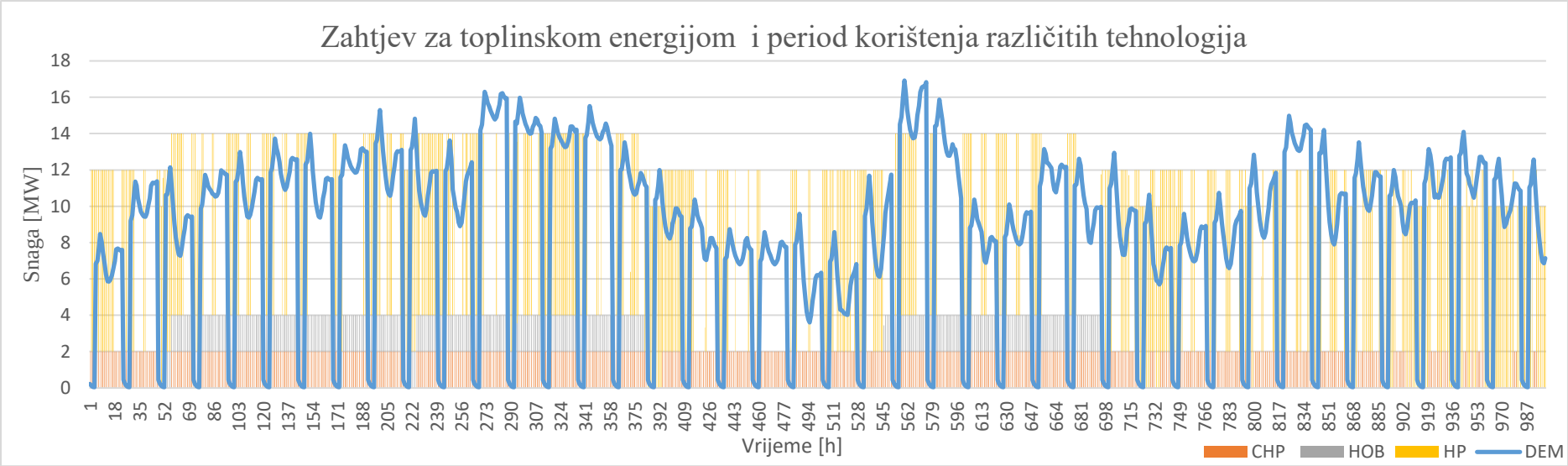
Ovi podaci dovode do zaključka da je preporučljivo ugrađivati suvremene tehnologije proizvodnje toplinske energije kao i koristiti što je moguće niže temperature polaza u centraliziranim toplinskim sustavima. Utjecaj na financije je kao što se može vidjeti vrlo značajan, a i toplinska energija je proizvedena na ekološkiji način.



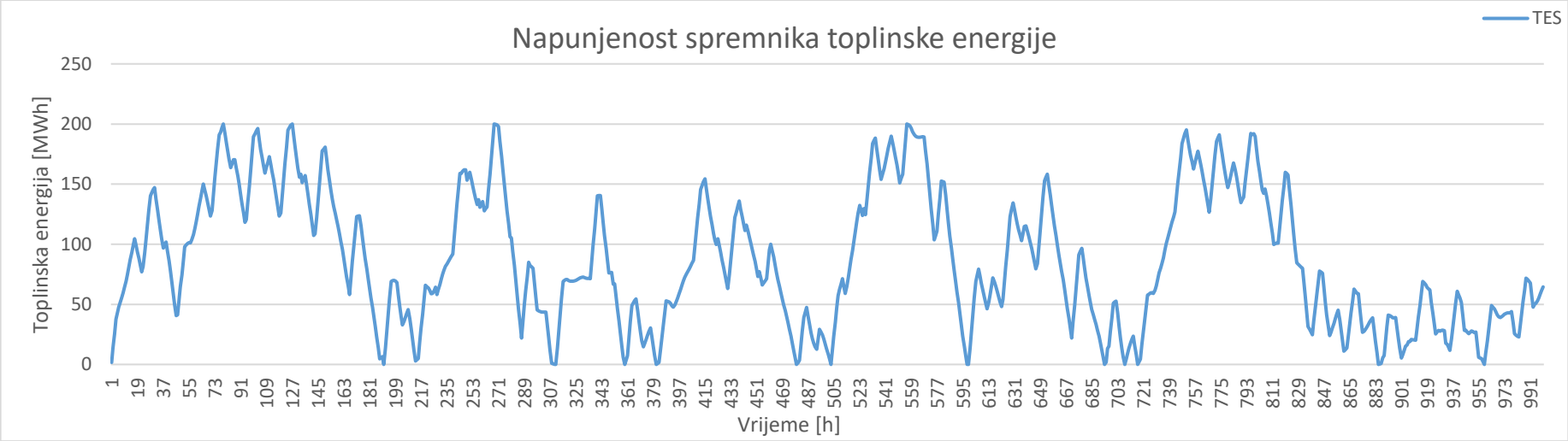
Slika 28. Zahtjev za toplinskom energijom i period korištenja tehnologija, scenarij 1



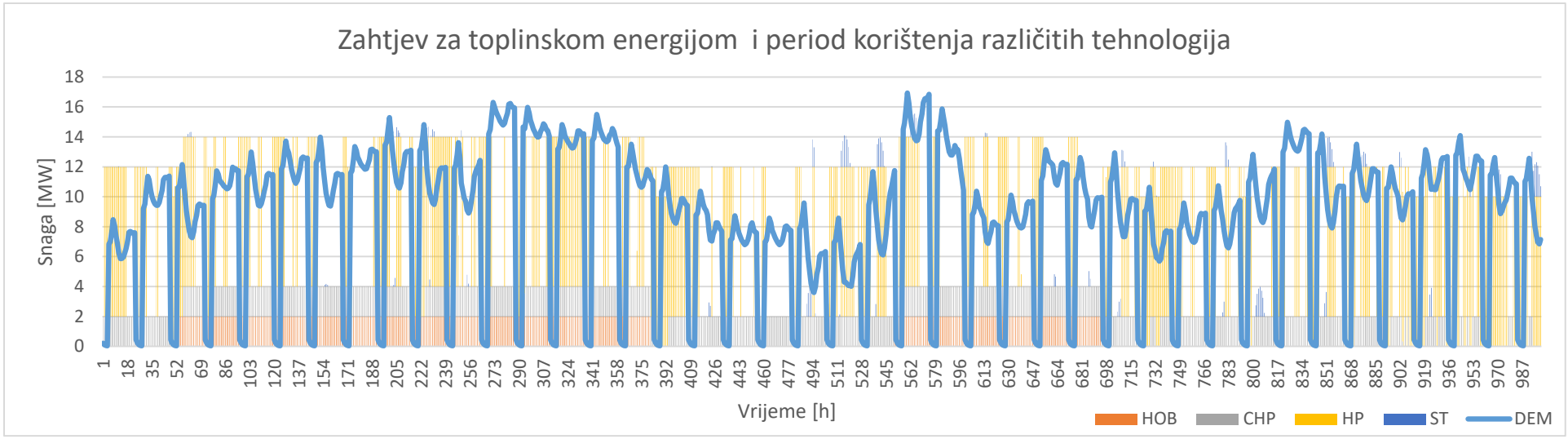
Slika 29. Napunjenost spremnika toplinske energije, scenarij 1



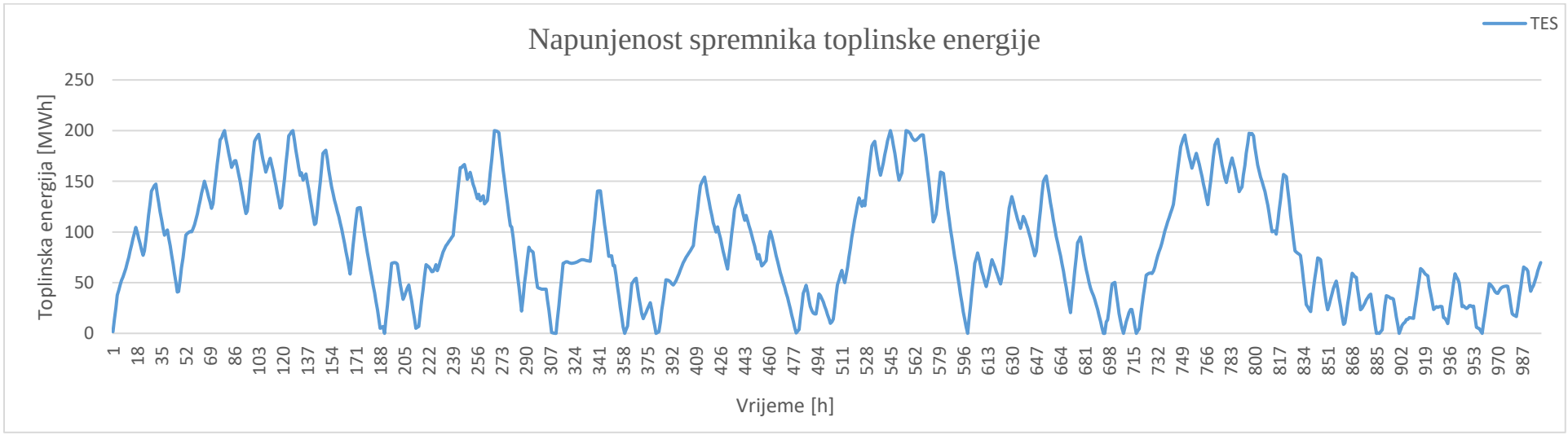
Slika 30. Zahtjev za toplinskom energijom i period korištenja tehnologija. scenarij 2



Slika 31. Napunjenost spremnika toplinske energije, scenarij 2



Slika 32. Zahtjev za toplinskom energijom i period korištenja tehnologija, scenarij 3



Slika 33. Napunjenost spremnika toplinske energije, scenarij 3

Slike 26-31 izravno prikazuju koliko se koje tehnologije iskorištavaju u kojem od scenarija. Grafovi su prikazani samo za prvih 1000 sati rada zbog bolje transparentnosti podataka odnosno da se ne bi sve preklopilo u jednu veliku mrlju. Stupci prikazuju koje tehnologije se koriste dok linija prikazuje zahtjev za toplinskom energijom. U slikama 27, 29 i 31 prikazana je napunjenost spremnika te se zajedničkim pručavanjem grafova može vidjeti u kakvom su odnosu te veličine.

Vidljivo je kako u prvom scenariju niti jedna tehnologija sama po sebi nije dovoljno isplativa da proizvodi više energije nego što je to potrebno osim u rijetkim trenucima. Zbog toga spremnik toplinske energije gotovo stalno stoji prazan, a samo je u rijetkim situacijama napunjen. Zbog toga linija potrebe za toplinskom energijom u većini grafa gotovo savršeno spaja vrhove stupaca proizvodnje po tehnologijama. Jasno je da je to razlog relativno velikim troškovima proizvodnje energije jer obje tehnologije moraju biti upaljene čak i kada je vrlo neisplativo da rade, ali je zahtjev obavezno zadovoljiti.

U druga dva scenarija vidljivo je da linija zahtjeva za toplinskom energijom mnogo nepreciznije prati vrhove stupaca proizvodnje. To je tako jer novouključene tehnologije, posebice dizalica topline imaju puno više perioda kada je isplativo da rade. U tim trenucima spremnik se puni što je više moguće te se prazni kada je proizvodnja iz svih tehnologija preskupa. Također je vidljivo kako kogeneracijsko postrojenje radi gotovo cijelo vrijeme pokrivajući stalno bazna opterećenja mreže.

7. ZAKLJUČAK

Pravilnim optimiziranjem perioda korištenja različitih tehnologija te uvođenjem jeftinijih i ičišćih tehnologija mogu se postići značajne uštede pri proizvodnji toplinske energije iz CTS-a. Potrebno je sve tehnologije koristiti u vremenskom periodu kada je to za njih najisplativije. Također ukoliko se koriste novije tehnologije isplativo je ugraditi i spremnik toplinske energije kako bi se jeftino proizvedena toplina mogla uskladištiti i kasnije koristiti. Poželjno je imati i čim nižu temperaturu mreže jer u toj situaciji iskoristivost gotovo svih tehnologija raste, a troškovi se smanjuju.

Ovim radom obuhvaćeno je nekoliko različitih scenarija od kojih se najboljim pokazala konfiguracija u kojoj se koriste bojler na biomasu, kogeneracijsko postrojenje na biomasu te dizalica topline zrak-voda uz korištenje spremnika toplinske energije i niskotemperaturnu toplinsku mrežu. Cijena proizvodnje toplinske energije iznosi tek 41.31 €/MWh, a daljnjim smanjenjem temperature mreže to bi se moglo i dodatno smanjiti. Također je zanimljiva i konfiguracija koja osim ovih tehnologija koristi i solarne panele za proizvodnju toplinske energije unatoč višim investicijskim troškovima. Tim potezom smanjuju je troškovi proizvodnje, gorivo za solare je besplatno te u potpunosti čisto i obnovljivo. Svakako je preporučljivo u CTS-ove ugrađivati takve novije tehnologije i to uz optimalno korištenje može donijeti velike uštede pri proizvodnji energije.

Izvori

[1] UN, “Kyoto protokol,” 1998.

[2] UN, “Pariški sporazum.” [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.

[3] Europska Komisija, “Europska strategija 20-20-20,” 2010.

[4] European Commission, “Going climate-neutral by 2050: A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy,” 2019, doi: 10.2834/02074.

[5] H. Lund *et al.*, “4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems.,” *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.

[6] H. Boesten, S., Ivens, W., Dekker, S. C., and Eijdems, “5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply,” *Adv. Geosci*, 2019. https://adgeo.copernicus.org/articles/49/129/2019/adgeo-49-129-2019.html.

[7] Europski parlament EU, “12/Sv. 3,” pp. 47–57, 2004.

[8] European Commission, “An EU Strategy on Heating and Cooling,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2016, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

[9] Ministarstvo gospodarstva RH, “Program korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016. – 2030.” 2015.

[10] Ministry of Economy Entrepreneurship and Crafts, “National Cogeneration Potential in Croatia,” 2009.

[11] “Kogeneracijska postrojenja.” pp. 1–12.

[12] J. K. Jensen, T. Ommen, L. Reinholdt, W. B. Markussen, and B. Elmegaard, “Heat pump COP, part 2: Generalized COP estimation of heat pump processes,” *Refrig. Sci. Technol.*, vol. 2018-June, pp. 1255–1264, 2018, doi: 10.18462/iir.gl.2018.1386.

[13] J. P. Jiménez Navarro, K. C. Kavvadias, S. Quoilin, and A. Zucker, “The joint effect of centralised cogeneration plants and thermal storage on the efficiency and cost of the power system,” *Energy*, vol. 149, pp. 535–549, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.025.