

# Prediktivno vođenje mikro energetskeg sustava

---

**Grubišić, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:049948>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dominik Grubišić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **PREDIKTIVNO VOĐENJE MIKRO ENERGETSKOG SUSTAVA**

Mentori:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Student:

Dominik Grubišić

Zagreb, godina 2019.

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

Zahvaljujem se roditeljima.

Dominik Grubišić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY .....	V
1. UVOD.....	1
2. MIKROSOLARNI TRIGENERACIJSKI SUSTAV .....	3
2.1. PVT kolektor.....	4
2.2. Spremnik topline .....	7
2.2.1. <i>Profil potrošnje potrošne tople vode</i> .....	9
2.3. Vođenje trigeneracijskog sustava.....	11
3. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA .....	14
3.1. Matematički model hibridnog PVT kolektora .....	14
3.2. Stratificirani spremnik topline .....	19
4. REZULTATI SIMULACIJE .....	21
4.1. Ljetno razdoblje .....	21
4.2. Zimsko razdoblje.....	24
4.3. Prijelazno razdoblje.....	31
4.4. Napredno vođenje prijelaznog dana.....	37
5. ZAKLJUČAK.....	44
LITERATURA.....	45
PRILOZI.....	46

## POPIS SLIKA

Slika 1. Udio sektora u finalnoj potrošnji u državama EU28 [1] .....	2
Slika 2. Shematski prikaz trigeneracijskog sustava iz ovog rada.....	3
Slika 3. Usporedba PVT kolektora raznih proizvođača .....	5
Slika 4. Shema hibridnog PVT kolektor .....	6
Slika 5. Korišteni profil potrošnje DHW .....	11
Slika 6. Dijagram toka konvencionalnog pristupa vođenja.....	13
Slika 7. Prikaz slojeva PVT kolektora .....	14
Slika 8. Jednodimenzijski model stratificiranog spremnika topline .....	20
Slika 9. Insolacija i vanjska temperatura za ljetni dan .....	21
Slika 10. Temperatura potrošne tople vode i solarnog medija za ljetni dan .....	22
Slika 11. Temperaturni profili zona kućanstva za ljetni dan.....	23
Slika 12. Neto izmjenjena snaga električne energije za ljetni dan .....	24
Slika 13. Insolacija i vanjska temperatura za zimski dan.....	25
Slika 14. Temperatura potrošne tople vode i solarnog medija za zimski dan .....	25
Slika 15. Učin pomoćnog električnog grijača za pripremu potrošne tople vode za zimski dan .....	26
Slika 16. Temperaturni profili zona kućanstva za zimski dan .....	27
Slika 17. Izmjena rada dizalice topline i pomoćnog grijača za zimski dan .....	28
Slika 18. Temperature isparivača i kondenzatora u dizalici topline za zimski dan .....	28
Slika 19. Faktor grijanja ( <i>COP</i> ) dizalice topline za zimski dan.....	29
Slika 20. Temperature u podsustavu pufer spremnika za zimski dan .....	29
Slika 21. Neto izmjenjena snaga električne energije za zimski dan.....	30
Slika 22. Insolacija i vanjska temperatura za dan u prijelaznom razdoblju .....	31
Slika 23. Temperatura potrošne tople vode i solarnog medija za prijelazan dan.....	32
Slika 24. Usporedba učina pomoćnog grijača uz i bez solarnog dogrijavanja.....	32
Slika 25. Temperaturni profili zona kućanstva za prijelazan dan .....	33
Slika 26. Učin kompresora dizalice topline i pomoćnog grijača za prijelazni dan .....	34
Slika 27. Temperatura isparavanja i kondenzacije u dizalici topline za prijelazan dan.....	35
Slika 28. Faktor grijanja ( <i>COP</i> ) dizalice topline za prijelazan dan.....	35
Slika 29. Temperature podsustava pufer spremnika za prijelazan dan .....	36
Slika 30. Neto izmjenjena snaga s mrežom za prijelazan dan .....	37
Slika 31. Cijena električne energije za prijelazan dan.....	38
Slika 32. Temperatura potrošne tople vode i solarnog medija uz prediktivno upravljanje.....	39
Slika 33. Učin pomoćnog grijača uz prediktivno upravljanje .....	39
Slika 34. Temperaturni profili zona kućanstva uz napredno upravljanje.....	40
Slika 35. Učin kompresora dizalice topline i pomoćnog grijača uz prediktivno vođenje.....	41
Slika 36. Temperatura isparavanja i kondenzacije u dizalici topline uz prediktivno vođenje .	41
Slika 37. Temperature u podsustavu pufer spremnika uz prediktivno vođenje .....	42
Slika 38. Neto izmjenjena snaga s mrežom uz prediktivno vođenje.....	43

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Potrošnja energije promatranog kućanstva .....	4
Tablica 2. Geometrijske značajke PVT kolektora [3] .....	7
Tablica 3. Udio dnevne potrošnje tople vode po periodima .....	10

## SAŽETAK

Postojeći trendovi u energetske sektoru vode prema povećanju udjela obnovljivih izvora energije i energetske učinkovitosti u zgradarstvu i industriji. Većina ostvarivih energetskih ušteda u zgradarstvu temelji se na ostvarivanju različitih konstrukcijskih i tehničkih rješenja (izolacija, zasjenjenja, implementacija prirodne ventilacije i dizalice topline, stolarija itd). Ipak, značajan doprinos uštedama daje i optimizacija te upravljanje spomenutih tehničkih rješenja, posebice razvojem naprednih metoda i algoritama upravljanja.

Jedan od naprednih metoda, prediktivni model upravljanja, primjenjen je u ovom radu kako bi se usporedio njegov učinak s konvencionalnim upravljanjem na mikro-trigeneracijski solarni sustav. Promatrani trigeneracijski sustav osigurava grijanje, hlađenje, potrošnu toplu vodu te električnu energiju kućanstvu površine 150 m<sup>2</sup>, koristeći se novom tehnologijom hibridnih PVT kolektora.

Konvencionalni pristup upravljanju temelji svoj rad na postizanju zadanih vrijednosti određenih temperatura u sustavu, dok prediktivni model upravljanja s predikcijskim horizontom od 24h optimizira rad sustava kako bi se maksimizirale novčane uštede. Usporedbom rada metoda upravljanja, pokazuje se kako prediktivna metoda uvelike nadmašuje konvencionalni pristup.

Ključne riječi: PVT, trigeneracija, prediktivno upravljanje



## **SUMMARY**

The latest trends in power management lead to increasing of renewable energy share and energy efficiency in building and industry sectors. Most of the energy savings in building sector are based on implementation of various constructional and technical solutions (insulation, shading, use of natural ventilation and heat pump, joinery, etc.). Optimization and management of technical solutions are of utter importance, especially since advanced algorithms and control methods have developed.

One of the advanced methods is model predictive control which is implemented and its' performance is compared to conventional control method. Micro-solar trigeneration system, which is analyzed, provides heating, cooling and electricity to referent household, using novel PVT technology.

Conventional control method regime changing is based on temperature setpoints, while predictive control optimize system performance based on electricity price using 24h prediction horizon. Result of comparison shows that predictive control provide big financial savings.

Key words: Photovoltaic/thermal, trigeneration, predictive control

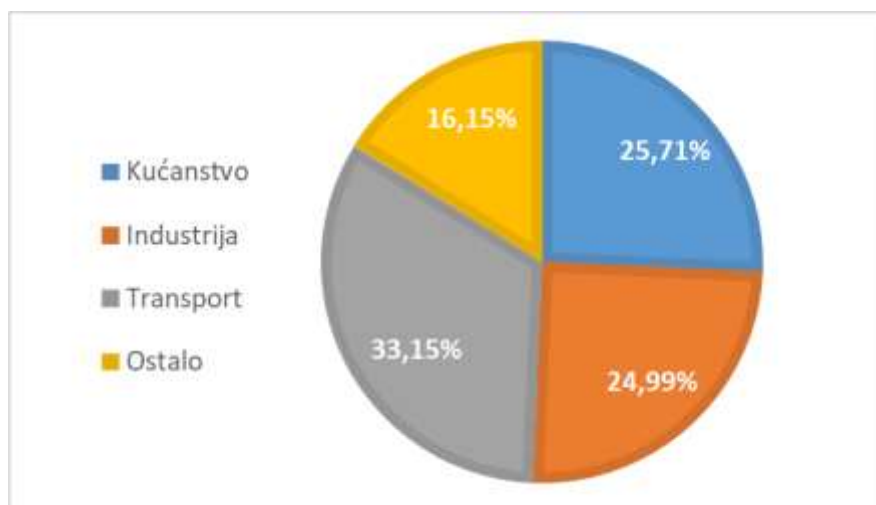
## 1. UVOD

Energetika je kompleksna grana gospodarstva koja se danas suočava s mnogim izazovima: povećanje globalne potrebe za energijom, volatilnost cijene energije, energetska neovisnost većine država te povećana svijest o ekološkim učincima. Države članice Europske Unije su postavile mnoge ambiciozne i obvezujuće energetske ciljeve za svako desetljeće do 2050. godine kako bi riješile navedene probleme, a posebice problem ovisnosti o uvozu naftnih derivata i plina koji dolazi do izražaja prilikom međunarodnih političkih kriza. Time je započet proces energetske tranzicije prema obnovljivim izvorima energije i poticanja energetske učinkovitosti, a Europska Unija se nametnula kao svjetska predvodnica razvoja novih energetske tehnologije i na akademskoj i na gospodarskoj razini.

Posljedično, počeli su se razvijati decentralizirani sustavi proizvodnje energije koji nude brojne nove mogućnosti i pogodnosti za potrošače. Jedan od najatraktivnijih inancija takvih sustava su mikroenergetski sustavi integrirani s kućanstvom pomoću kojih potrošači mogu višak proizvedene energije prodati u mrežu. Time potrošači više nisu pasivni sudionici na tržištu energije, već ih mogućnost proizvodnje energije za vlastite potrebe i prodaje viška električne energije u mrežu čini aktivnim sudionicima – potrošačima (engl. *prosumers*).

Budući da sektor kućanstava zauzima značajan udio u finalnoj potrošnji energije u Europskoj Uniji (**Slika 1**), mnoge direktive su usmjerene prema smanjenju potrošnje energenata u kućanstvima, ali i povećanju udjela obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji kako bi negativan utjecaj na okoliš bio minimiziran. Pritom je važno naglasiti kako su obnovljivi izvori energije intermitentne prirode te se povećanjem njihovog udjela pojavljuju novi zahtjevi za mrežu.

Stoga se, osim projektiranju energetske učinkovite ovojnice zgrada, velika pažnja pridaje optimizaciji vođenja sustava obnovljivih izvora energije. Implementacijom naprednih metoda vođenja i koristeći spremnik energije dolazi do peglanja vršnog opterećenja čime se smanjuje rizik od potencijalnog šoka na mrežu. Nadalje, cilj implementacije napredne metode vođenja je novčana ušteda korisnika naspram korištenja konvencionalnog sustava vođenja, uz uvjet da se održava toplinska ugodnost unutar zadanih granica.

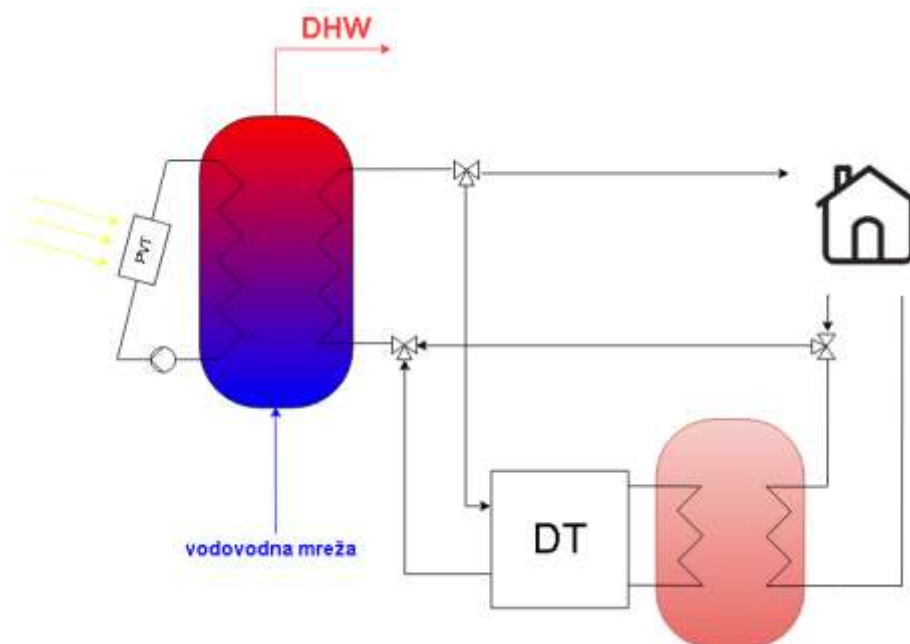


Slika 1. Udio sektora u finalnoj potrošnji u državama EU28 [1]

U ovom diplomskom radu je izrađen i implementiran matematički model te provedena simulacija rada mikrosolarnog trigeneracijskog sustava, s ciljem pokrivanja što većeg udjela potrošnje sustava grijanja, hlađenja i potrošnje električne energije Sunčevom energijom. Pritom se koristi hibridni PVT kolektor (engl. Photovoltaic/Thermal collector), kojim se istovremeno generira električna i toplinska energija na istoj površini što ima za posljedicu postizanje visoke energetske učinkovitost. Kako bi se maksimiziralo korištenje Sunčeve energije, implementirano je prediktivno upravljanje kako bi se istovremeno maksimizirao profit i održala toplinska ugodnost.

## 2. MIKROSOLARNI TRIGENERACIJSKI SUSTAV

Kao referentan znanstveni rad za izradu diplomskog rada koristio bi se jedan od sustava opisan u radovima autora Herrando et al. i Ramos A. et al. [1,3] koji su modelirali četiri različita mala SHC sustava za referentnu obiteljsku kuću površine 100 m<sup>2</sup>. Sustavi su analizirani za 10 različitih gradova u Europi kako bi se rezultati mogli interpretirati ovisno o klimatskim uvjetima. Svi sustavi su koristili hibridne PV/T (eng. *photovoltaic/thermal*) kolektore, a pokazalo se kako sustav dizalice topline voda/voda sparen s dva spremnika osjetne topline polučuje bolje rezultate u odnosu na sustav s absorpcijskim uređajem. Shodno tom zaključku, trigeneracijski sustav opisan u spomenutom radu je modificiran potrebama diplomskog rada te je dan shematski prikaz na *Slici 2*.



**Slika 2. Shematski prikaz trigeneracijskog sustava iz ovog rada**

Promatrani sustav se sastoji od sljedećih komponenti: I) PVT kolektora, II) spremnik potrošne tople vode, III) dizalica topline voda/voda, IV) pomoćnih električnih grijača, V) izmjenjivača topline VI) spremnika osjetne topline (pufer akumulacijskog spremnika). Odnosno, sustav se sastoji od 4 kruga toplinskog medija, što je zorno prikazano shematskim prikazom.

Sunčeva energija se u PVT kolektoru pretvara u toplinsku energiju toplinskog medija te električnu energiju. Toplinskom energijom se zagrijava stratificirani spremnik potrošne tople vode, na čijem se dnu nalazi ulaz vode iz vodoopskrbne mreže, dok se na vrhu nalazi izlaz za potrošnu toplu vodu. Osim pripreme potrošne vode, spremnik ima važnu ulogu u grijanju

kućanstva jer određuje režim grijanja: direktno podno grijanje, grijanje uz pomoć dizalice topline te grijanje pomoćnom električnom grijalicom. U sustavu grijanja je implementirano podno grijanje prostorija, a promjena režima rada grijanja će biti detaljnije opisan u sljedećem potpoglavlju. Električna energija iz fotonaponskog dijela PVT kolektora se koristi za pokrivanje energetskih potreba kućanstava, pogonskog utroška električne energije sustava te izvoz u mrežu kako bi korisnici sustava ostvarili novčanu dobit.

U ljetnom razdoblju se javlja potreba za rashladnom energijom, a za tu svrhu se sustav koristi inverterskim klima uređajima pogonjenima na električnu energiju dobivenu iz PVT kolektora. Spremnik potrošne tople vode dolazi u toplinsku interakciju isključivo s PVT kolektorima, odnosno jedini ponor topline spremnika potrošne tople vode je uslijed konvekcije iz vodoopsrbne mreže.

Referentna kuća je smještena u gradu Zagrebu, s godišnjom potrošnjom energenata prikazanom u **Tablici 1.** Promatrano kućanstvo je dvokatnica, korisne površine 150 m<sup>2</sup>, a podijeljen na četiri toplinske zone. Prema potrošnji energije za grijanje i hlađenje, referentna kuća pripada kategoriji niskoenergetskih kuća, s potrebnom energijom za grijanje manjom od 40kWh/m<sup>2</sup>a, a površina grijanog i hlađenog prostora je 120 m<sup>2</sup>. Podaci za potrošnju energije su procjenjeni simulacijom cjelogodišnjeg grijanja kuće na zadanu temperaturu 21°C u MATLAB/Simulink programskom paketu. Potrošnja električne energije za kućanske uređaje i rasvjetu određena prema smjernicama VDI (njem. *Verein Deutscher Ingenieure*, Društvo njemačkih inženjera) pod pretpostavkom obitavanja peteročlane obitelji.

**Tablica 1. Potrošnja energije promatranog kućanstva**

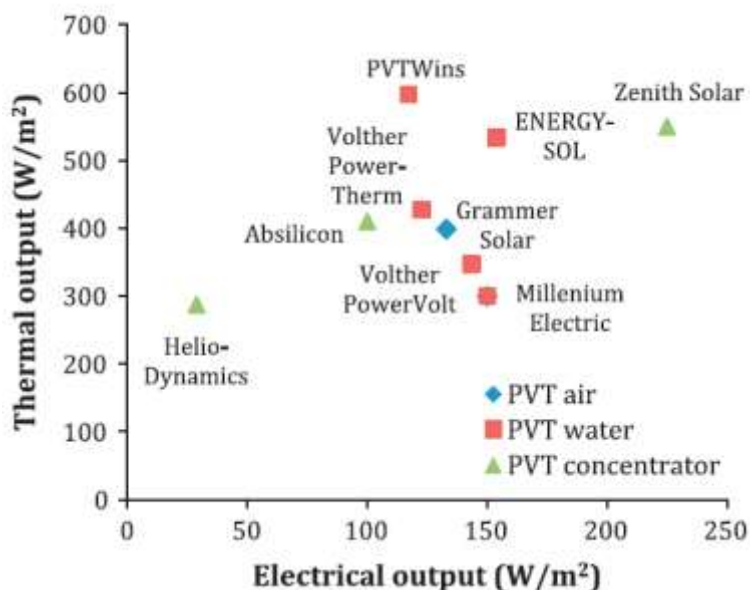
PTV	GRIJANJE		HLADENJE	
	kWh/god	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/god	kWh/m <sup>2</sup> a
300	4724	39,37	354	2,95

## 2.1. PVT kolektor

Unatoč tome što hibridni PVT kolektori nisu u potpunosti zrela tehnologija te tome što je komercijalizacija tehnologije u ranoj fazi, postoji nekoliko poduzeća na tržištu koji nude nekoliko vrsta PVT kolektora. Njihova prednost je istovremena proizvodnja električne i toplinske energije na istoj površini, no investicijski troškovi su trenutno vrlo visoki. Postoje razne varijante izvedbe tehnologije, a najčešće podjele se svode s obzirom na:

- **medij:** plin (zrak), kapljevina (voda, glikolna smjesa)
- **konstrukcija:** ostakljeni, neostakljeni, koncentrirane snage
- **vrsta fotonaponskog članka**

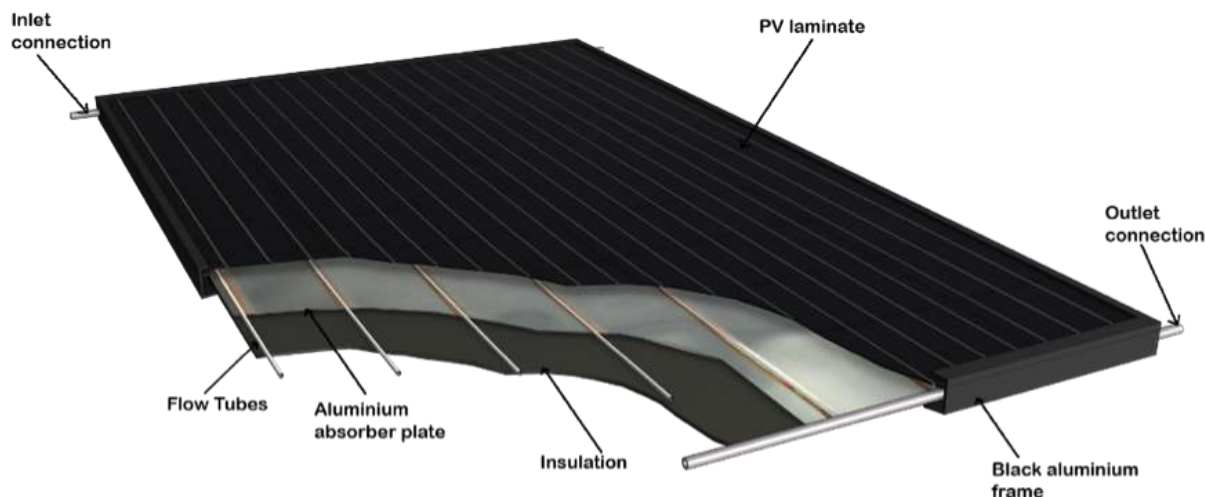
Na *Slici 3.* prikazani su PVT kolektori raznih proizvođača prema toplinskom i električnom učinku. Plavom bojom označeni su zračni PVT, crvenom vodeni PVT, a zelenom PVT kolektori s koncentriranom snagom.



**Slika 3. Usporedba PVT kolektora raznih proizvođača**

Najveći tržišni udio posjeduju neostakljeni PVT kolektori (*Slika 4*), ali njihova primjena je ograničena na nsikotemperaturne sustave zbog visokih toplinskih gubitaka (Ille et al., 2014). Ostakljeni PVT kolektori omogućuju povećanu toplinsku efikasnost pri povišenim temperaturama zahvaljujući smanjenim toplinskim gubicima zbog staklenog pokrova. Primjenom spektralno selektivnog *low-e* premaza, toplinski gubici se dodatno smanjuju uslijed smanjenja gubitaka infracrvenog zračenja, ali nauštrb efikasnosti fotonaponskih članaka (Lämmle et al., 2016).

PVT kolektori s koncentriranom snagom mogu biti raznih izvedba, od niskog do visokog faktora koncentracije, uz ili bez primjene sustava praćenja položaja Sunca. Stoga, svaka tehnologija PVT kolektora je primjenjiva u različitim temperaturnim režimima i različitim sustavima.



Slika 4. Shema hibridnog PVT kolektor

U ovom radu se koristi PVT kolektor s glikol vodom radi sprječavanja smrzavanja fluida unutar kolektora. Većina PVT sustava s kapljevinom koriste monokristalne fotonaponske članke koji se hlade cijevima ili kanalima koji se nalaze sa stražnje strane. Većina proizvođača ovakvih kolektora je razvila svoju tehnologiju modifikacijom postojećih Sunčevih toplinskih kolektora, ugradnjom fotonaponskih članaka na absorbersku površinu. Na taj način se smanjuje toplinski tok prema fluidu, čime se smanjuje toplinska učinkovitost, ali pritom se smanjuje temperatura fotonaponskih članaka i povećava električna učinkovitost. Ovisno o geografskoj lokaciji sustava, bitno je balansirati kompromis između proizvodnje električne i toplinske energije što je moguće postići djelomičnim ostakljenjem kolektora. U slučaju kada je prioritet zagrijavanje vode, primjenjuje se manja ostakljena površina, a za prioritet električne energije vrijedi obratno.

PVT kolektori s kanalima imaju bolju toplinsku učinkovitost na godišnjoj razini od cijevnih PVT kolektora (eng. *sheet and tube PVT*) za 2%, no njihova proizvodnja je znatno skuplja, budući da cijevna izvedba zahtijeva integraciju dvije komercijalno zrelih tehnologija. Nadalje, dvostruko ostakljenje PVT kolektora također donosi poboljšanu toplinsku učinkovitost u odnosu na jednostruko ostakljene, no rijetko se primjenjuju zbog značajnog pada efikasnosti fotonaponskih članaka. Shodno tome, u ovom radu je primjenjen proizvod Volther Powertherm tvrtke Solimpeks, cijevni kolektor s jednostrukim ostakljenjem (*Tablica 2*).

**Tablica 2. Geometrijske značajke PVT kolektora [3]**

Površina PVT kolektora (m <sup>2</sup> )	$A_{PVT}$	1,42
Duljina kolektora (m)	$L$	1,66
Širina kolektora (m)	$H$	0,86
Debljina stakla (mm)	$\delta_g$	4
Debljina fotonaponske ćelije (mm)	$\delta_{PV}$	0,002
Debljina absorbera (mm)	$\delta_{abs}$	0,002
Broj cijevi	$N_c$	14
Vanjski promjer cijevi (mm)	$D_C$	8
Debljina cijevi (mm)	$s$	1
Debljina izolacije (mm)	$\delta_{ins}$	50

Mnogobrojna istraživanja su usporedile toplinski i električni učinak PVT kolektora u odnosu na odvojene sustave fotonaponskih ploča i solarnih toplinskih kolektora. Ponovno, zaključak je da na rezultate usporedbe velik utjecaj ima geografska lokacija sustava, zbog čega se rezultati znatno razlikuju. Dok istraživanje Tripanagnostopoulos et al. pokazuje kako PVT sustavi s kapljevnom utječu pozitivno na efikasnost fotonaponskih članaka, istraživanje, drugim istraživanjem [6] je zaključeno suprotno. Ipak, ukupna učinkovitost PVT sustava je svakako veća od pojedinačnih sustava fonopanskih ploča i solarnih toplinskih kolektora, čak i u slučaju kada je i toplinska i električna učinkovitost niža.

## 2.2. Spremnik topline

Spremnici toplinske energije su predmet brojnih znanstvenih istraživanja i njihova primjena je učestala u solarnim sustavima jer je investicijski trošak još uvijek niži od ostalih tehnologija skladištenja energije, poput baterijskih spremnika. Uloga svakog spremnika toplinske energije je spremanje viška proizvedene toplinske energije kako bi se ista koristila kasnije. Mehanizam skladištenja energije ne uključuje samo zagrijavanje, taljenje i isparavanje, već i ukrućivanje i kondenzaciju. Spremnik topline u sustavu također koristi kako bi se smanjio broj uzastopnih



pokretanja i gašenja (eng. *on-off*) pumpi, te se povećava fleksibilnost sustava tako da sustav dulje vremena zadovoljava toplinske potrebe kućanstva.

Atraktivnost tehnologije proizlazi iz činjenice da postoji širok spektar mogućnosti primjena, a samim time postoji širok spektar prednosti korištenja ove komponente. Spremnici energije sastavni su dio suvremenih sustava u tehnologijama grijanja prostora, grijanja potrošne tople vode, hlađenja i klimatizacije.

Jedna od prednosti korištenja promatrane komponente je povećanje proizvodnje energije. Kao što je prethodno spomenuto, toplinski spremnici pohranjuju višak energije za vrijeme niske potreba kako bi se ista koristila za vrijeme visoke potrebe za energijom, čime se povećava efikasnost proizvodnje toplinske energije. Rezultat prednosti je instalacija jedinice manjeg kapaciteta [7].

Primjenom toplinskih spremnika postiže se bolja regulacija proizvodnje električne energije u kogeneracijskim elektranama. U kogeneracijskim elektranama se učin regulira prema potrebi za toplinskom energijom. Time se, u vrijeme male električne potrošnje, proizvodi neupotrebljiv višak, jer je ovisnost proizvodnje električne energije o proizvodnji toplinske energije linearne karakteristike. Koristeći spremnik topline, proizvodnja električne energije više nema tu krutu ovisnost.

Skladištenje energije automatski implicira pouzdanost sustava [7]. Rast životnog standarda čini taj faktor vrlo bitnim prije razmatranja bilo koje tehnologije.

Budući da Sunčevo zračenje nije konstantno tijekom dana te izostaje tijekom noći, komponenta spremnika toplinske energije je neophodna za svaki sustav koji koristi solarnu energiju. Stoga, spremnik topline predstavlja posebno bitan predmet razmatranja ovog rada.

Spremnike topline prema mehanizmu skladištenja energije dijelimo na tri vrste:

- Spremnici osjetne topline
- Spremnici latentne topline
- Kemijski spremnici topline

U promatranom postrojenju se upotrebljavaju spremnici osjetne topline. Osjetni spremnici rade na principu promjene temperature skladišne tvari, pri čemu se dolazi do porasta unutrašnje toplinske energije, a pritom ne dolazi do promjene agregatnog stanja tvari. Kao

skladišne tvari upotrebljavaju se: voda, zrak, kamenje, pijesak, ulja i ostalo. Količinu pohranjene toplinske energije u određenoj tvari mase  $M$  izražavamo:

$$E = M \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = \rho \cdot V \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

Većim volumenskim kapacitetom ( $\rho c$ ), skladišna tvar ima veću sposobnost skladištenja toplinske energije po volumenu i obrnuto. Budući da je svrha postrojenja grijanje prostora i potrošne tople vode (PTV nadalje), voda se nameće kao logičan izbor radi niske cijene, visoke vrijednosti umnoška  $\rho c$  i visokog koeficijenta prolaza topline.

Postoje određeni zahtjevi koje osjetni spremnici topline moraju ispuniti [7]:

**Postizanje toplinske stratifikacije:** Toplinska stratifikacija je temperaturni gradijent uzduž čitave visine istog. Postizanjem stratifikacije potreban je manji spremnik što uključuje i manje toplinske gubitke. Izbor skladišne tvari ima veliki utjecaj, jer većom toplinskom provodnošću tvari smanjena je stratifikacije i obrnuto. Za postizanje zahtjeva potrebno je laminarno strujanje u spremniku kako bi se izbjegla toplinska interakcija fluida difuzijom.

**Izbjegavanje mrtvog volumena :** Kako bi što veći volumen vode u spremniku sudjelovao u toplinskim interakcijama unutar čitavog sustava, potrebno je ulaz i izlaz vode iz spremnika postaviti na što većoj razdaljini. To je razlog uobičajenog izvođenja toplinskih spremnika tako da hladna voda ulazi na dnu spremnika.

**Zaštita od bakterije Legionella:** Temperatura potrošne tople vode u treba što rjeđe postizati temperaturu ispod 60 °C što predstavlja gornju temperaturnu granicu idealnu za rast populacije bakterije. [7]

### ***2.2.1. Profil potrošnje potrošne tople vode***

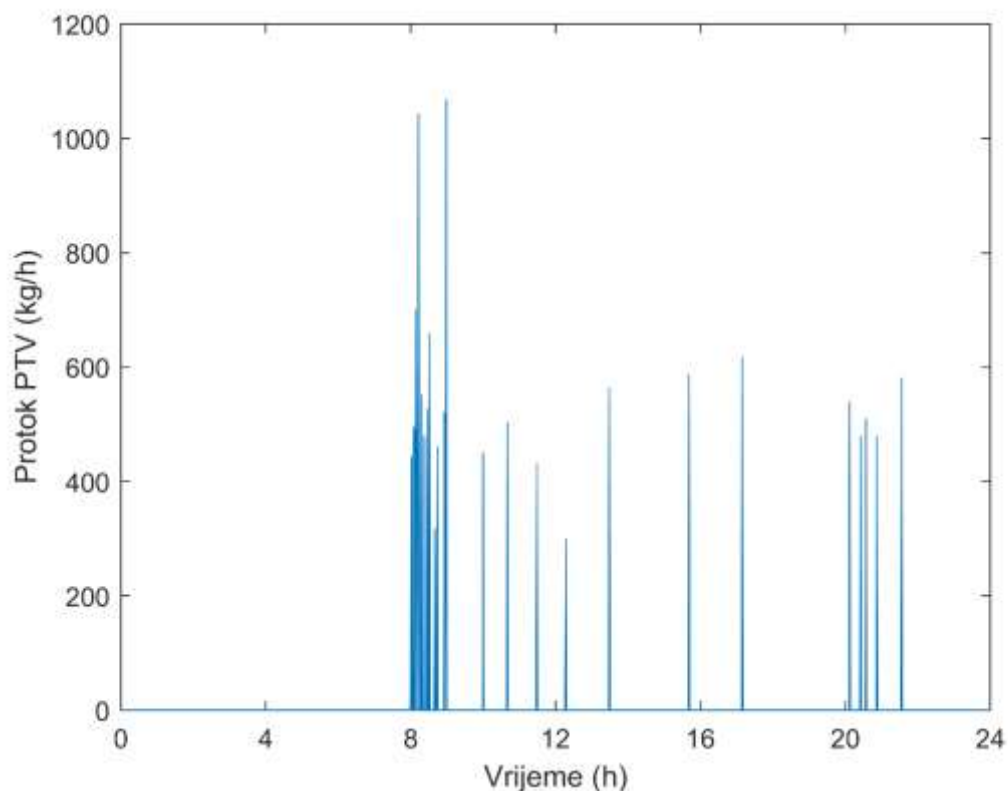
Profil potrošnje potrošne vode je dobiven korištenjem programa *DHWcalc* koji generirane profile sprema u tekstualnu datoteku koja sadrži podatke o protoku potrošne tople vode za svaki vremenski korak. Program statističkim metodama distribuira PTV potrošnju za cijelu

godinu, pri čemu korisnik može odrediti razne parametre: prosječna dnevna potošnja, profil satne potrošnje, trajanje povlačenja potrošne tople vode itd.

Profil potrošnje tople vode je generiran za obiteljsko kućanstvo koje koristi 300 l tople vode dnevno. Vremenski interval potrošnje je jednogminutni, dok je prosječni protok 480 l/h. Pritom je standardna devijacija 120 l/h, a minimalni i maksimalni protoci su 6 l/h, odnosno 1200 l/h. Raspodjela po vremenskim razdobljima unutar dana je prikazana **Tablicom 3**, dok je dobiveni profil na **Slici 5**.

**Tablica 3. Udio dnevne potrošnje tople vode po periodima**

<b>Period dana</b>	<b>Udio dnevne potrošnje tople vode</b>
22:00 – 6:30	2%
6:30 – 7:30	50%
7:30 – 12:00	6%
12:00 – 13:00	16%
13:00 – 18:00	6%
18:00 – 22:00	20%



Slika 5. Korišteni profil potrošnje DHW

### 2.3. Vođenje trigeneracijskog sustava

Trigeneracijski sustav ima zadatak istovremeno održati toplinsku ugodnost unutar prostorija uz pomoć Sunčeve energije kada je to moguće. Također, cilj je i proizvodnja električne energije iz fotonaponskih članaka sadržanih u PVT kolektorima uz što veće pokrivanje dnevnih potreba kućanstva. Kako bi se postigle navedene zadaće, u radu će se koristiti i usporediti dva različita pristupa vođenja sustava: konvencionalni pristup i predikcijski pristup. Za ljetno i zimsko razdoblje se neće primjenjivati predikcijski pristup budući da se ne dolazi do promjene u režima rada sustava grijanja ili hlađenja. Stoga, u radu će se analizirati rezultat rada sustava u ljetnom i zimskom razdoblju dobivenih konvencionalnim vođenjem, usporedba dvaju različitih pristupa će se analizirati za prijelazna razdoblja (proljeće i jesen).

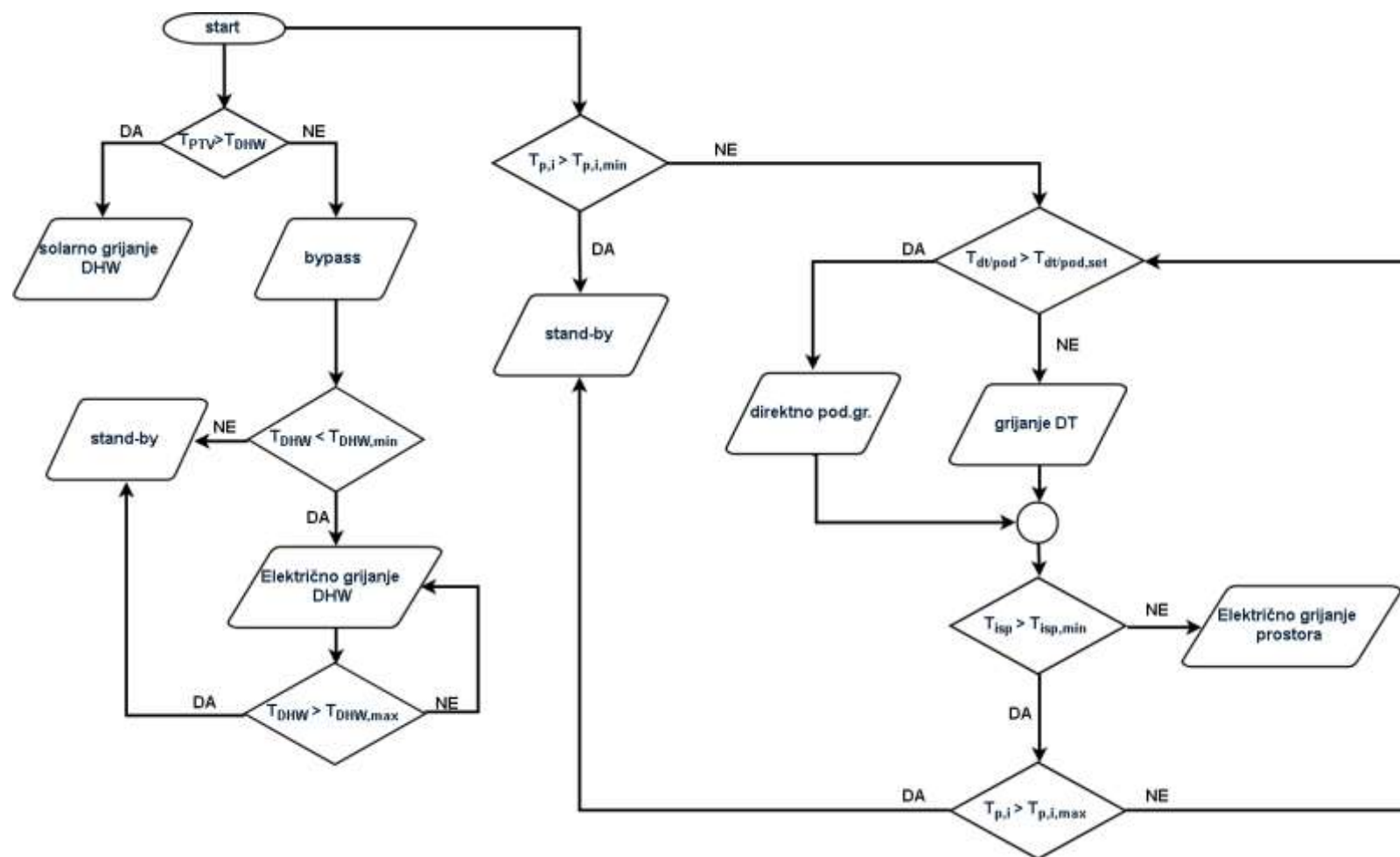
Trigeneracijski sustav se može podijeliti na dva podsustava koji se istovremeno vode: sustav pripreme potrošne tople vode te sustav grijanja. U oba podsustava spremnik potrošne tople vode je centralni element, s obzirom da se ogrjevni medij za grijanje posredno ili neposredno zagrijava toplinskom interakcijom sa spremnika. Vrsta toplinske interakcije, odnosno režim grijanja, će se mijenjati ovisno o energetskej razini stratificiranog spremnika osjetne topline.

Konvencionalni pristup vođenja se temelji na promjeni režima rada sustava postizanjem određenih zadanih vrijednosti (eng. *setpoints*). Zadane vrijednosti temperatura promjene režima su različiti s obzirom o kojem razdoblju se radi. Primjerice, polazna temperatura za podno grijanje u proljetnom i zimskom razdoblju razlikuju, pa se shodno tome i ostale temperature promjene režima, no logika promjene režima se ne razlikuje.

Sustav grijanja se uključuje u slučaju pada temperature zone  $i$  ispod zadane minimalne temperature  $T_{p,i,min} = 20^{\circ}\text{C}$ . Ovisno o temperaturi na koju se toplinski medij drugog kruga zagrije, pokreće se režim rada direktnog podnog grijanja ( $T_{dt/pod} > T_{pol,min}$ ), odnosno režim dizalice topline ( $T_{dt/pod} > T_{pol,min}$ ). Primjena režima dizalice topline dovodi do hlađenja toplinskog medija u isparivaču. Preniska temperatura na izlazu iz isparivača je pokazatelj kako dizalica topline nije u mogućnosti dobiti dovoljno toplinske energije prostorijama te se posljedično isključuje, a uključuje se pomoćni grijač u pufer akumulacijskom spremniku. Čitav sustav se isključuje i ulazi u stanje pripravnosti ako temperatura svih prostorija dosegne maksimalnu temperaturu  $T_{p,i,max} = 23^{\circ}\text{C}$ .

Toplinski medij PVT kolektora ulazi u izmjenu topline sa spremnikom tople vode samo u slučaju većeg energetske stanja u odnosu na vodu u spremniku. U protivnom, toplinski medij se vraća u PVT kolektor obilaznim vodom (eng. *bypass*) kako ne bi nepotrebno hladio potrošnu toplu vodu. U slučaju da toplinska energija Sunca nije dostatna za postizanje minimalne temperature ( $60^{\circ}\text{C}$ ), pri vrhu spremnika se uključuje električna grijalica pri temperaturi  $58^{\circ}\text{C}$ , a isključuje pri  $65^{\circ}\text{C}$ .

Dijagram toka opisanog konvencionalnog pristupa vođenja sustava grijanja i potrošnje tople vode prikazan je na **Slika 6**.

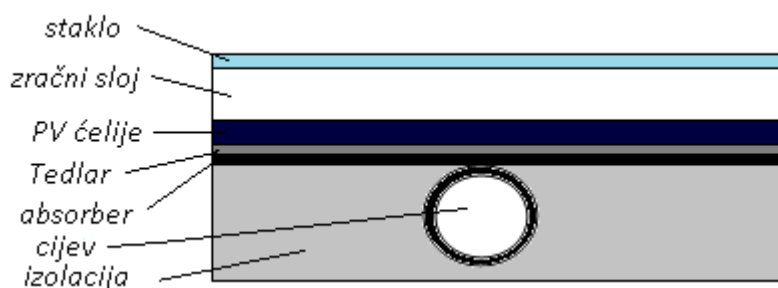


Slika 6. Dijagram toka konvencionalnog pristupa vođenja

### 3. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA

#### 3.1. Matematički model hibridnog PVT kolektora

Kao referentni PVT kolektor za matematičko modeliranje je odabran proizvod Powertherm tvrtke Solimpeks, a čiji podaci su dostupni sa testnog ispitivanja [3] te u znanstvenom radu [4]. Radi se o jednostruko ostakljenom PVT kolektoru, a koji se sastoji od nekoliko slojeva čiju je dinamiku potrebno opisati: staklo, fotonaponski članci, absorber, cijevi te fluid. Između fotonaponskih članaka i absorbera postoji nekoliko slojeva, a čija se dinamika ne promatra jer nije relevantna: Tedlar ploča te adhesivni materijal.



Slika 7. Prikaz slojeva PVT kolektora

Prilikom praćenja dinamike temperature svakog od sloja vrijede sljedeće pretpostavke:

1. Toplinska svojstva materijala i fluida su konstantna, neovisna o temperaturi na kojoj se nalaze
2. Uniformnost temperature po čitavom sloju
3. Optička svojstva materijala su konstantna
4. Rubovi kolektora su dobro izolirana, stoga su toplinski gubici na rubovima zanemarivi
5. Protok vode je ravnomjerno raspoređen po cijevima te toplinski gubici na ulazu i izlazu kolektora se zanemaruju
6. Utjecaj trenja na temperaturu vode pri strujanju kroz cijevi je zanemariv
7. Dozračenje Sunca, brzina vjetra i temperatura okoliša su uniformne po cijelom kolektoru
8. Zanemaruje se postojanje čestica prašine i djelomičnih zasjenjenja kolektora
9. Električni otpori su zanemareni pri računanju proizvodnje električne energije

## Energetska bilanca stakla

Energetska bilanca stakla se zapisuje na sljedeći način:

$$M_{st} c_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = \dot{Q}_{konv,st,ok} + \dot{Q}_{rad,st,ok} + \dot{Q}_{konv,st,pv} + \dot{Q}_{rad,st,pv} \quad (1)$$

Gdje je  $\dot{Q}_{konv, st, ok}$  toplinska interakcija stakla i okoliša putem konvektivnog prijenosa i izražava se:

$$\dot{Q}_{konv,st,ok} = \alpha_{konv,st,ok} \cdot A_{PVT} \cdot (T_{st} - T_{amb}) \quad (2)$$

Pri čemu koeficijent prijelaza topline  $\alpha_{konv,st,ok}$  obuhvaća i koeficijent prijelaza topline izazvanog slobodnom konvekcijom  $\alpha_{free}$  i koeficijent prijelaza topline prisilnom konvekcijom uzrokovanu strujanjem vjetra  $\alpha_w$ :

$$\alpha_{konv,st,ok} = \sqrt[3]{\alpha_w^3 + \alpha_{free}^3} \quad (3)$$

$$\alpha_w = 2v_w + 3.8 \quad (4)$$

Izraz za koeficijent prijelaza topline vezan uz slobodnu konvekciju direktno ovisi o bezdimenzijskoj značajki Rayleighovom broju  $Ra = (g \cos(\pi/2 - \gamma) \beta \Delta T L^3 \rho^2 c_{st}) / \lambda_{st} \mu$ . Vrijedi:

$$\alpha_w = \begin{cases} \frac{\lambda_{zrak}}{L} \left( 0.68 + \frac{0.67 Ra^{0.25}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} \right), Ra < 10^9 \\ \frac{\lambda_{zrak}}{L} Nu^{0.25}, Ra > 10^9 \end{cases} \quad (5)$$

Prijenos topline radijacijom između stakla i okoliša  $\dot{Q}_{rad,st,ok}$  se sastoji od dva člana. Prvi član desne strane jednadžbe (6) označava radijacijske gubitke prema okolini, a proračunava pomoću veličine temperature neba  $T_{nebo}$  koja ovisi o prisutnosti naoblake, temperaturi okoliša, temperaturi rosišta i temperaturi suhog termometra. Različiti izrazi su prikazani jednadžbama



(7-9), a zbog jednostavnosti, s obzirom da je vrijednost koeficijenta emisije stakla niska ( $\varepsilon_{st} = 0.05$ ) te je relativno malen utjecaj na krajnje rezultate, uzima se pretpostavka da vrijedi jednačba (9). Drugi član desne strane jednačbe (6) predstavlja Sunčevo dozračenje koje je staklo absorbiralo. Umnožak  $\bar{\tau}\bar{\alpha}_g$  označava udio absorbiranog dozračenog Sunčevog dozračenja, a sadrži i udio refleksije dozračenja od fotonaponskog članka, taj umnožak se može raspisati jednačbama (10-12):

$$\dot{Q}_{rad,st,ok} = -\varepsilon_{st} \cdot \sigma \cdot A_{PVT} \cdot (T_{st}^4 - T_{amb}^4) + \bar{\tau}\bar{\alpha}_g G A_{PVT} \quad (6)$$

$$T_{nebo} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad (7)$$

$$T_{nebo} = T_{amb} \left[ 0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos\left(\frac{\pi t}{12}\right) \right]^{0.25} \quad (8)$$

$$T_{nebo} = T_{amb} \quad (9)$$

$$R_g = r_g + \frac{r_{PV}\tau_g^2}{1 - r_{PV}r_g}; \quad (10)$$

$$\bar{\tau}\bar{\alpha}_{PV} = \frac{(1 - r_{PV})\tau_g}{1 - r_{PV}r_g}; \quad (11)$$

$$\bar{\tau}\bar{\alpha}_g = 1 - R_g - \bar{\tau}\bar{\alpha}_{PV} = 1 - r_g - \tau_g \frac{r_{PV}\tau_g + 1 - r_{PV}}{1 - r_{PV}r_g} \quad (12)$$

Izrazi za toplinske tokove konvekcijom (13) i radijacijom (14) između stakla i fotonaponskih članaka su:

$$\dot{Q}_{konv,st,pv} = \frac{A_{PVT}}{R_{gap}} \cdot (T_{pv} - T_{st}) \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{rad,st,pv} = A_{PVT} \cdot \sigma \left( \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{st}} + \frac{1}{\varepsilon_{PV}} - 1} \right) \cdot (T_{pv}^4 - T_{st}^4) \quad (14)$$

Veličina  $R_{gap}$  u jednačbi (15) označava toplinski otpor i uključuje tanke slojeve iznad fotonaponskih članaka (Tedlar i staklo) te otpor sloja zraka:

$$R_{gap} = \frac{\delta_{EVA}}{\lambda_{EVA}} + \frac{\delta_{st}}{\lambda_{st}} + \frac{\delta_{PV}}{2\lambda_{PV}} + \frac{\delta_{st}}{2\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_{gap}} \quad (15)$$

Pri čemu se koeficijent prijelaza topline u zatvorenim prostorima  $\alpha_{gap}$  se izražava kao:

$$\alpha_{\text{gap}} = \frac{\lambda_{\text{zrak}}}{\delta_{\text{gap}}} \left[ 1 + 1.44 \left( 1 - \frac{1708}{Ra \cos \gamma} \right)^* \left( 1 - \frac{1708(\sin 1.8\gamma)^{1.6}}{Ra \cos \gamma} \right) + \left( \left( \frac{Ra \cos \gamma}{5830} \right)^{0.33} \right)^* \right], \quad (16)$$

gdje zagrade označene znakom '\*' postaju jednake nuli u slučaju da im je vrijednost negativna. Odnosno, izraz za koeficijent  $\alpha_{\text{gap}}$  u navedenom graničnom slučaju postaje:

$$\alpha_{\text{gap}} = \frac{\lambda_{\text{zrak}}}{\delta_{\text{gap}}} \quad (17)$$

### Energetska bilanca fotonaponskih članaka

Bilanca energije za sloj fotonaponskih članaka se zapisuje na sljedeći način:

$$M_{\text{PV}} c_{\text{PV}} \frac{dT_{\text{PV}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{rad,pv,ok}} - \dot{Q}_{\text{konv,st,pv}} - \dot{Q}_{\text{rad,st,pv}} - \dot{Q}_{\text{pv,ab}} - E \quad (18)$$

Izraz za prvi član energetske bilance  $\dot{Q}_{\text{rad,pv,ok}}$ , koji se u slučaju fotonaponskih članaka sastoji jedino od člana absorpcije Sunčevog dozračenja, prikazan je jednadžbom (19):

$$\dot{Q}_{\text{rad,pv,ok}} = \bar{\tau} \alpha_{\text{PV}} G A_{\text{PVT}} \quad (19)$$

Izraz za  $\bar{\tau} \alpha_{\text{pv}}$  je dan jednadžbom (11). Također, izrazi za  $\dot{Q}_{\text{konv,st,pv}}$  i  $\dot{Q}_{\text{rad,st,pv}}$  su prikazani jednadžbama (13) i (14).

Prolaz topline između fotonaponskih članaka i absorbera se odvija i kroz slojeve Tedlara, EVA i adhezivnog materijala. Uzimajući to u obzir, član  $\dot{Q}_{\text{pv,ab}}$  se može opisati jednadžbama (20) i (21):

$$\dot{Q}_{\text{pv,ab}} = A_{\text{PVT}} \frac{1}{R_{\text{cd}}} (T_{\text{PV}} - T_{\text{ab}}) \quad (20)$$

$$R_{\text{cd}} = \frac{\delta_{\text{EVA}}}{k_{\text{EVA}}} + \frac{\delta_{\text{TED}}}{k_{\text{TED}}} + \frac{\delta_{\text{gl}}}{k_{\text{gl}}} \quad (21)$$

Dio energije koje fotonaponski članci absorbiraju se transformira u električnu energiju:

$$E = G A_{\text{PVT}} \eta_{\text{T}} \quad (22)$$

Gdje je  $\eta_{\text{T}}$  efikasnost konverzije Sunčevog dozračenja u električnu energiju, a smanjuje se linearno s povećanjem temperature fotonaponskih članaka:

$$\eta_{\text{T}} = \eta_{\text{ref}} [1 - \beta_{\text{PV}} (T_{\text{PV}} - T_{\text{ref}})], \quad (23)$$

**Energetska bilanca absorbera**

Promjena energetske stanja absorbera ovisi o njegovoj toplinskoj interakciji s fotonaponskim člancima i cijevima putem kondukcije te toplinskim gubicima prema okolišu:

$$M_{ab}c_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = \dot{Q}_{pv,ab} - 14\dot{Q}_c - \dot{Q}_{loss} \quad (24)$$

Pritom, toplinska interakcija sa svakom pojedinom cijevi se može opisati izrazom (25):

$$\dot{Q}_c = D_c \pi L \frac{k_b}{\delta_b} (T_{ab} - T_c) \quad (25)$$

Toplinski gubici prema okolišu su:

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{A_{PVT}}{R_{loss}} (T_{ab} - T_{amb}), \quad (26)$$

Pri čemu se toplinski otpor gubitaka prema okolišu  $R_{loss}$  uzima u obzir prolaz topline kroz izolaciju te slobodnu konvekciju sa stražnje strane kolektora:

$$R_{loss} = \frac{\delta_i}{k_i} + \frac{1}{h_{free}} \quad (27)$$

**Energetska bilanca cijevi**

Temperatura cijevi se računa iz izraza:

$$M_c c_c \frac{dT_c}{dt} = \dot{Q}_c - \dot{Q}_f - \dot{Q}_{loss,c} \quad (28)$$

Toplinski tok predan fluidu se zapisuje:

$$\dot{Q}_f = D_c \pi L h_f (T_c - T_f), \quad (29)$$

Budući da je strujanje u cijevima uvijek laminarno u PVT kolektorima, koeficijent prijelaza topline konvekcijom između cijevi i fluida ne ovisi o protoku (30). Ipak, ukoliko nema protoka u cijevima, vrijedi izraz prikazan jednadžbom (31):

$$h_f = 4.36 \frac{k_f}{D_c}, \quad (30)$$

$$h_f = 2 \frac{k_f}{D_c} \quad (31)$$

Toplinski gubitak prema okolini zapisuje:

$$\dot{Q}_{\text{loss,c}} = \frac{\pi D_c}{R_{\text{loss}}} (T_c - T_f) \quad (32)$$

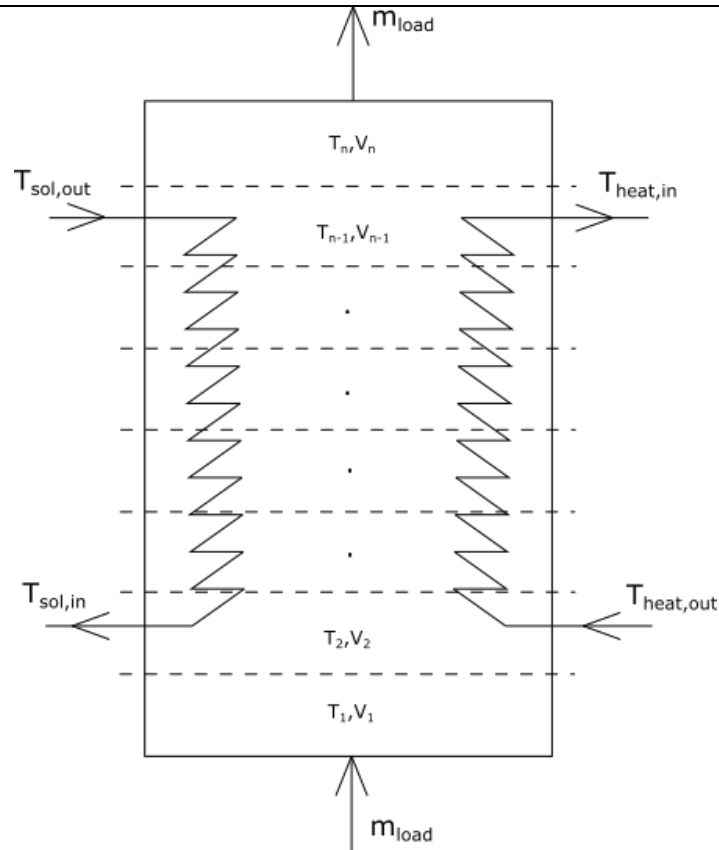
### **Energetska bilanca fluida**

Naposljetku, bilanca energije za fluid se sastoji od toplinskog dobitka od cijevi (jednadžba 33) te od

$$M_f c_f \frac{dT_{f,\text{out}}}{dt} = \dot{Q}_f + m_f c_f (T_{f,\text{in}} - T_{f,\text{out}}) \quad (33)$$

### **3.2. Stratificirani spremnik topline**

U literaturi [1,3,4] se najčešće susreće jednodimenzijski model spremnika topline, pri čemu je spremnik topline fragmentiran u nekoliko slojeva te vrijedi pretpostavka o uniformnoj temperaturi u termalnim svojstvima po volumenu sloja spremnika topline, a svaki sloj predstavlja čvor. U radu je spremnik potrošne tople vode podijeljen na šest segmenata. Model je prikazan ilustracijom na Slika 3.



**Slika 8. Jednodimenzijski model stratificiranog spremnika topline**

Energetska bilanca svakog čvora spremnika je prikazana sljedećom diferencijalnom jednačbom (34):

$$\begin{aligned}
 M_{t,i} c_w \frac{dT_i}{dt} = & m_{load} c_w (T_{i-1} - T_i) + \alpha_1 m_{load} c_w (T_{w,ul} - T_i) \\
 & + k_{ex,sol,i} A_{ex,sol,i} (T_{ex,sol,i} - T_i) + k_{ex,h,i} A_{ex,h,i} (T_{ex,h,i} - T_i) \\
 & + \frac{k_{cond} A_c (T_{i-1} - T_i)}{\Delta x} + \frac{k_{cond} A_c (T_{i+1} - T_i)}{\Delta x} - Q_{loss}
 \end{aligned} \quad (34)$$

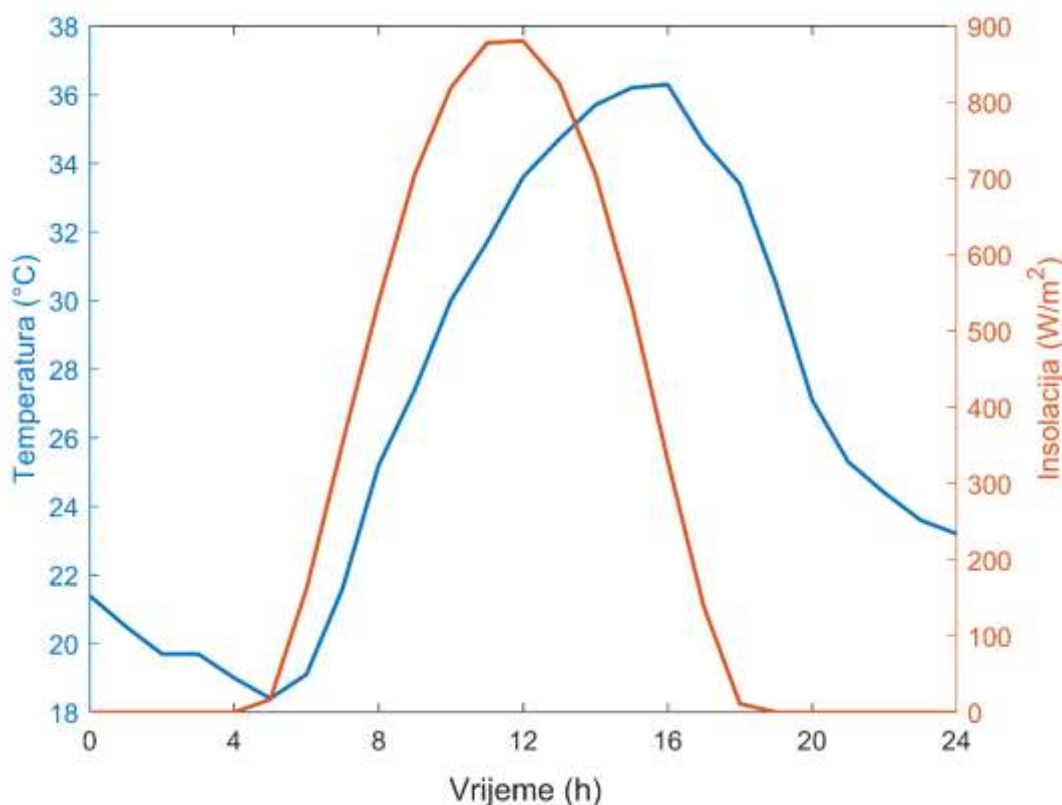
Pri čemu su prva dva izraza izmjena topline uslijed strujanja vode kroz spremnik, a ostali izrazi se odnose na izmjenu topline između vode u spremniku i medija u izmjenjivačima topline, izmjena topline kondukcijom između slojeva te gubici prema okolišu ( $Q_{loss}$ ).

## 4. REZULTATI SIMULACIJE

Simulacije su izvedene u programskom paketu MATLAB/Simulink, a provedena je za četiri tipična dana: ljetni dan, zimski dan, prijelazni sunčani dan i prijelazni oblačni dan. Za potonja dva tipična dana je dana usporedba između konvencionalnog vođenja i prediktivnog vođenja sustava. Ljetni i zimski dan predstavljaju ekstremne slučajeve koji su potrebni kako bi se procijenilo može li sustav doprinjeti grijanju i pripremi potrošne tople vode za razdoblje zime te koliko potencijalno viška električne energije može izvoziti u mrežu u razdoblju ljeta.

### 4.1. Ljetno razdoblje

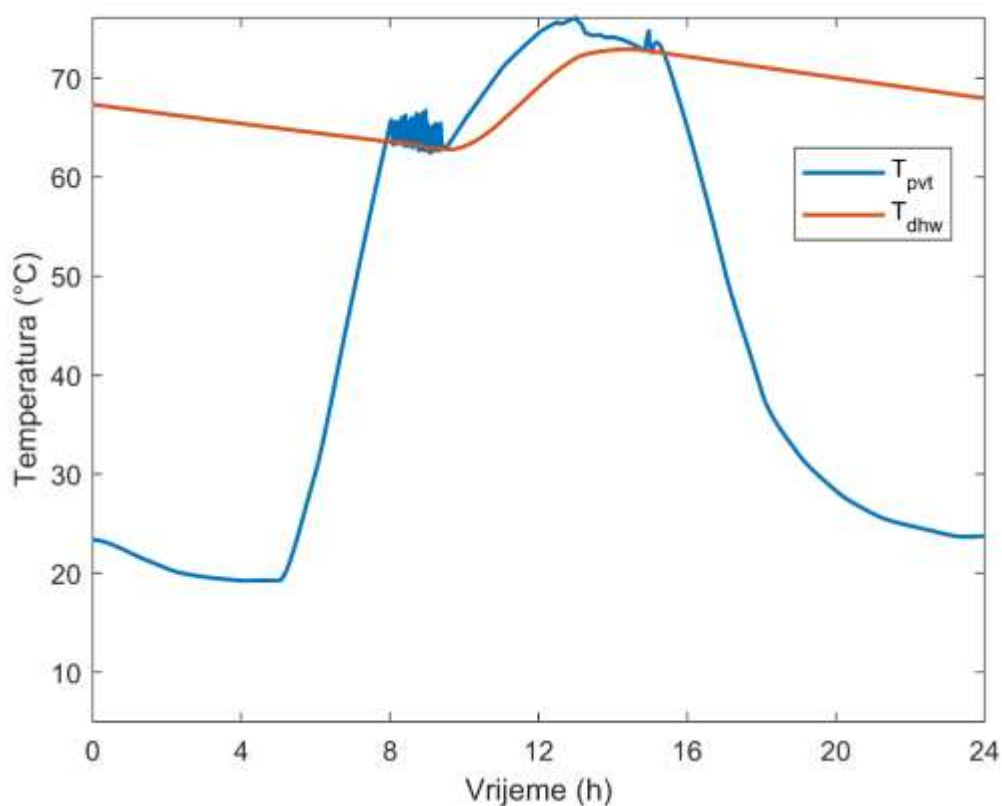
Za ljetni dan maksimalna temperatura zraka od  $36^{\circ}\text{C}$  se postiže u 16 h, dok u jutarnjim i večernim satima temperatura zraka može pasti sve do  $18^{\circ}\text{C}$ . Sunčeva insolacija je najintenzivnija u razdoblju od 11 do 12h, a Sunčevo dozračenje traje od 5h do 19h, kao što je prikazano na Slici xy.



Slika 9. Insolacija i vanjska temperatura za ljetni dan

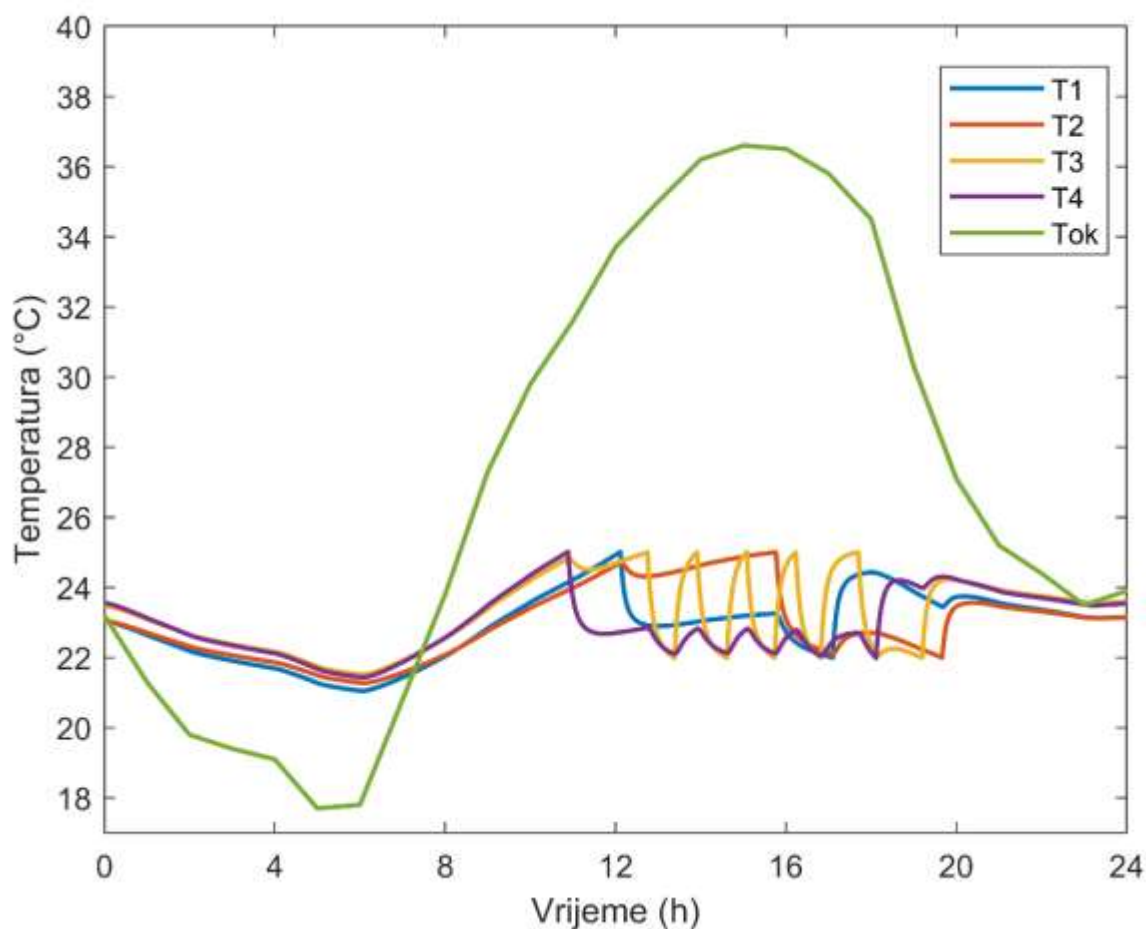
Potrošna topla voda zagrijana od prethodnog dana se postupno hladi zbog gubitaka prema okolini. Medij u kolektoru PVT absorpcijom Sunčevog dozračenja postiže veću temperaturnu vrijednost od vrijednosti temperature potrošne tople vode u vremenskom periodu od 3 sata i

45 minuta. Potom dolazi do naizmjeničnog otvaranja i zatvaranja obilaznog voda jer se medij iz kolektora nedovoljno zagrijava u PVT kolektoru nakon hlađenja u spremniku. Otvaranjem obilaznog voda, temperatura toplinskog medija solarnog kruga ponovno naglo raste, što uzrokuje otvaranje netom zatvorenog ventila. Temperatura potrošne tople vode se ne spušta ispod zadane temperature za uključenje pomoćnog električnog grijača. Odnosno, zaključak je kako za tipičan dan ljeta toplinska energija potrebna za pripremu potrošne tople vode u potpunosti pokriva Sunčevom energijom. Prikaz temperaturnih profila toplinskog medija solarnog kruga i temperature potrošne tople vode je dan *Slikom 10*.



**Slika 10. Temperatura potrošne tople vode i solarnog medija za ljetni dan**

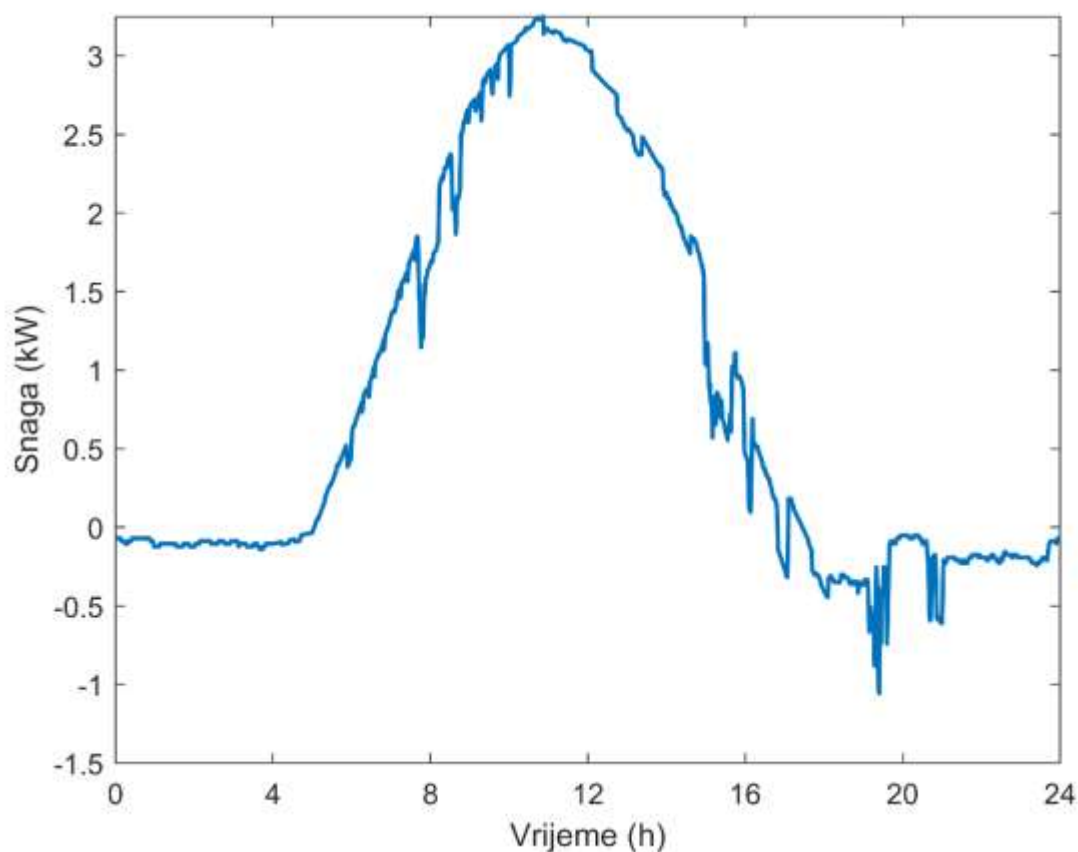
Temperatura unutarnjeg prostora se održava inverter klima uređajem, čiji je pogon određen temperaturama zona kućanstva. Naime, u slučaju da je temperatura zone veća od 25°C, uz preduvjet da je okolišna temperatura veća od 26°C, inverter klima uređaji počinju raditi sve dok se ista temperatura ne spusti ispod 22°C. Dinamički odzivi temperatura zona te usporedba s okolišnom temperaturom zraka je prikazana *Slikom 11*.



**Slika 11. Temperaturni profili zona kućanstva za ljetni dan**

Potrošnja električne energije ljeti je osjetljivo niža u odnosu na zimsko razdoblje, pa je gotovo cijeli dan neto snaga, odnosno razlika snaga fotonaponskih članaka i snaga potrošnje kućanskih aparata, rasvjete i inverter uređaja, pozitivna. Neto snaga je negativna isključivo u ranojutarnjim i večernjim satima kada nema Sunčevog dozačenja. Ipak, radi se o niskim vrijednostima u odnosu na vršne vrijednosti snage PVT kolektora. Na *Slici 12* je prikazan profil neto snage za ljetni dan.

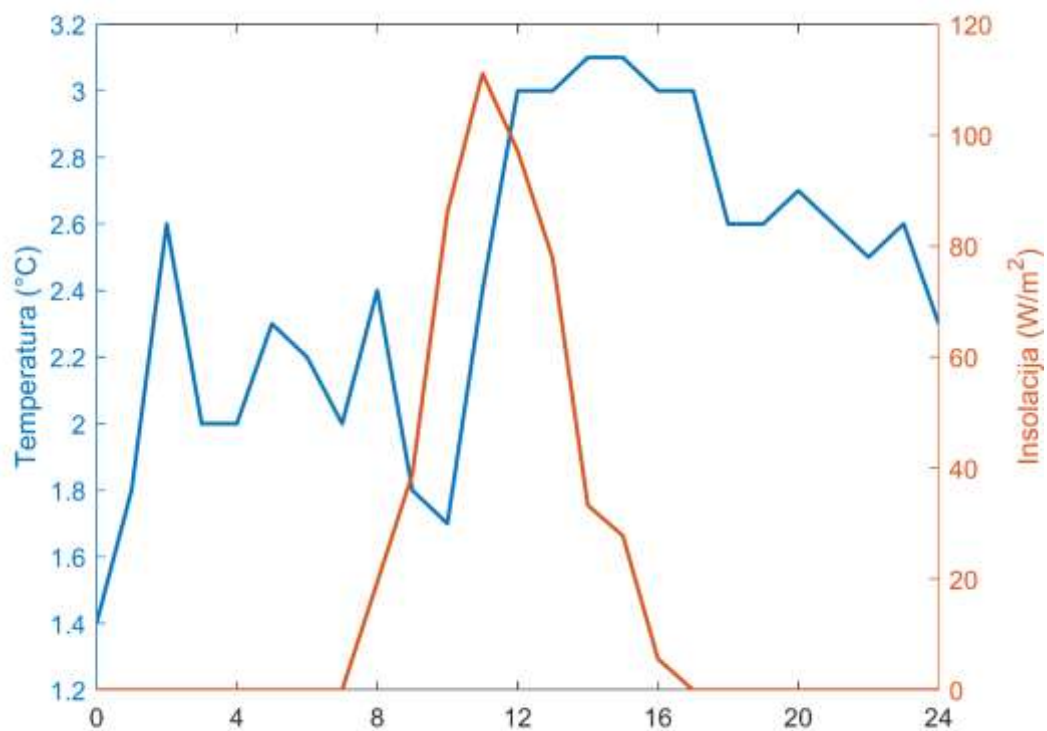




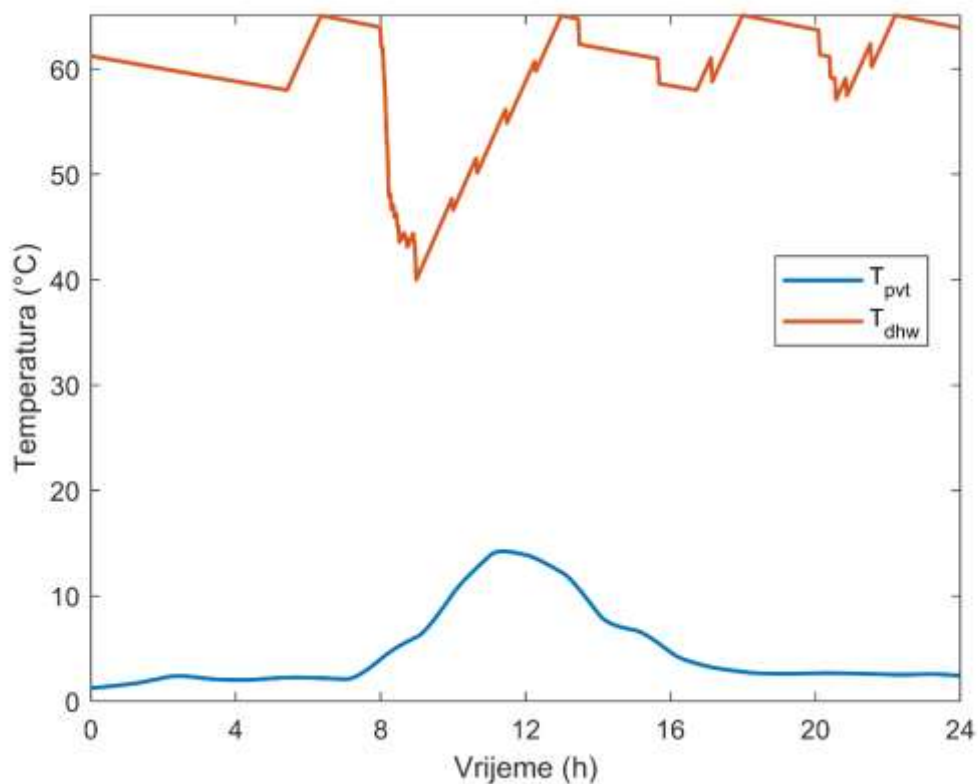
Slika 12. Neto izmjenjena snaga električne energije za ljetni dan

#### 4.2. Zimsko razdoblje

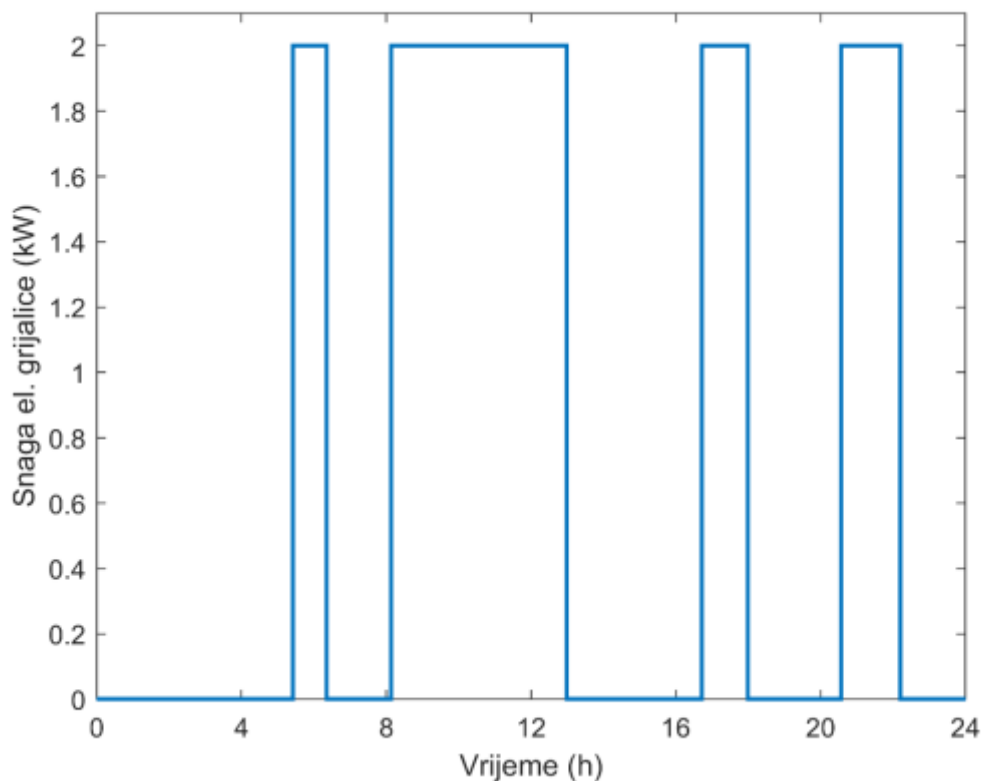
Temperatura okolišnog zraka za tipični zimski dan dostiže maksimum u periodu 14-15h, dok je Sunčevo dozračenje ponovno najintenzivnije u 11h (*Slika 13*). Niska okolišna temperatura i nizak intenzitet Sunčevog dozračenja rezultira slabim zagrijavanje toplinskog medija solarnog kruga (*Slika 14*). Stoga priprema potrošne tople vode, suprotno od ljetnog razdoblja, u potpunosti ovisi o učinku pomoćnog električnog grijača, prikazan *Slikom 15*.



Slika 13. Insolacija i vanjska temperatura za zimski dan

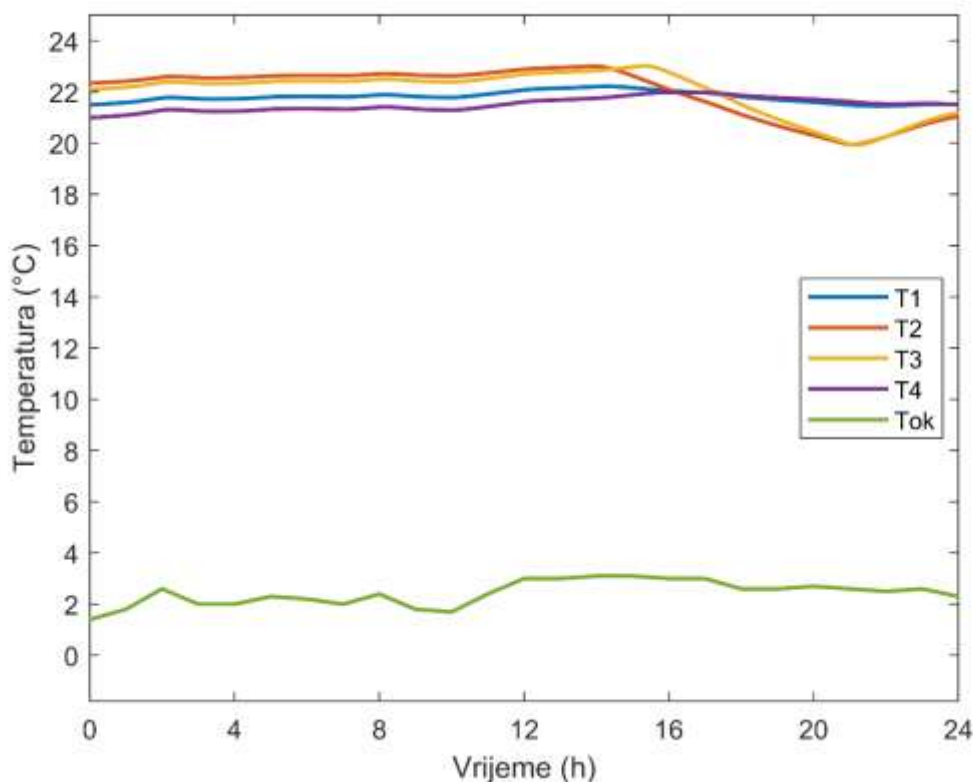


Slika 14. Temperatura potrošne tople vode i solarnog medija za zimski dan



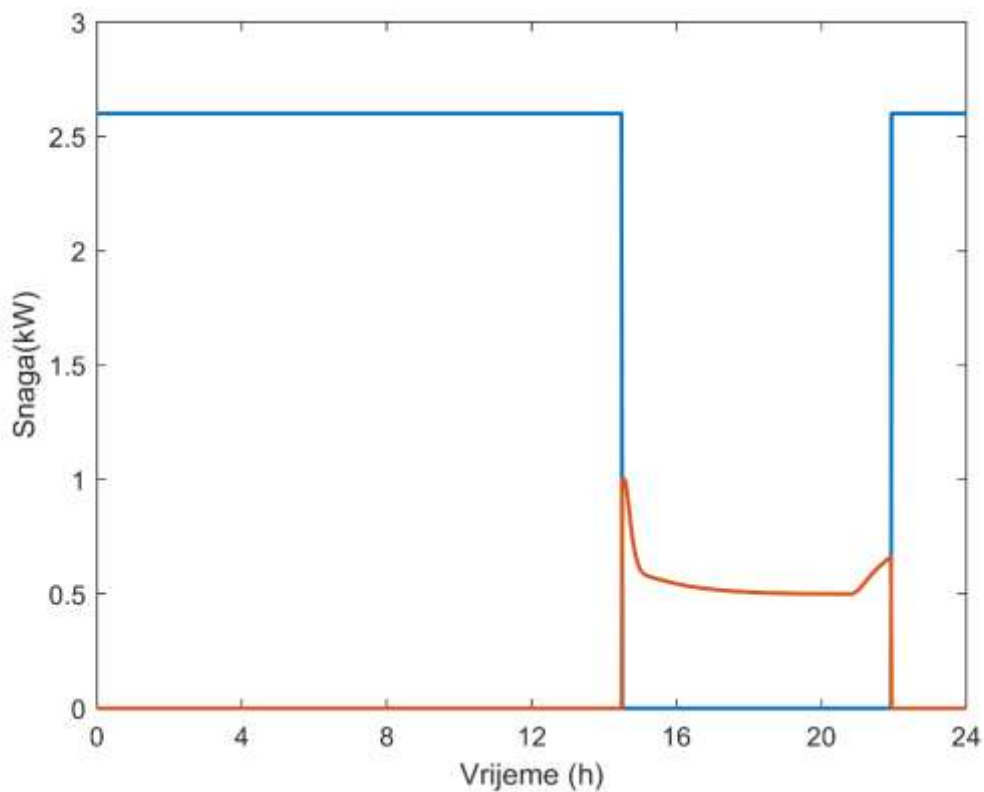
**Slika 15.** Učin pomoćnog električnog grijača za pripremu potrošne tople vode za zimski dan

Profili temperatura zona kućanstva pokazuju kako sustav uspješno održava temperaturu prostora u poželjnim granicama između 20 i 23°C. Sustav se većim dijelom zagrijava pomoću pomoćnog električnog grijača. Nakon što zone 2 i 3 dostignu maksimalne dopuštene temperature oko 15h, podno grijanje se isključuje u tim zonama, dok je još aktivno u preostale dvije zone. Zbog toga dolazi do pada temperatura zone 2 i zone 3, što utječe i na zone 1 i 4 čiji temperaturni profili stagniraju. Zona 1 i zona 3 postižu minimalne dopuštene vrijednosti u 21h, čime se podno grijanje u navedenim zonama ponovno aktivira. (*Slika 16*).

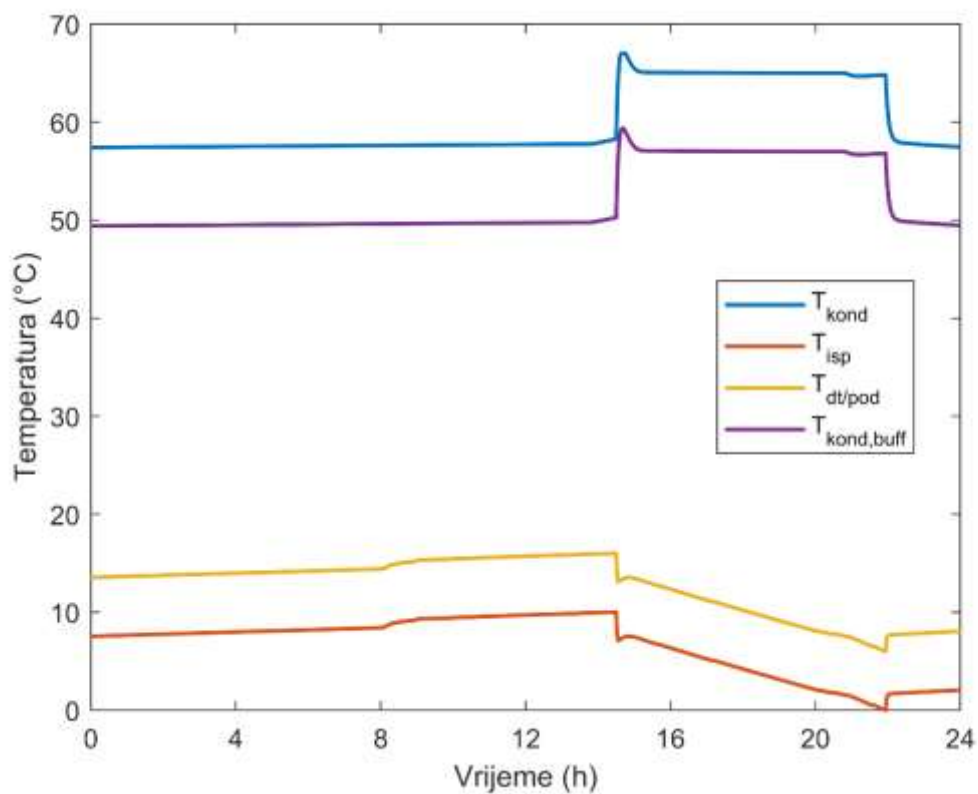


Slika 16. Temperaturni profili zona kućanstva za zimski dan

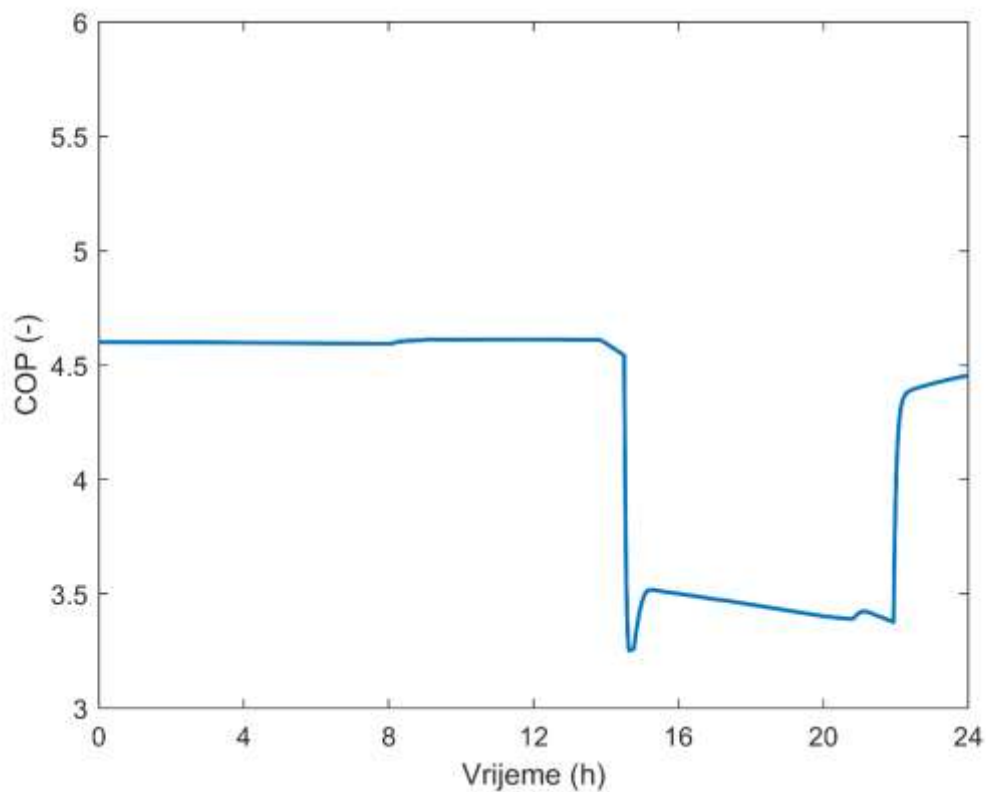
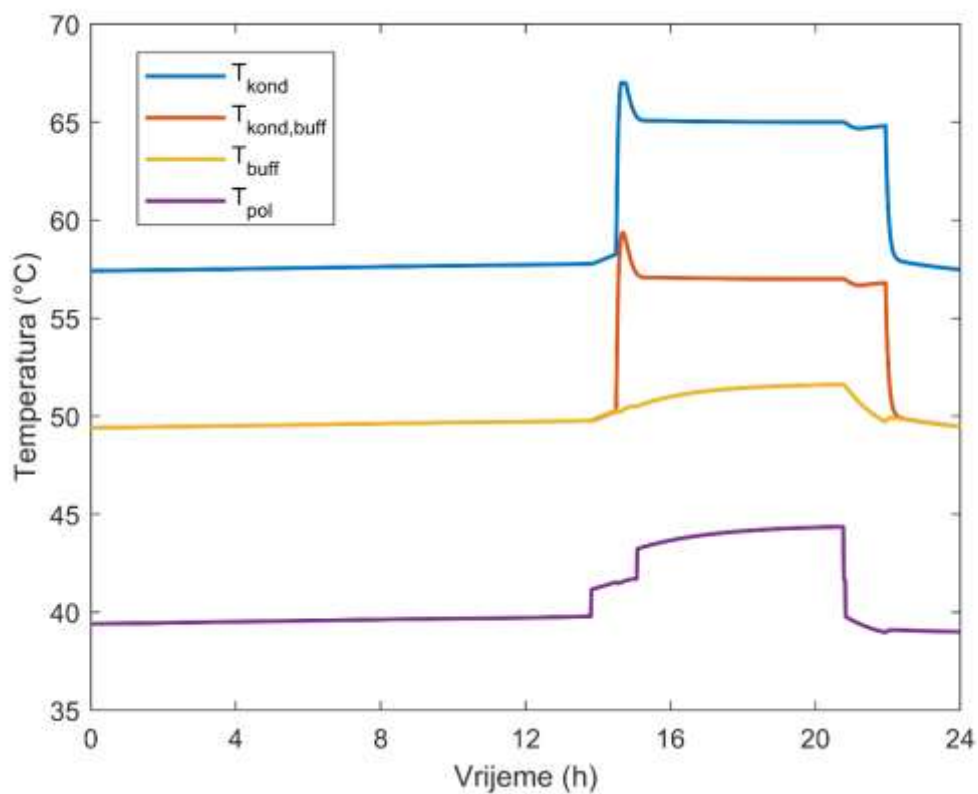
Izmjena rada dizalice topline i pomoćnog električnog grijača prikazan je *Slikom 17*, dok je rad dizalice topline dodatno opisan *Slikom 18*. Kao što je objašnjeno, dizalica topline je modelirana kao statička komponenta sustava radi jednostavnosti. Stoga je vidljivo u grafu kako temperature isparavanja i kondenzacije prate temperature toplinskih medija drugog i trećeg kruga uz zadanu temperaturnu histerezu. Dok je dizalica topline u stanju mirovanja, toplinski medij drugog kruga se zagrijava. U trenutku kada temperatura toplinskog medija drugog kruga dosegne  $15^{\circ}\text{C}$ , odnosno zadanu vrijednost za uključenje dizalice topline, prvotno se naglo, a potom postepeno hladi. Nadalje, dolazi do bržeg pada temperature toplinskog medija nakon uključanja podnog grijanja u zonama 2 i 3, a nakon postizanja minimalno dopuštene temperature isparavanja dizalica topline se isključuje iz rada, a uključuje se pomoćni električni grijač. Za vrijeme rada dizalice topline temperatura kondenzacije prati zadanu vrijednost  $65^{\circ}\text{C}$ , budući da je učin kompresora podešen tako da dizalica topline dobavlja dostatnu toplinsku energiju toplinskom mediju trećeg kruga. Stoga, zbog pada temperature isparavanja faktor grijanja *COP* također pada u razdoblju rada režima dizalice topline (*Slika 19*)



Slika 17. Izmjena rada dizalice topline i pomoćnog grijača za zimski dan



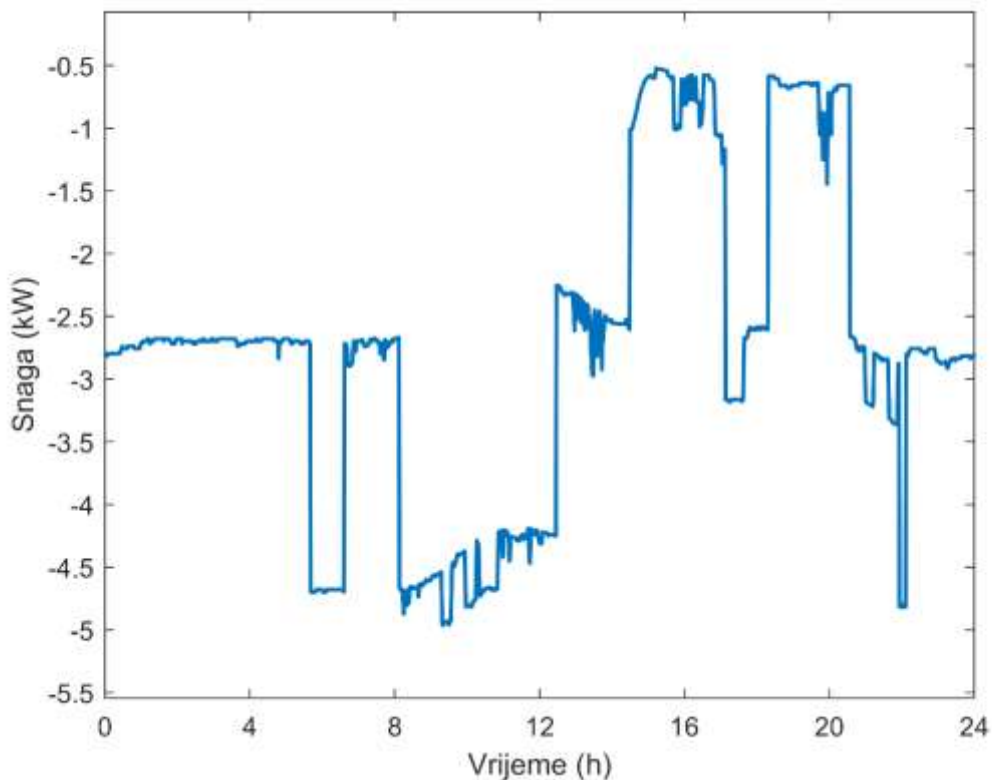
Slika 18. Temperature isparivača i kondenzatora u dizalici topline za zimski dan

Slika 19. Faktor grijanja (*COP*) dizalice topline za zimski dan

Slika 20. Temperature u podsustavu pufer spremnika za zimski dan

**Slikom 20** je prikazana dinamički odziv podsustava pufer spremnika, s prikazanim temperaturama kondenzacije, toplinskog medija trećeg kruga, pufer spremnika i ogrjevnog medija za podno grijanje. Temperatura polaza za podno grijanje se odražava realno stanje jer se kreće u rasponu od 39 do 45°C. Bitno je naglasiti kako temperatura poda  $T_{pod,i}$  ne prelazi propisane dopuštene granice od 27°C.

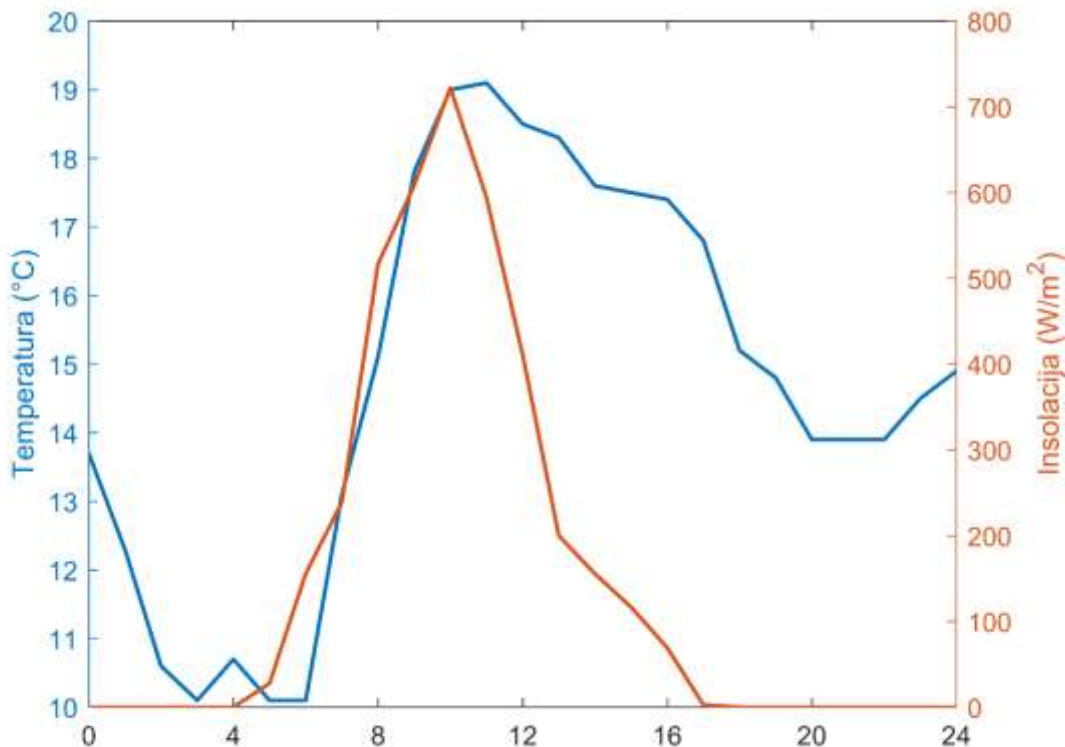
Neto snaga zimi ne postiže pozitivne vrijednosti ni u jednom trenutku. Vršne vrijednosti se postižu kada su istovremeno uključena oba pomoćna električna grijača. S druge strane, najmanje se snage iz električne mreže povlači kada je  $T_{spr}$  iznad minimalno dopuštene temperature te kada je dizalica topline u pogonu.



**Slika 21.** Neto izmjenjena snaga električne energije za zimski dan

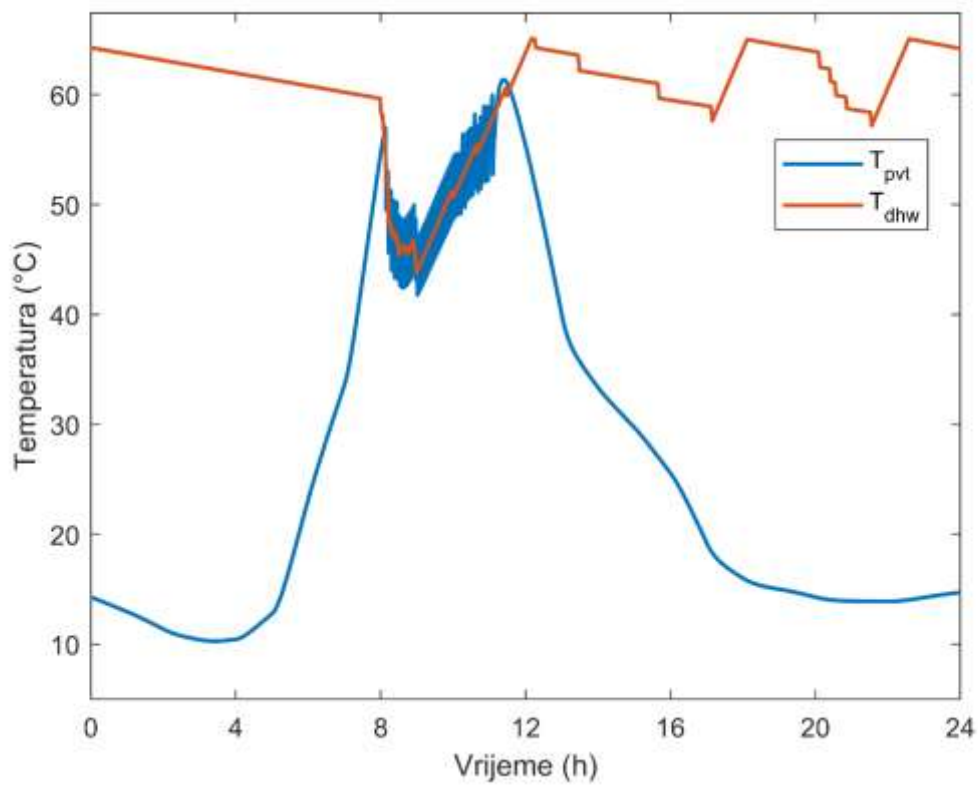
### 4.3. Prijelazno razdoblje

Profili temperature i Sunčeve insolacije za razdoblje proljeće/jesen su prikazani grafom na *Slici 22*. Maksimalna temperatura doseže  $19^{\circ}\text{C}$ , dok maksimalna insolacija  $700\text{W}/\text{m}^2$ . Takvi vremenski uvjeti omogućuju grijanje medija u kolektorima na veću energetska razinu od one u spremniku potrošne tople vode. Kao i za ljetni dan, naizmjenično se otvara i zatvara ventil obilaznog voda jer se glikolna smjesa solarnog kruga jer solarni dobici ne mogu nadoknaditi gubitke u spremniku. U spremniku dolazi do naglog pada temperature jer se javlja visoka potreba za potrošnom toplom vodom u jutarnjim satima (*Slika 23*). Za razliku od ljetnog dana, temperatura ostatka spremnika nije dovoljno visoka te je potreban učin pomoćnog električnog grijača. Solarna energija prenesena u spremnik smanjuje potrebu za učinkom pomoćnog električnog grijača, što je pokazano *Slikom 24* gdje su uspoređena dva slučaja: bez zatvaranja ventila ( $P_{\text{el,gr,bypass}}$ ) i sa zatvaranjem ventila obilaznog voda ( $P_{\text{el,gr,sol}}$ ). Koristeći solarnu energiju za zagrijavanje potrošne tople vode uštedi se 21,27% električne energije za tipičan dan u prijelaznom razdoblju.

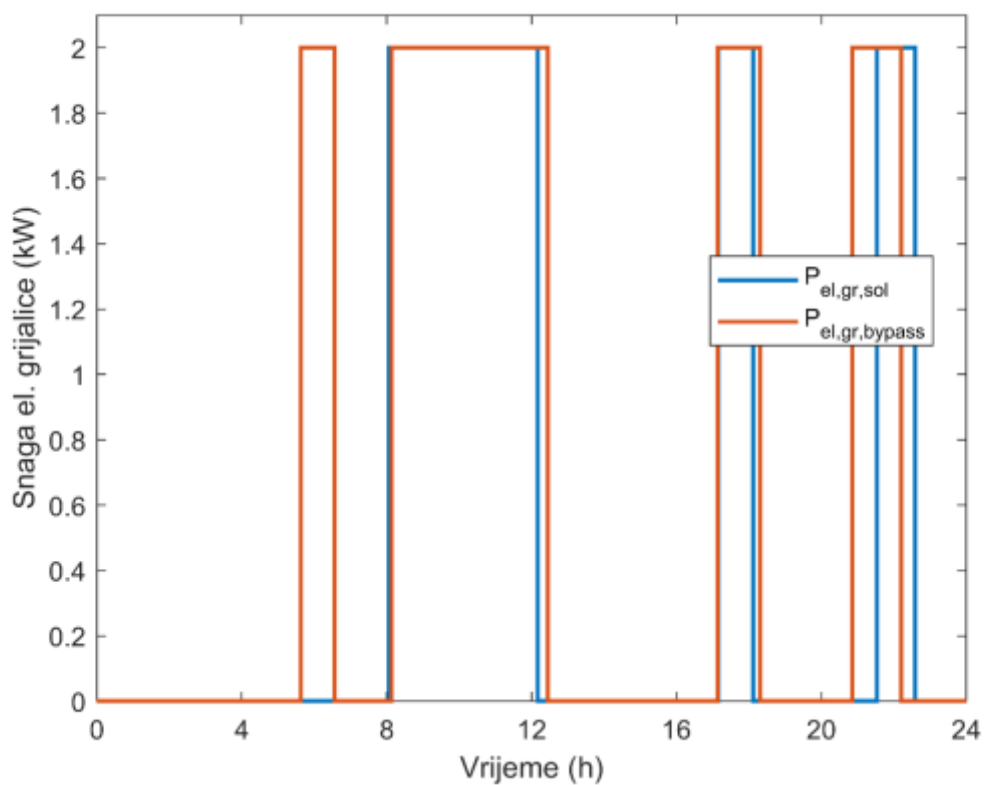


Slika 22. Insolacija i vanjska temperatura za dan u prijelaznom razdoblju



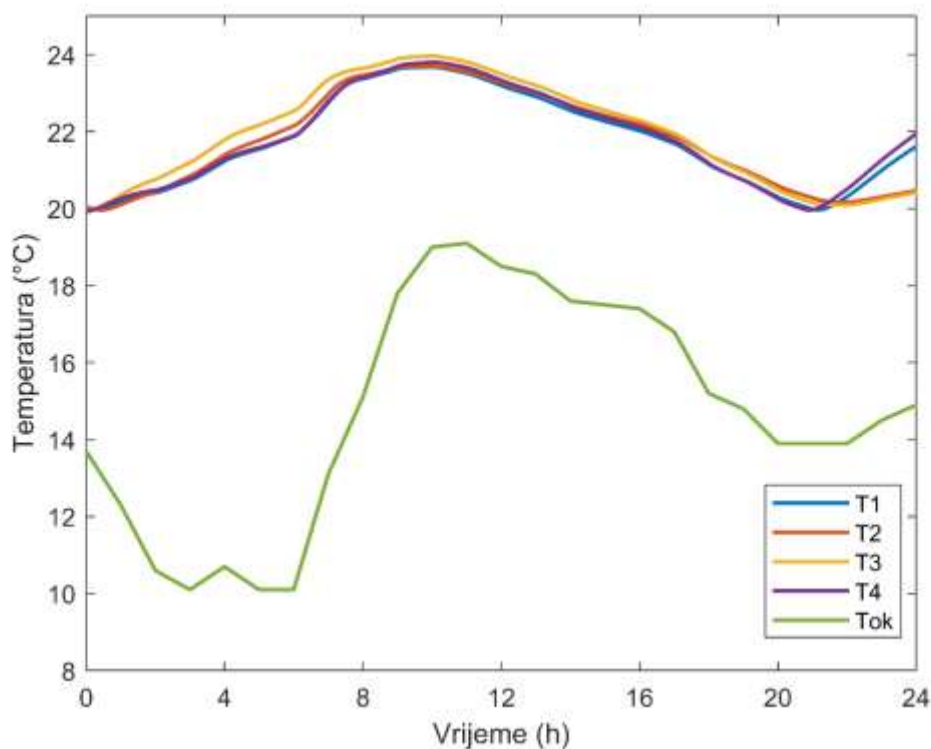


Slika 23. Temperatura potrošne tople vode i solarnog medija za prijelazan dan



Slika 24. Usporedba učina pomoćnog grijača uz i bez solarnog dogrijavanja

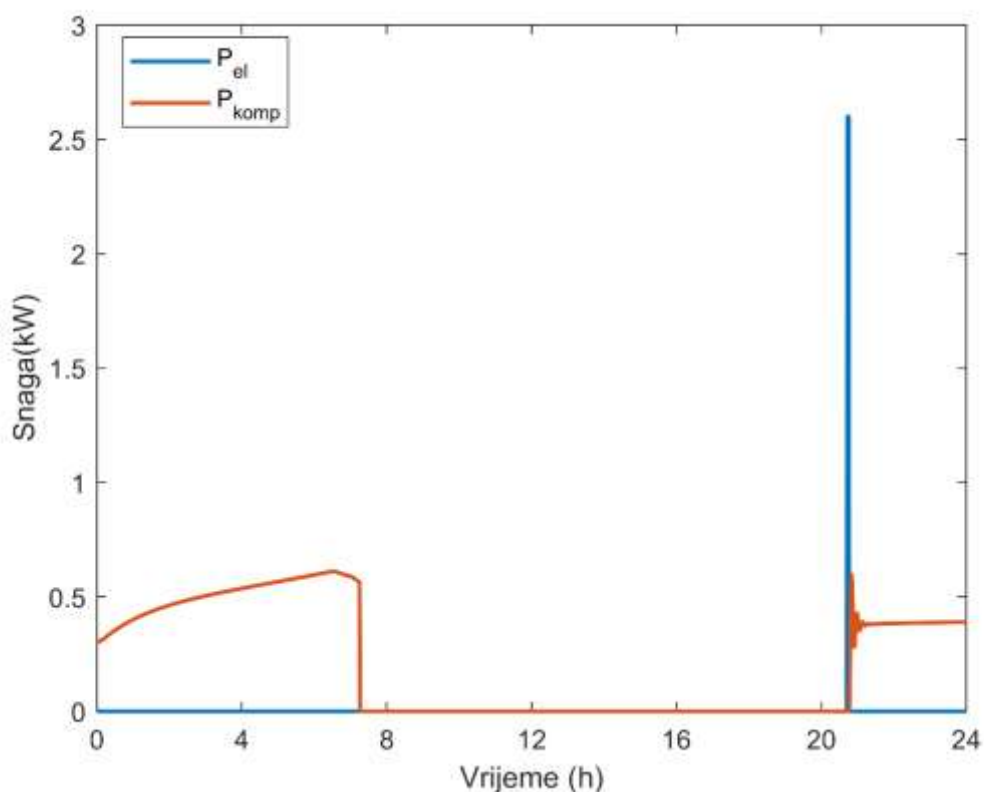
Za razliku od zimskog dana, sustav se isključivo koristi režimom dizalice topline. Nakon što sve zone dostignu maksimalne dopuštene temperature oko 9h, podno grijanje se isključuje, a ponovno se uključuje u večernjim satima (21h) za zone 1 i 4. Zbog toplinske interakcija između zona, podno grijanje nije potrebno za zone 2 i 3. Profili temperatura su prikazani grafom na *Slici 25*.



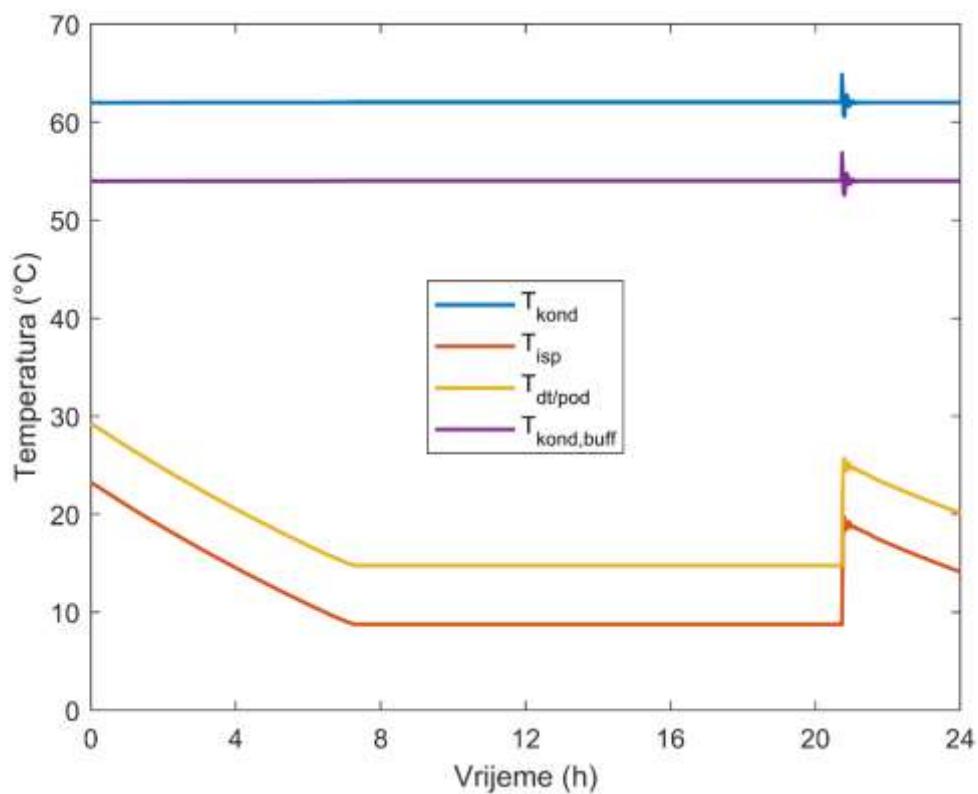
**Slika 25. Temperaturni profili zona kućanstva za prijelazan dan**

Na *Slici 26*, na kojoj je prikazana izmjena rada dizalice topline i pomoćnog električnog grijača. Iz grafa se zaključuje kako se električni grijač uključuje na jedan vremenski korak, što se treba pripisati nedostatku primjenjene „ako-onda“, budući da se u sljedećem trenutku, kada se pumpa toplinskog medija drugog kruga uključi, isključuje pomoćni grijač i pušta se u rad dizalica topline.

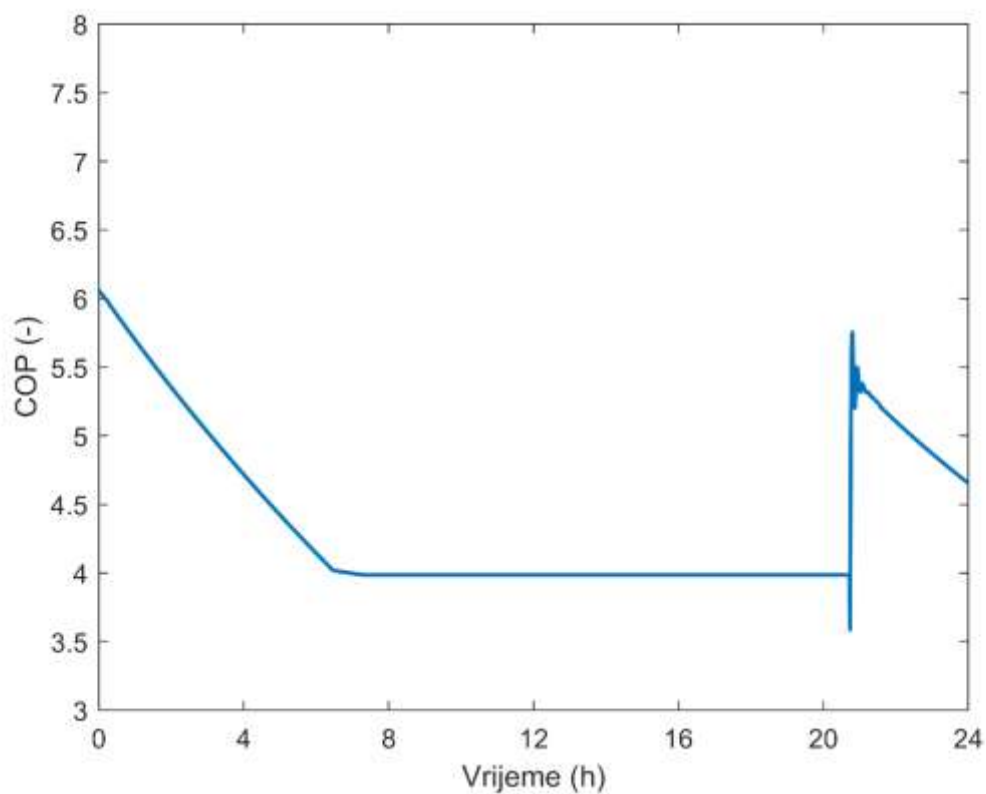
**Slikom 27** su prikazani odzivi temperature u podsustavu dizalice topline, čime je prikazano kako se ponovno održava postavljena temperaturna histereza. Nadalje, vidljivo je kako direktni režim podnog grijanja nije korišten jer temperaturi toplinskog medija drugog kruga  $T_{dt/pod}$  konstantno vrijednost pada u isparivaču dizalice topline. Takvo kretanje  $T_{dt/pod}$  u isparivaču je indikator kako spremnik potrošne tople vode ne predaje dovoljno toplinske energije toplinskom mediju kako bi sustav grijanja prešao iz režima dizalice topline u režim direktnog podnog grijanja. Koeficijent COP je osjetno veći nego za zimski dan, te se kreće između 4 i 6 (**Slika 28**).



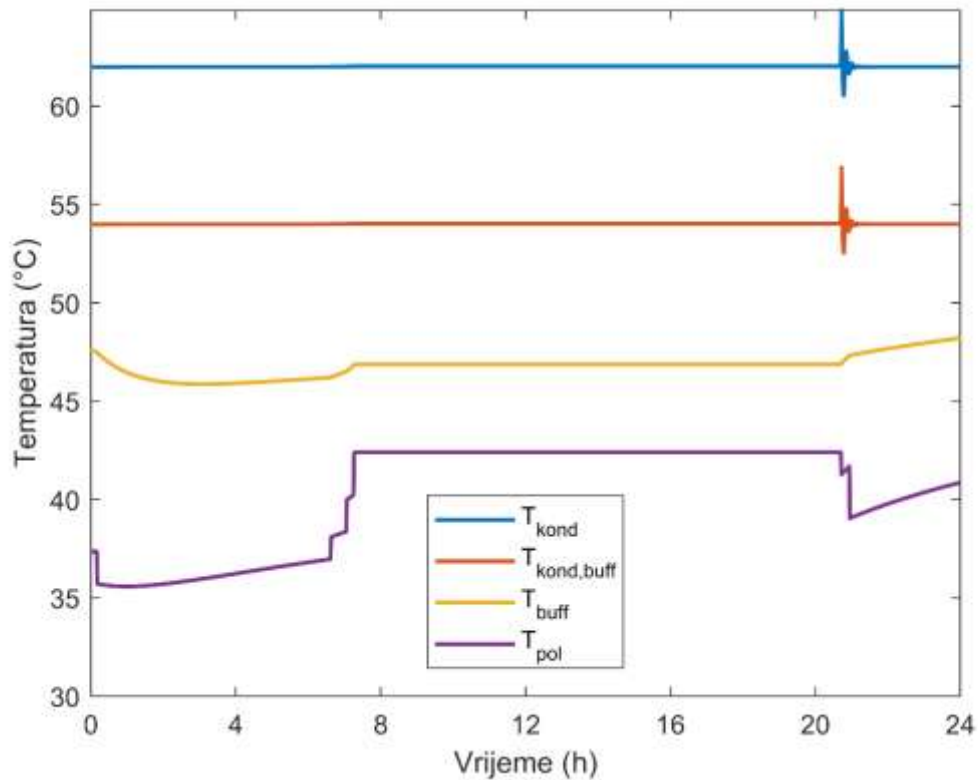
**Slika 26.** Učin kompresora dizalice topline i pomoćnog grijača za prijelazni dan



Slika 27. Temperatura isparavanja i kondenzacije u dizalici topline za prijelazan dan

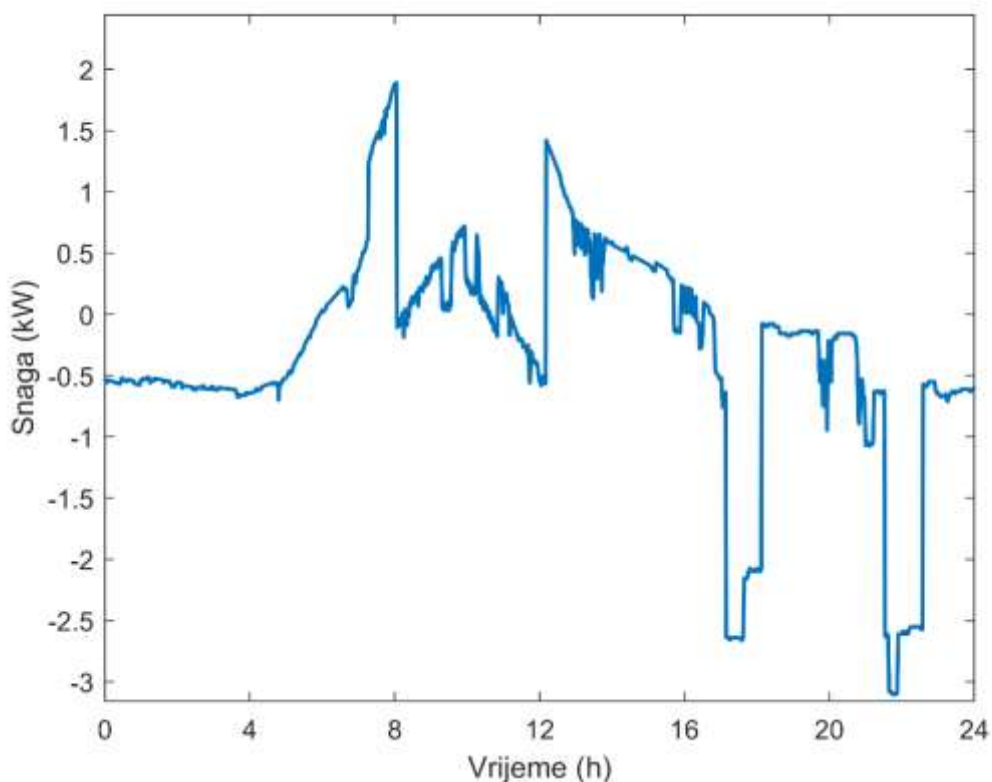


Slika 28. Faktor grijanja (COP) dizalice topline za prijelazan dan



**Slika 29. Temperature podsustava pufer spremnika za prijelazan dan**

Za prijelazno razdoblje, neto snaga izmjene električne energije s mrežom je obilježena velikim varijacijama. Pojavom Sunčevog dozačenja, neto snaga dobiva snažan pozitivan prirast do trenutka uključivanja pomoćnog električnog grijača za pripremu potrošne tople vode. Najviše snage se povlači iz elektroenergetskog sustava oko 22h. Početkom rada dizalice topline i isključivanjem pripreme potrošne tople vode, utrošena snaga se koristi na kućanske uređaje i rasvjetu.

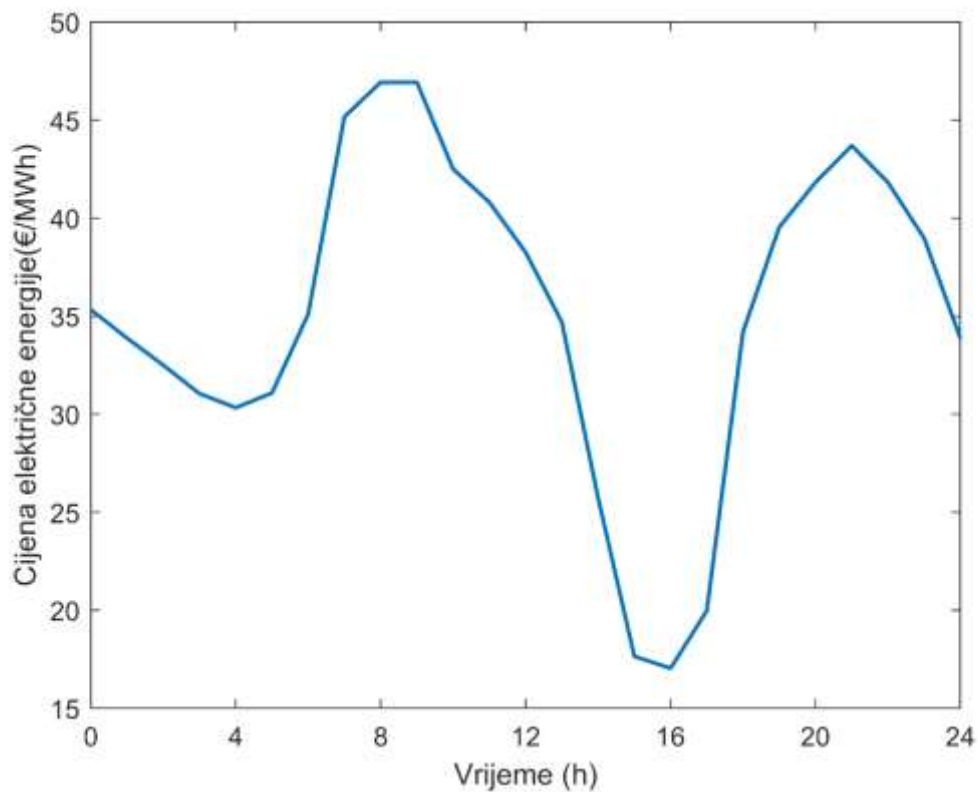


Slika 30. Neto izmjenjena snaga s mrežom za prijelazan dan

#### 4.4. Napredno vođenje prijelaznog dana

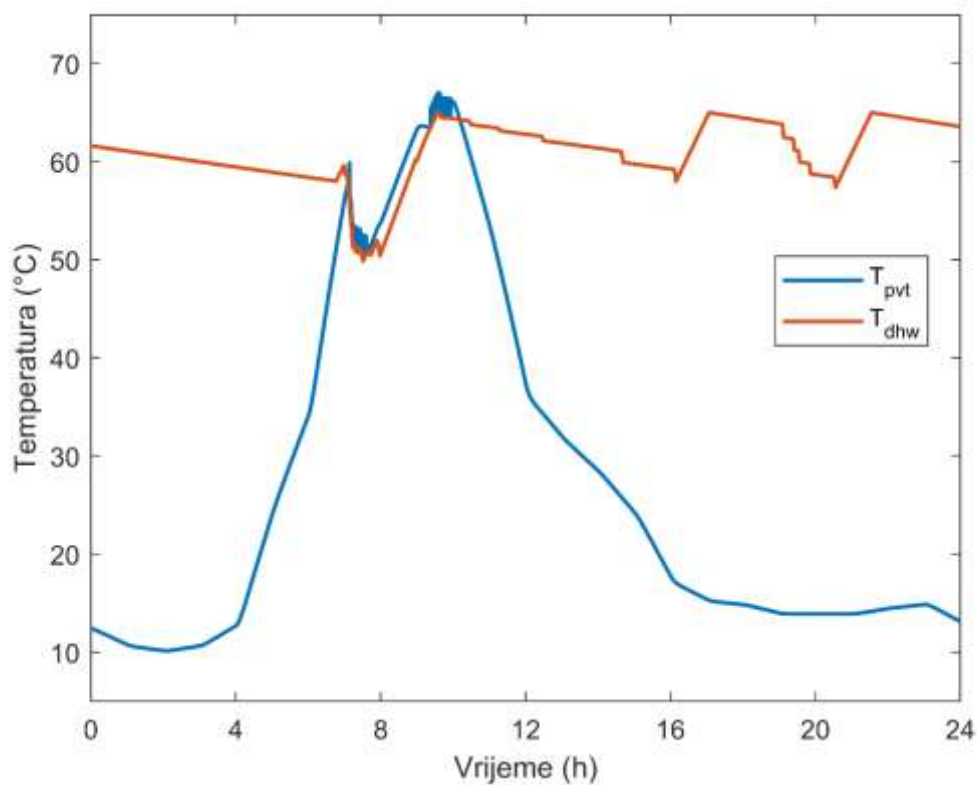
Napredno vođenje obuhvaća predikciju cijene električne energije te mijenjanje režima s ciljem maksimizacije profita ili novčane uštede. Cijena električne energije za prijelazni dan je prikazana *Slikom 31*. U ranojutarnjim satima, cijena električne energije je relativno niska, a njezin porast uzrokuje povećano opterećenje na elektroenergetski sustav koji doživljava vrhunac u 9h. Potom dolazi do pada opterećenja i cijena zbog početka radnog vremena. U večernjim satima ponovno dolazi do lokalnog maksimuma cijene električne energije, a to se može pripisati povratkom ljudi s posla i paljenjem rasvjete.

Osim praćenja cijena električne energije, režim grijanja je upravljani i s obzirom na razdoblje dana. Odnosno, od 0:00h do 5:00h svi režimi su u stanju mirovanja. Razlog tome je što u tom razdoblju nema ljudske aktivnosti, pa sustav grijanja nije potreban.

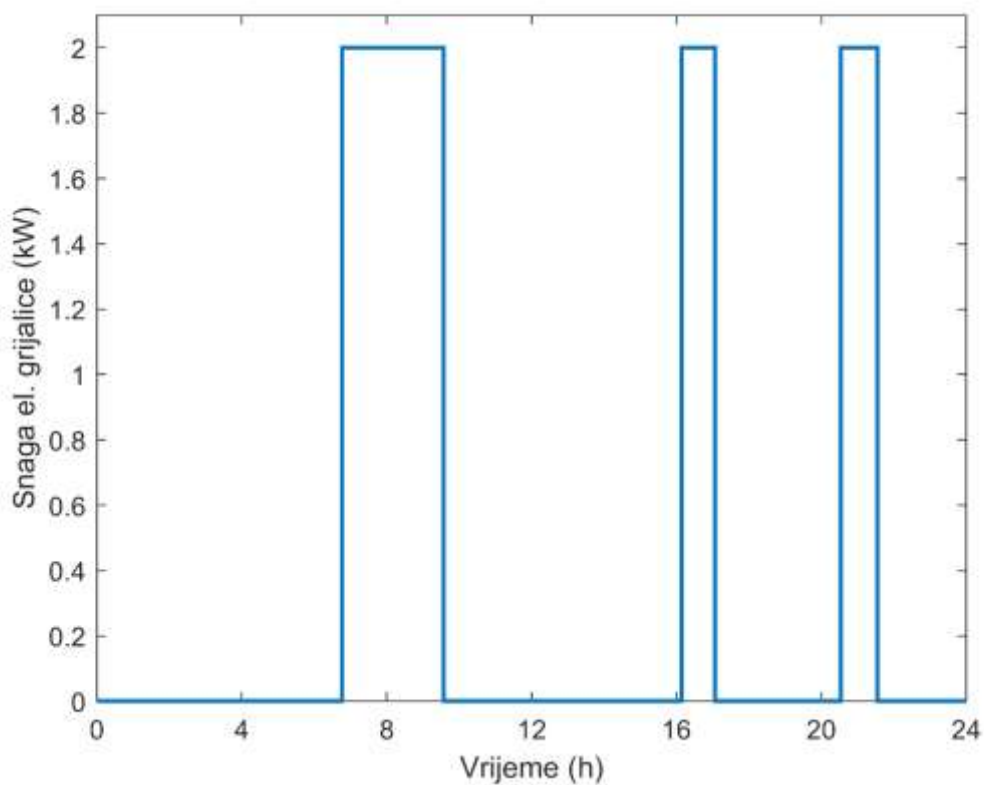


**Slika 31. Cijena električne energije za prijelazan dan**

Kako bi se prediktivna metoda upravljanja mogla implementirati, bilo je potrebno linearizirati i pojednostaviti određene komponente sustava, poput PVT, zbog čega se dobivaju i nešto drugačiji rezultati zagrijavanja vode u kolektoru u odnosu na simulaciju konvencionalnog upravljanja sustavom (*Slika 32*). Ipak, rezultati su dovoljno slični da se mogu uzeti u obzir kao relevantni. Ponovno dolazi do oscilacija otvaranja i zatvaranja ventila obilaznog voda u trenucima kada toplinski medij solarnog kruga postiže veću temperaturu od potrošne tople vode. Pokazuje se kako prediktivnim upravljanjem se smanjuje utrošak energije pomoćnim električnim grijačem za zagrijavanje potrošne tople vode (*Slika 33*).



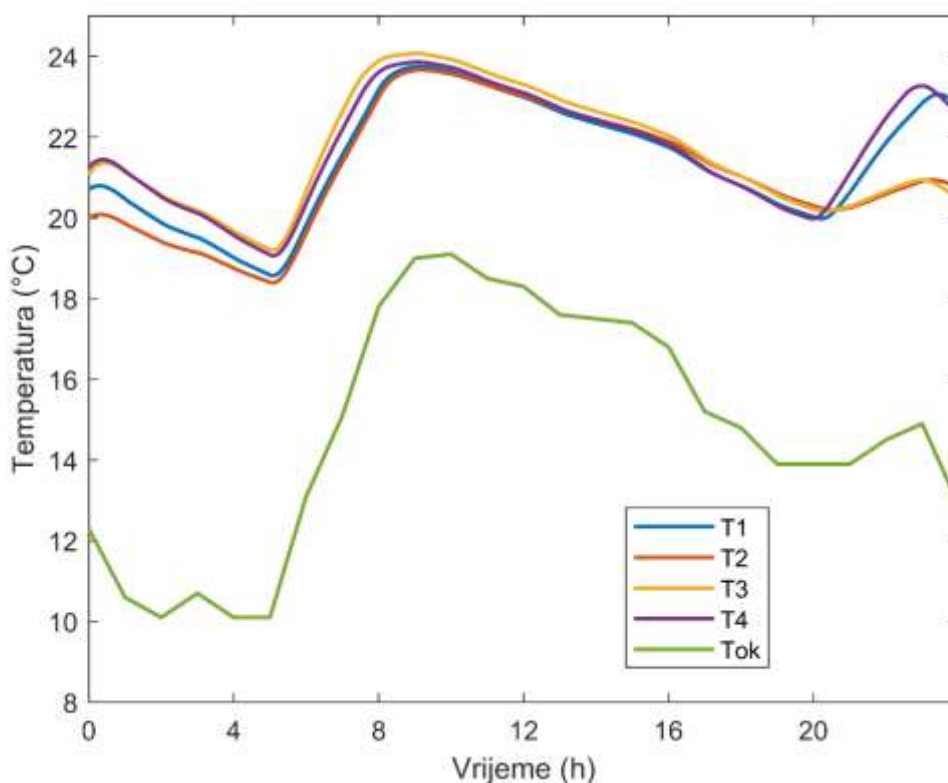
Slika 32. Temperatura potrošne tople vode i solarnog medija uz prediktivno upravljanje



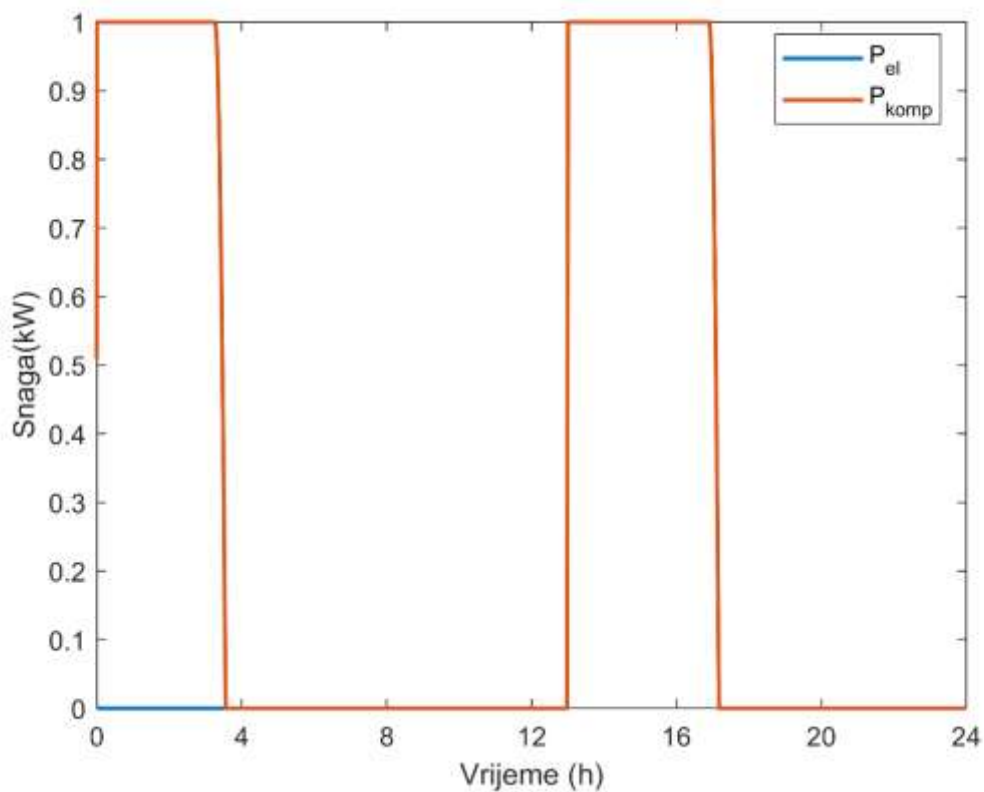
Slika 33. Učin pomoćnog grijača uz prediktivno upravljanje



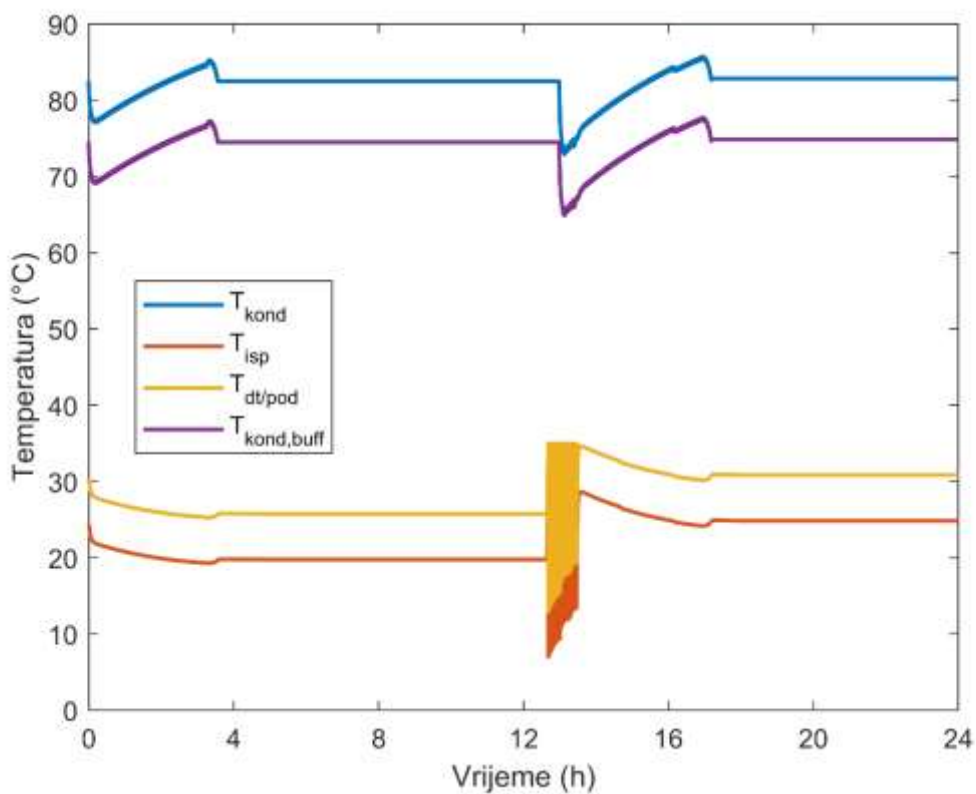
Na **Slici 34** Dani su profili temperatura zona kućanstva. Do 5h, temperatura prostorija pada na  $19^{\circ}\text{C}$ , te se uključivanjem sustava grijanja oko 8h postiže unutarnja temperatura od  $24^{\circ}\text{C}$ . Sustav grijanja ostaje u stanju mirovanja sve do 20h. Za razliku od konvencionalog pristupa upravljanju sustavom, za vrijeme rada sustava grijanja, dizalica topline nije u pogonu. Nasuprot, dizalica topline radi u razdobljima kada se pojavljuje potreba za grijanjem prostorija, već u razdobljima kada je cijena električne energije dovoljno niska da pregrijavanjem pufer spremnika osigura toplinsku energiju dostatnu za razdoblja kada su toplinska opterećenja najveća, a to su ujedno i razdoblja s najvećom cijenom energije (**Slika 35**, **Slika 36**, **Slika 37**). Temperatura u pufer spremniku doseže i do  $72^{\circ}\text{C}$ , dok temperatura kondenzacije i isparavanja  $95^{\circ}\text{C}$ , odnosno  $30^{\circ}\text{C}$ .



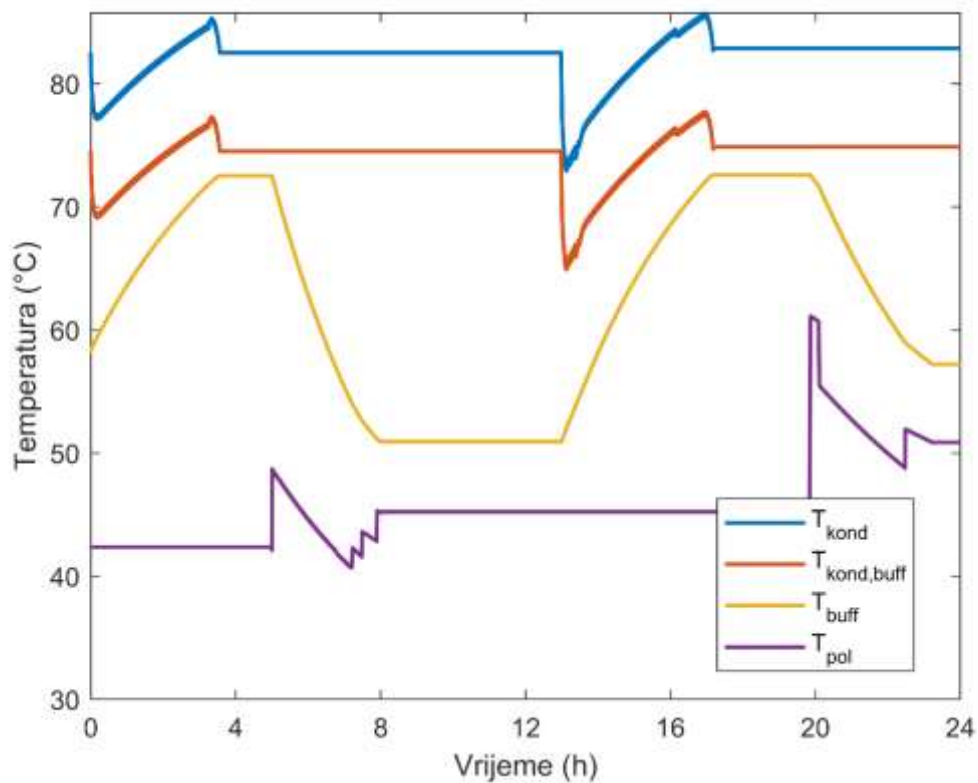
**Slika 34. Temperaturni profili zona kućanstva uz napredno upravljanje**



Slika 35. Učin kompresora dizalice topline i pomoćnog grijača uz prediktivno vođenje

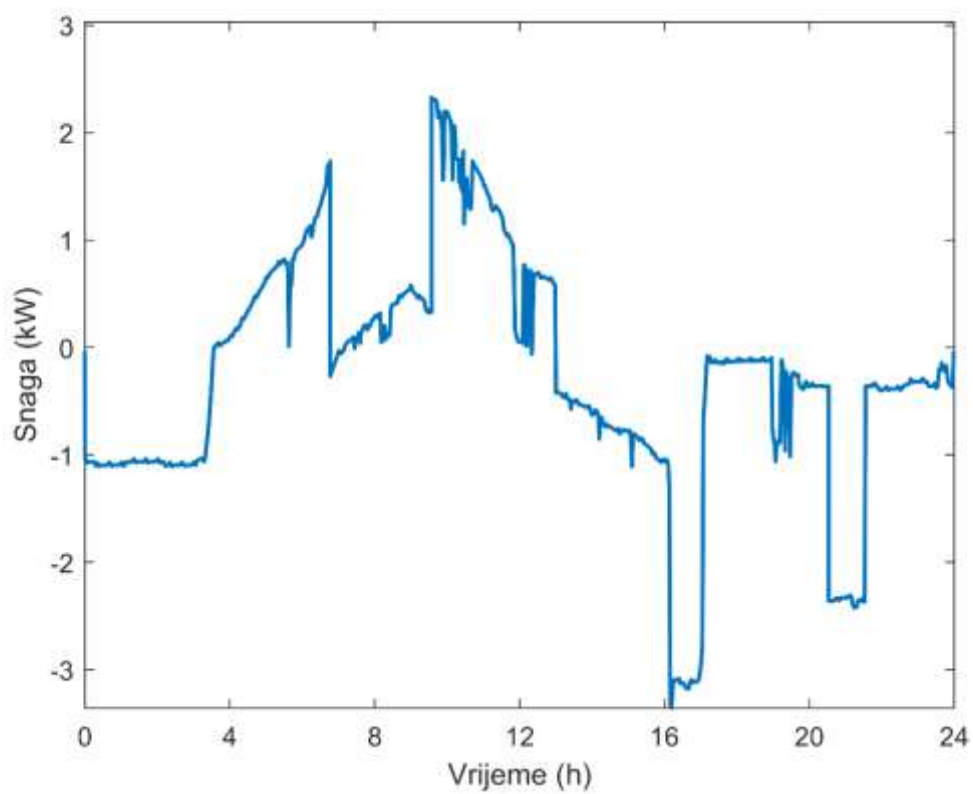


Slika 36. Temperatura isparavanja i kondenzacije u dizalici topline uz prediktivno vođenje



**Slika 37. Temperature u podsustavu pufer spremnika uz prediktivno vođenje**

Preuzeta snaga iz elektroenergetske mreže u ranojutarnjem razdoblju (do 5h) je za 0,5kW veća u odnosu na vođenje konvencionalnim pristupom, a neto izmjena snage je također umanjena u razdoblju od 12h do 16h za taj iznos zbog rada dizalice topline. No, razdoblje vršne snage predane u mrežu traje duže, a razdoblje predaje vršne snage u mrežu traje kraće. To rezultira gotovo 90%-tnom uštedom za prijelazno razdoblje, budući da su pogonski troškovi upravljanja konvencionalnim pristupom -0.2€, a za prediktivni pristup upravljanja -0.02€.



Slika 38. Neto izmjenjena snaga s mrežom uz prediktivno vođenje

## 5. ZAKLJUČAK

Promatrani mikrosolarni trigeneracijski sustav koji koristi hibridnu PVT tehnologiju promatran je za tri karakteristična dana: zimsko, ljetno i prijelazno razdoblje. Sustav uz pomoć Sunčeve energije ima za cilj zadovoljiti energetske potrebe potrošne tople vode, hlađenja i grijanja promatranog kućanstva, uz što veću novčanu uštedu, odnosno uz što veći udio obnovljivog izvora energije Sunca. Kako bi se to ostvarilo, sustav grijanja na raspolaganju ima tri režima rada: režim dizalice topline, režim direktnog podnog grijanja i režim pomoćnog grijača. S druge strane, sustav hlađenja koristi isključivo inverter klima uređaje pogonjene Sunčevom energijom ili električnom energijom iz elektroenergetske mreže.

Razvijen je matematički model komponenti pomoću kojeg su simulirane promjena temperature u pojedinim dijelovima postrojenja te proizvodnje električne energije. Rezultati simulacije u MATLAB/Simulinku su pokazale kako trigeneracijski sustav grijanja u zimskom razdoblju većinom radi u režimu pomoćnog grijača, a manjim dijelom u režimu grijanja dizalice topline što ne ostavlja prostor za daljnju optimizaciju sustava. Također, sustav hlađenja nema prostora za daljnje poboljšanje jer koristi samo jedan ponor topline. Važno je naglasiti kako sustav u režimu hlađenja, odnosno u ljetnom razdoblju, ostvaruje neto dobit od 0,4€ dnevno.

Stoga, fokus optimiranja potrošnje toplinske i električne energije ovisno o očekivanim tržišnim cijenama te proizvodnji solarnog postrojenja je provedena za tipičan dan u prijelaznom razdoblju (proljeće/jesen). Dobiveni rezultati pokazuju kako se prediktivnim vođenjem ostvaruje značajna novčana ušteda od 90% u odnosu na vođenje konvencionalnim pristupom. Ipak, modelirani sustav pokazuje i prostor za poboljšanje, budući da se režim direktnog podnog grijanja nikad ne koristi te se pokazuje kao suvišan.

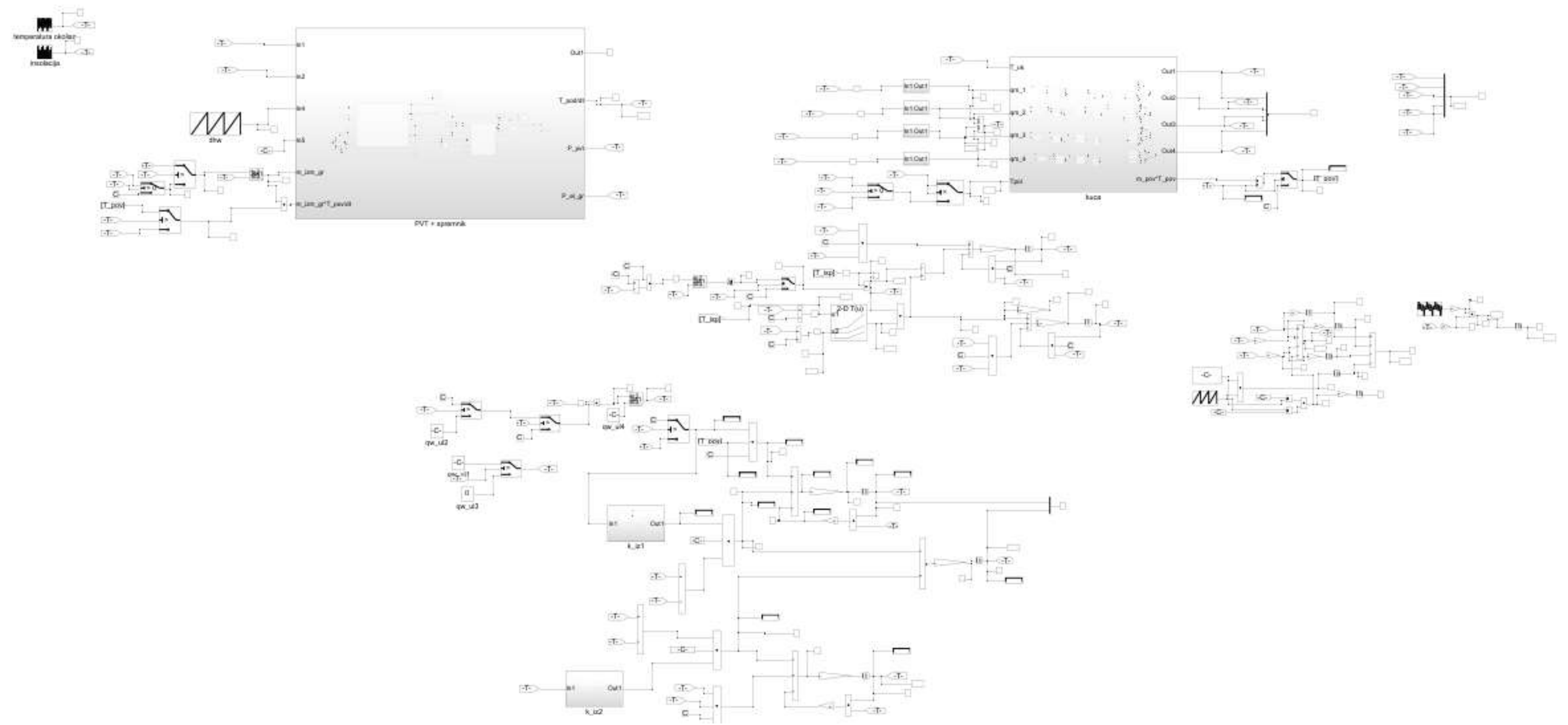
## LITERATURA

- [1] <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu> (pristupljeno 28. ožujka 2019.)
- [2] Herrando M, Markides CN, Hellgardt K. A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance. *Appl Energy*, 2014;122:288–309.
- [3] Eurofins Modulo Uno, Report of Performance Test According to EN12975-2 for Solimpeks Volther Powertherm. 10156 Torino, Italy; 2011 Nov. Technical Report No.: M1.11.NRG.0319/43724, <<http://intergeo.sk/wp-content/uploads/GLAZED-TR-UNIEN12975-2-ENG-ITA-COMPLETO-1.pdf>>, 2006 (pristupljeno 1. ožujka 2019.)
- [4] Guarracino I, Mellor A, Ekins-Daukes NJ, Markides CNet al., 2016, Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors, *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, Vol: 101, Pages: 778-795, ISSN: 1359-4311
- [5] Kalogirou SA, Tripanagnostopoulos Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Convers Manage* 2006;47:3368–82.
- [6] Tripanagnostopoulos Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Sol Energy* 2007;81:1117–31.
- [7] Grubišić D. Hibridno ORC postrojenje. 2017. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu

## **PRILOZI**

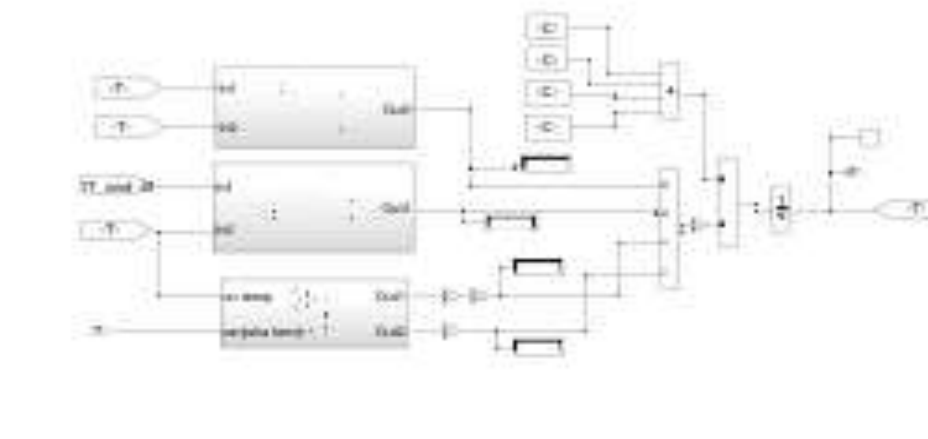
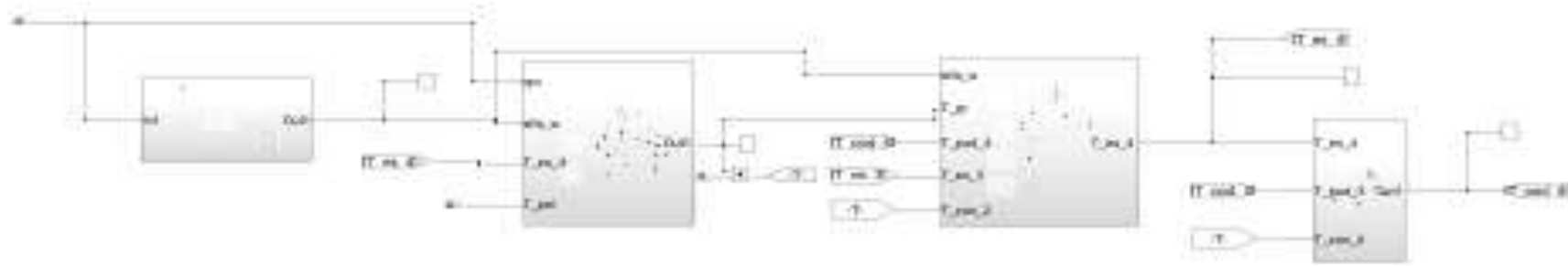
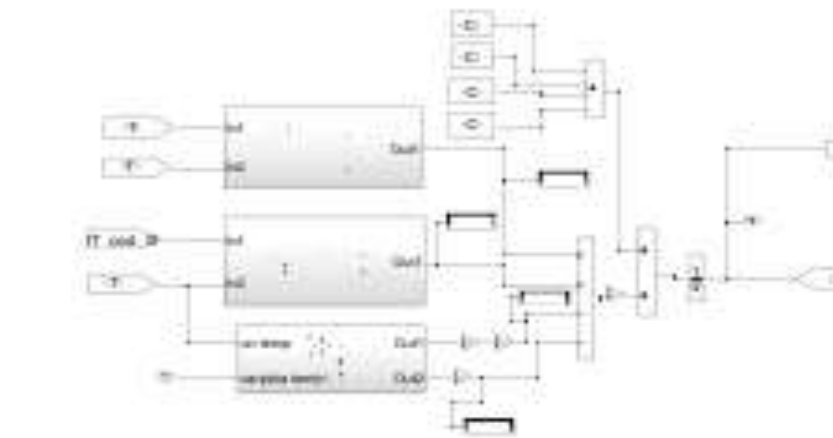
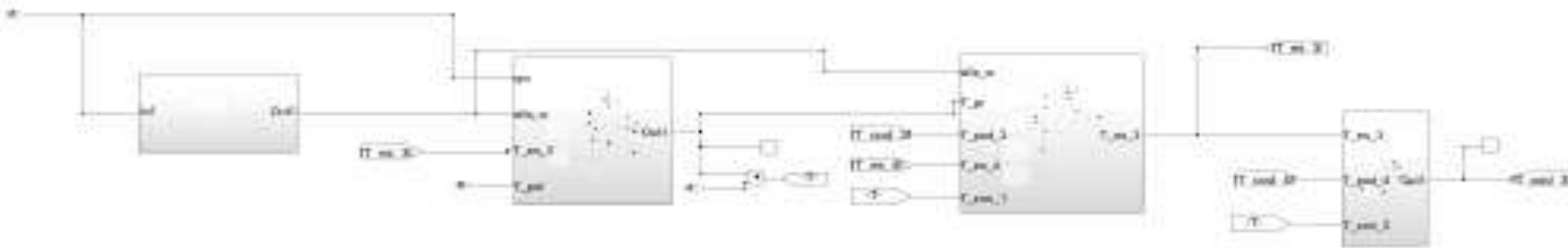
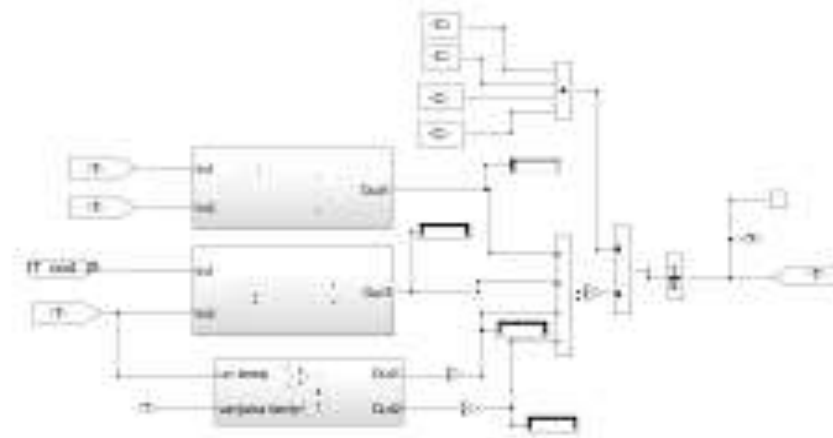
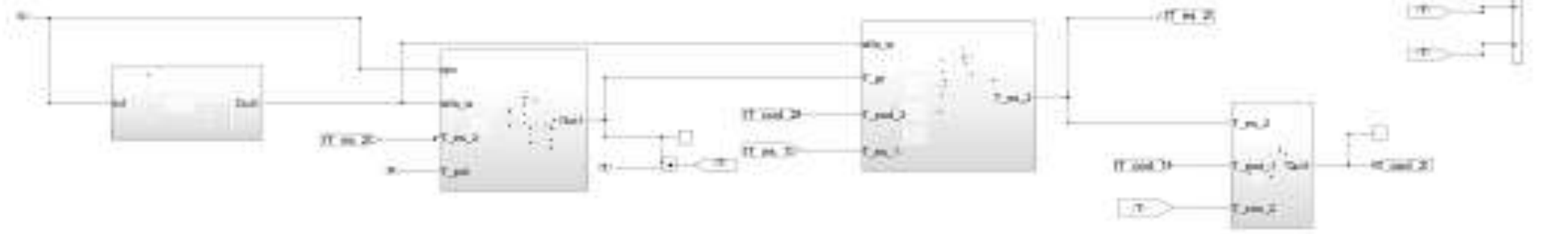
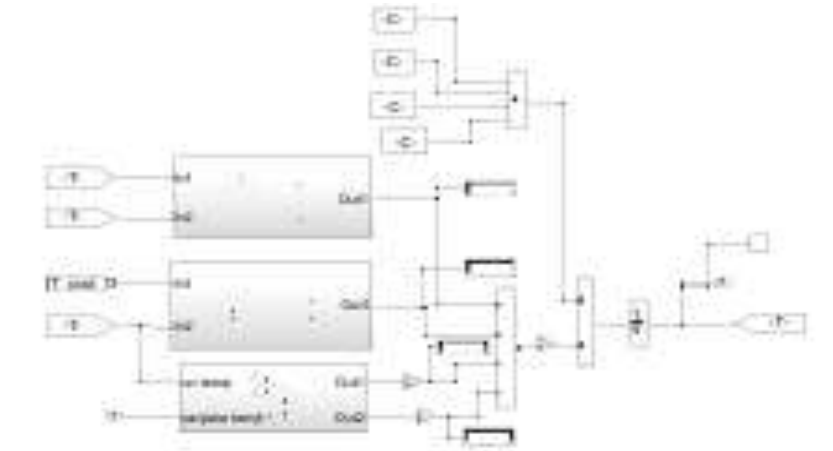
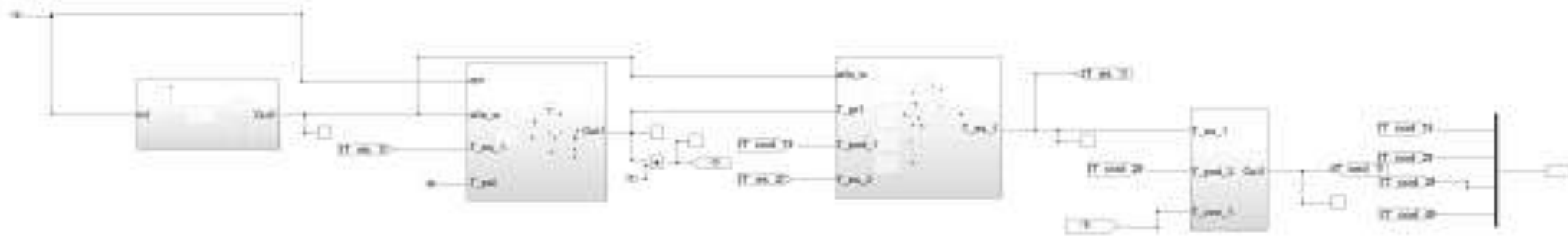
I. CD-R disc

# Prilog B: Model cijelog sustava

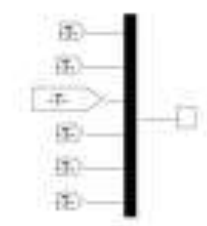
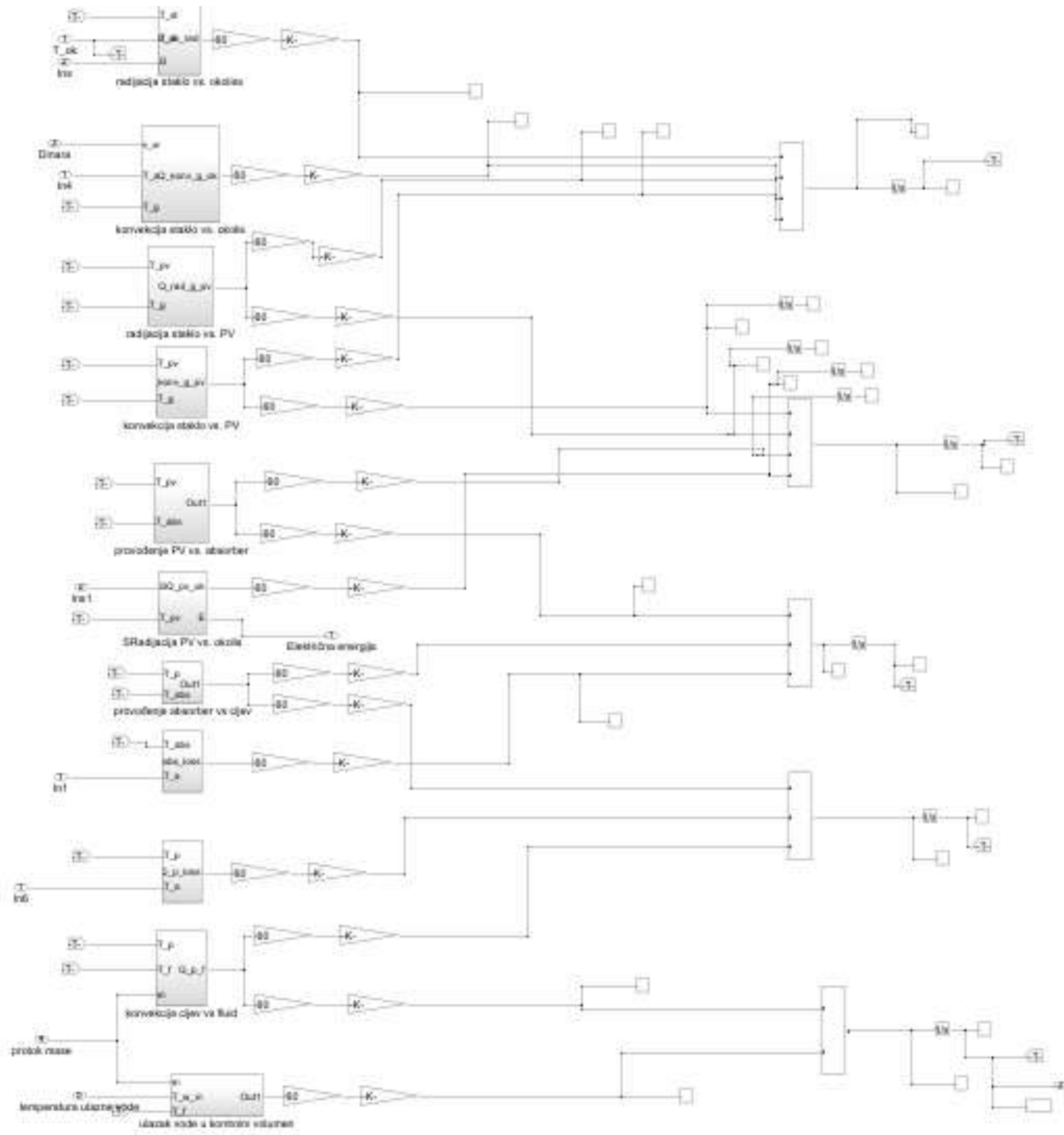




## Prilog B: Model kućanstva



# Prilog B: Model PVT



# Prilog B: Model jednog segmenta spremnika

