

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ana Lisac**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Ana Lisac

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Draženu Lončaru na savjetima i pomoći pri izradi ovog rada te svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci.

Ana Lisac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Ana LISAC

Mat. br.: 0035203759

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**SOLARNO ORC POSTROJENJE U STAMBENOM OBJEKTU**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**SOLAR ORC PLANT IN RESIDENTIAL BUILDING**

Opis zadatka:

Razvoj nove generacije energetske postrojenja usmjeren je k modularnim izvedbama prikladnim za velikoserijsku proizvodnju i primjenu u manjim stambenim i poslovnim objektima. Njihova uloga je pokrivanje različitih energetske potreba uz maksimalno iskorištavanje obnovljivih energetske izvora. Sve popularniji koncept tzv. *nula energetske kuće* primjer je korištenja različitih modularnih sustava s ciljem postizanja potpune energetske neovisnosti objekta. Solarni kolektori, u pravilu korišteni za djelomično pokrivanje toplinskih potreba objekta, novu primjenu nalaze u proizvodnji električne energije spregnuti s malim postrojenjima koja se temelje na organskom Rankineovom ciklusu (ORC).

U okviru rada potrebno je:

1. Za niskoenergetski stambeni objekt površine 800 m<sup>2</sup> dimenzionirati postrojenje s organskim Rankineovim ciklusom (ORC) i solarnim kolektorom kao izvorom topline.
2. Izvesti pojednostavljeni matematički model dinamike termohidrauličkih procesa u komponentama sustava.
3. Za odabranu lokaciju u primorju simulirati kontinuirani dnevni pogon sustava u ljetnom, zimskom i prijelaznom režimu s različitim snagama sunčevog zračenja i izračunati dnevnu proizvodnju električne energije.

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.


Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.


Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS .....	3
2.1. Izvori topline .....	4
2.2. Povijest ORC-a .....	4
2.3. Kogeneracija .....	5
3. SOLARNO ORC POSTROJENJE .....	6
4. MATEMATIČKI MODEL.....	11
4.1. Solarni kolektor.....	11
4.2. Toplinski spremnik .....	13
4.3. Isparivač .....	16
4.4. Ekspander.....	19
5. REGULACIJA.....	21
6. REZULTATI SIMULACIJE .....	22
6.1. Zimski režim rada .....	23
6.2. Režim rada u prijelaznom razdoblju .....	25
6.3. Ljetni režim rada .....	28
7. ZAKLJUČAK.....	311
LITERATURA.....	322
PRILOZI.....	333

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Krivulja zasićenja organske radne tvari (R-134a).....	3
Slika 2.	Solarno ORC postrojenje [3].....	6
Slika 3.	Pločasti solarni kolektor [5] .....	7
Slika 4.	Pločasti izmjenjivač topline [6].....	8
Slika 5.	Organski Rankineov ciklus u T,s dijagramu .....	9
Slika 6.	Shema kolektora[7] .....	11
Slika 7.	Diskretizirani model kolektora.....	11
Slika 8.	Diskretizirani model toplinskog spremnika .....	13
Slika 9.	Pločasti izmjenjivač topline.....	16
Slika 10.	Diskretizirani model isparivača.....	17
Slika 11.	Pužni ekspander [6].....	19
Slika 12.	Model ekspandera [7].....	20
Slika 13.	Direktna osunčanost plohe .....	22
Slika 14.	Temperatura na izlazu iz kolektora .....	23
Slika 15.	Temperature vode u spremniku topline.....	23
Slika 16.	Električna energija na generatoru.....	24
Slika 17.	Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za prvi dan.....	24
Slika 18.	Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za drugi dan.....	25
Slika 19.	Temperatura na izlazu iz kolektora .....	25
Slika 20.	Temperature vode u spremniku topline.....	26
Slika 21.	Električna energija na generatoru.....	26
Slika 22.	Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za prvi dan.....	27
Slika 23.	Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za drugi dan .....	27
Slika 24.	Temperatura na izlazu iz kolektora .....	28
Slika 25.	Temperature vode u spremniku topline.....	28
Slika 26.	Električna energija na generatoru.....	29
Slika 27.	Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za prvi dan.....	29
Slika 28.	Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za drugi dan .....	30

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Popis korištenih konstanti ..... 9

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$m$	kg/s	Maseni protok
$T_v$	°C	Temperatura
$A$	m <sup>2</sup>	Površina
$M$	kg	Masa segmenta
$c_p$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
$\eta$		Iskoristivost
$\delta$	m	Debljina
$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent konvektivnog prijelaza topline
$r_1$	m	Unutarnji promjer cijevi
$r_2$	m	Vanjski promjer cijevi
$\lambda$	W/mK	Toplinska provodnost
$a$	m	Razmak između ploča isparivača
$b$	m	Širina isparivača
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$\theta$	°C	Temperatura
$I_{kol}$	W/m <sup>2</sup>	Insolacija
$k$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prolaza topline
$\phi$	W	Toplinski tok
$Q$	W	Toplina
$h$	J/kg	Specifična entalpija
$P$	W	Snaga



---

**SAŽETAK**

U ovom radu dimenzionirano je postrojenje s organskim Rankineovim ciklusom i pločastim solarnim kolektorom kao izvorom topline za stambeni objekt površine 800 m<sup>2</sup>. Opisane su općenite karakteristike ovog procesa i veličine korištene za izračun. Izveden je pojednostavljeni matematički model komponenti postrojenja te pomoću programa *MATLAB* simuliran je kontinuirani dnevni pogon sustava u zimskom, prijelaznom i ljetnom režimu na području grada Splita. Izračunata je dnevna proizvodnja električne energije i prikazana na dijagramu. U zaključku se daje usporedba proizvedene energije s pretpostavljenom potrebnom. Prodiskutirana su alternativna rješenja za nedostatke postrojenja.

Ključne riječi: organski Rankineov ciklus, pločasti solarni kolektor, električna energija

---

**SUMMARY**

The thesis deals with designing an organic Rankine cycle plant with plate solar collector as heat source in residential building with area of 800 m<sup>2</sup>. General characteristics of this cycle and used variables are described. A simplified mathematical model of plant components is presented and *MATLAB* software is used to simulate continuous daily performance in winter, transitional and summer regime for the city of Split. Daily power production is calculated and presented in a chart. A comparison of produced and needed power is given in conclusion, with the discussion on alternative solutions for plant disadvantages.

Key words: organic Rankine cycle, plate solar collector, power production

## 1. UVOD

Potrošnja energije kontinuirano raste iz dana u dan. Danas se energija uglavnom dobiva iz neobnovljivih izvora, kao što su fosilna goriva, pri čemu dolazi do ispuštanja velike količine stakleničkih plinova, prvenstveno CO<sub>2</sub>, u atmosferu. Upravo zbog toga dolazi do klimatskih promjena koje negativno utječu na život ljudi te se javlja potreba za smanjenjem emisije stakleničkih plinova. Prihvatljivo rješenje predstavlja korištenje obnovljivih izvora energije.

Jedna od obećavajućih tehnologija upravo je organski Rankineov ciklus (ORC) – temelji se na klasičnom Rankineovom ciklusu, ali umjesto vodene pare, radna tvar je organskog sastava. Takve tvari imaju niže temperature isparavanja i stoga su idealne za korištenje uz nisko ili srednje temperaturne izvore topline, kao što su solarna i geotermalna energija te energija biomase i industrijska otpadna toplina. Posebno je zanimljiva solarna energija jer je ima u izobilju i lako je dostupna – Zemlja svaki dan primi dovoljno količine sunčeve energije da zadovolji svjetske potrebe.

ORC se može koristiti za decentraliziranu proizvodnju energije (npr. u udaljenim ruralnim područjima) ili općenito za neovisnu proizvodnju električne i toplinske energije. Zbog toga je ovakvo postrojenje manjih razmjera prikladno za postizanje energetske neovisnosti stambenih zgrada, što je cilj koncepta tzv. *nula energetske kuća*. Glavni izazov ove tehnologije je smanjenje investicijskih troškova.

Karakteristike ORC-a za stambenu primjenu su:

- Srednje niske temperature (<130°C)
- Velika pouzdanost, jednostavnost korištenja i održavanja
- Razumna učinkovitost pri relativno maloj proizvodnji
- Kompaktna veličina, što čini sustav pogodan za stambene zgrade i potiče mogućnost integracije unutar ostalih postojećih sustava zgrade
- Prilagodljivost nekolicini temperaturnih raspona i konfiguracija korištenjem drugačijeg fluida za izmjenjivanje topline
- Niži tlakovi isparavanja i viši tlakovi kondenzacije
- Nema potrebe za korištenjem (velike količine) vode

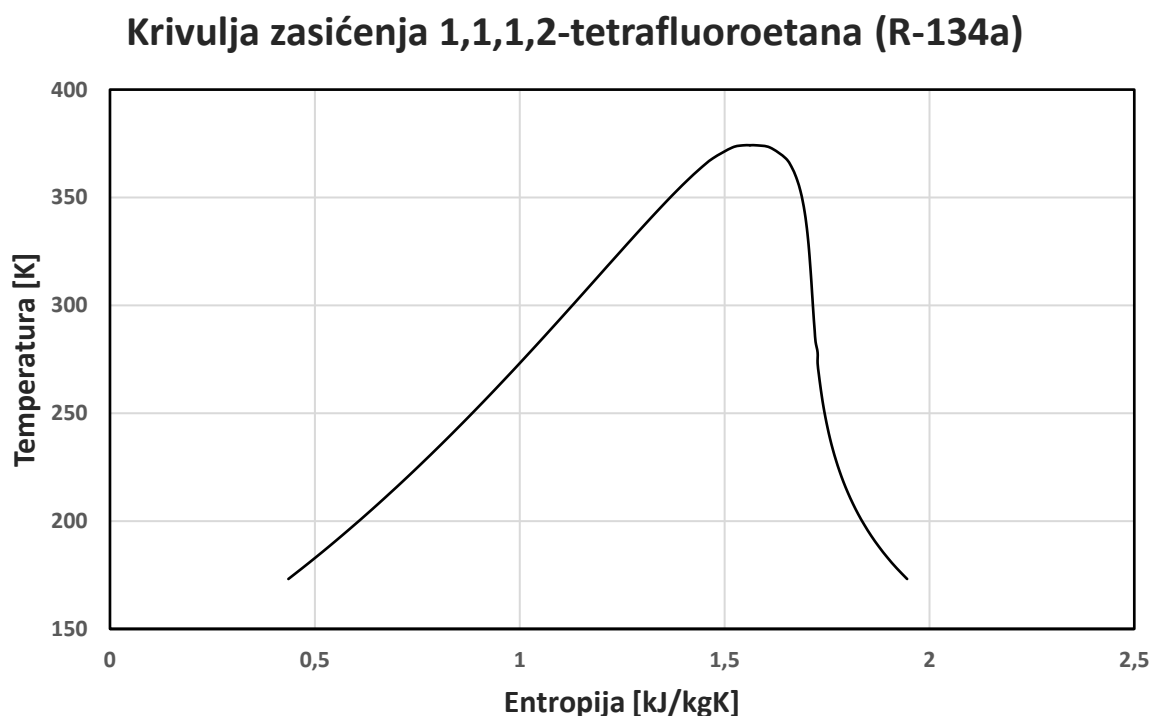
U ovom radu analizira se ORC postrojenje za proizvodnju električne energije uz pomoć solarne energije kao izvora topline. Uspoređivat će se proizvodnja u različitim režimima rada – zimskom, prijelaznom i ljetnom.

Rezultati pokazuju utjecaj implementacije ove vrste sustava na lokacijama sa značajnim brojem sunčanih sati u godini i kako se sunčeva energija u stambenim zgradama ne mora samo vezati za fotonaponske sustave, već i ostale opcije kao što je ORC sustav analiziran u ovom radu.

## 2. ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS

U klasičnom Rankineovom ciklusu vodena para visoke temperature i tlaka ulazi u turbinu gdje se njena kinetička energija pretvara u mehaničku, koja onda preko turbine pokreće generator električne struje. Ovaj ciklus još uvijek prevladava u proizvodnji svjetske potrebe za električnom energijom.

S druge strane, organski Rankineov ciklus (ORC) kao radni medij koristi organsku tvar, koja ima veću molekularnu masu od vode i pozitivan nagib krivulje zasićenja u T,s dijagramu, prikazan na slici 1.



**Slika 1. Krivulja zasićenja organske radne tvari (R-134a)**

Voda ima negativan nagib krivulje zasićenja te se mora pregrijavati kako bi ju mogli iskoristiti za proizvodnju električne energije. Organske radne tvari s pozitivnim nagibom ne moraju se pregrijavati, što predstavlja prednost. Velika molekularna masa povećava efikasnost turbine i smanjuje broj potrebnih stupnjeva turbine – ovo pojednostavljuje cijeli ciklus i čini ga ekonomičnijim.

Najveća prednost im je zapravo niža temperatura isparavanja u odnosu na vodu, što znači da su im potrebni toplinski izvori nižih temperatura.

Kao radni mediji najčešće se koriste su R-245fa, R-134a, R-600a, R-152a, metanol, cikloheksan, n-pentan i ostali. Pri izboru radne tvari mora se obratiti pozornost na njihov utjecaj na okoliš, ali i sigurnost ljudi (otrovnost, zapaljivost). U ovom radu koristi će se R-134a.

Ostale prednosti ovog ciklusa su: manji troškovi održavanja, kompaktnost, manje turbine, odnosno ekspanđeri, s većim brzinama vrtnje, tihi rad.

## 2.1. Izvori topline

Kao što je već navedeno, izvori topline za isparavanje radne tvari mogu biti nižih ili srednjih temperatura, što omogućuje odličnu implementaciju obnovljivih izvora u ovaj ciklus. ORC može biti pogonjen:

- solarnom energijom
- geotermalnom energijom
- biomasom
- otpadnom toplinom

U ovom radu koristit će se solarni izvor energije – pločasti kolektor.

## 2.2. Povijest ORC-a

Škotski inženjer, fizičar i matematičar William John Macquorn Rankine opisao je 1859. godine ciklus s vodenom parom. Organski Rankineov ciklus detaljnije se počeo proučavati i razvijati tek u 20. stoljeću.

Solarna energija počela se primjenjivati između 1902. i 1908., gdje su kao radne tvari korišteni sumporov dioksid, eteri i amonijak. Prvi komercijalni ORC pojavili su se između 1970. i 1980., a koristili su geotermalnu i solarnu energiju.

Danas u svijetu postoji preko 900 ORC elektrana, od kojih je oko 50% na biomasu, nešto manje na otpadnu toplinu, zatim geotermalnu energiju, a najmanje na solarnu energiju. Konstantno se radi na razvoju i povećanju broja elektrana.

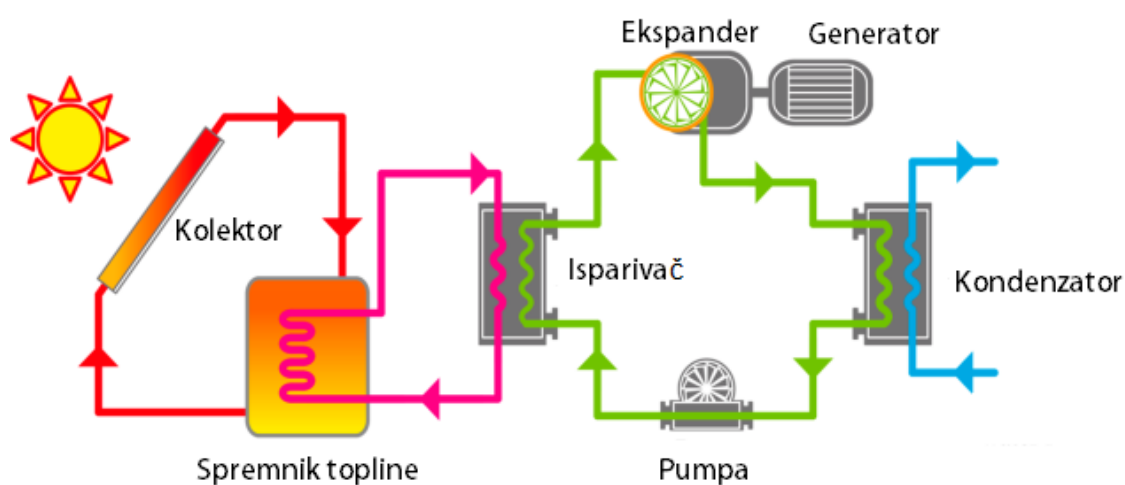
### **2.3. Kogeneracija**

Kombinirano grijanje, hlađenje i proizvodnja električne energije (CCHP) igra veliku ulogu u učinkovitom korištenju energije u industrijskoj i stambenoj primjeni. CCHP sustav smanjuje negativan utjecaj na okoliš i potrošnju energije u usporedbi s odvojenom proizvodnjom topline i električne energije. Jedna mogućnost razvoja stambenih CCHP sustava je integracija sustava proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora topline.

Proizvodnja električne energije pomoću ORC postrojenja ima vrlo nisku učinkovitost, oko 10%, ali uvođenjem kogeneracije raste učinkovitost cijelog postrojenja. Radna tvar ORC-a u kondenzatoru grije rashladnu tekućinu, koja može biti potrošna topla voda ili voda za potrebe niskotemperaturnog grijanja.

### 3. SOLARNO ORC POSTROJENJE

U ovom radu dimenzionirat će se solarno ORC postrojenje koje će proizvoditi električnu energiju za potrebe stambenog objekta površine 800 m<sup>2</sup>. Ovaj objekt zamišljen je kao zgrada s tri kata, ukupne visine 9 metara, gdje se na svakom katu nalaze dva stana od 60 m<sup>2</sup> i četiri stana veličine 40 m<sup>2</sup>. Na temelju prosječne potrošnje električne energije u kućanstvu, procijenjena je potreba za 160 kWh, odnosno oko 6,7 kW električne energije u jednom danu za cijeli objekt, ako ne računamo klima uređaje. Ljeti je potrebno i hladiti prostore, stoga potrebna energija naraste na preko 80 kW.



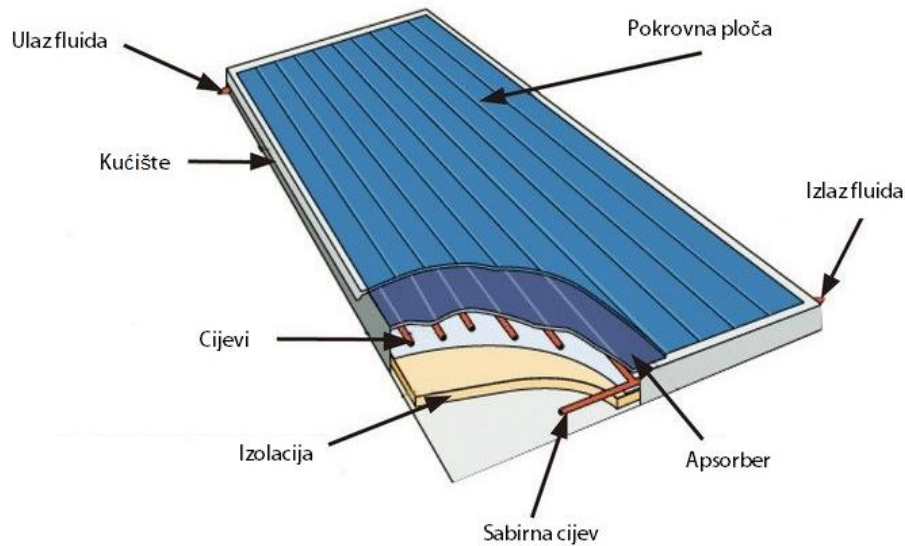
Slika 2. Solarno ORC postrojenje [3]

Solarno ORC postrojenje, prikazano na slici 2, sastoji se od solarnog kolektora, spremnika topline, isparivača, ekspandera, električnog generatora, kondenzatora i pumpe.

U prvom krugu koji se sastoji od solarnog kolektora, toplinskog spremnika i pumpe, a kao radna tvar koristi se glikol. Solarna energija zagrijava maseni protok glikola u kolektoru, koji onda ide u spremnik u kojem grije vodu.

Izabran je pločasti solarni kolektor, prikazan na slici 3. Ovi kolektori imaju apsorber koje je zapravo bakrena površina premazana crnim solarnim premazom s bakrenim cijevima. Prednji pokrov napravljen je od kaljenog stakla s visokom provodljivošću. Kao izolacija uglavnom se koristi kamena vuna. Radni tlakovi mogu ići i do 10 bara, a radne temperature mogu se kretati između 120°C i 200°C.





**Slika 3. Pločasti solarni kolektor [5]**

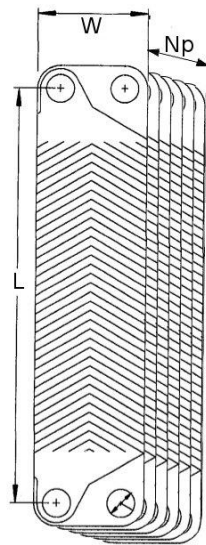
Spremnik topline ispunjen je vodom u kojoj se nalazi uronjena cijev kojom struji glikol. Toplina se s glikola prenosi na vodu, a zbog dobre izolacije spremnika, gubici su mali.

Drugi krug sastoji se od spremnika topline, isparivača i pumpe. Ovdje zagrijana voda iz spremnika topline ulazi u isparivač gdje zagrijava radnu tvar ORC-a R-134a. U sklopu ovog rada, voda se šalje u isparivač tek kada joj temperatura naraste:

- u zimskom režimu do 80°C
- u prijelaznom režimu do 110°C
- u ljetnom režimu do 140°C

Kada temperatura nakon nekog vremena padne natrag na gore navedene vrijednosti, protok vode u isparivač se zaustavlja.

Za isparivač je odabran pločasti izmjenjivač topline, zbog svoje kompaktnosti i veličine (slika 4.)

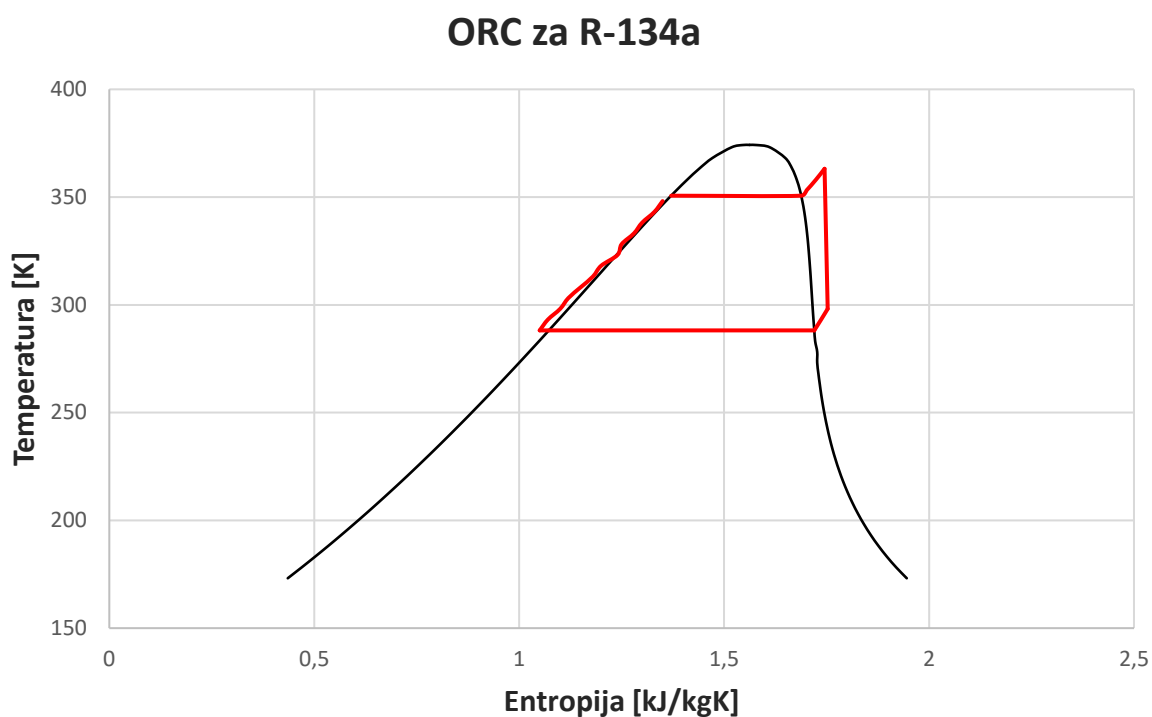


**Slika 4. Pločasti izmjenjivač topline [6]**

U trećem krugu je organski Rankineov ciklus, prikazan na slici 5. Kao radna tvar odabran je freon R-134a. Ciklus se sastoji od isparavanja radne tvari u isparivaču, nakon čega odlazi u turbinu, odnosno ekspander gdje dolazi do pada entalpije čime se dobiva snaga na ekspanderu. Zatim R-134a ide u kondenzator te se pumpom ponovo dovodi u isparivač, čime je zatvoren ciklus.

Ekspander je modificirani pužni kompresor, odabran zbog prije navedenih karakteristika radne tvari. Kondenzator je, kao i isparivač, pločasti izmjenjivač topline.

U sklopu ovog rada odabran je konstantan tlak u isparivaču, odnosno na ulasku u ekspander, od 25 bara. Za tlak kondenzacije odabrano je 5 bara, čime je određen pad entalpije, odnosno specifični rad ekspandera. Snaga ekspandera, a time i snaga na generatoru, određena je masenim protokom R-134a u trećem krugu ovog postrojenja.



**Slika 5. Organski Rankineov ciklus u T,s dijagramu**

<b>Konstante</b>			
	siječanj	travanj	srpanj
$m_1$	0,14 kg/s	0,8 kg/s	1,3 kg/s
$m_2$	0,2 kg/s	0,3 kg/s	0,5 kg/s
$m_3$	0,3 kg/s	0,4 kg/s	0,5 kg/s
$T_v$	8,2°C	14,5°C	26,6°C
<b>Kolektor</b>			
$A_{kol,uk}$	213,36 m <sup>2</sup>		
$M_{kol,uk}$	137,76 kg		
$c_{p,glikol}$	3800 J/kgK		
$\eta_{kol}$	0,95		
$\delta_{kol}$	0,004 m		
$\alpha_{kol}$	1800 W/m <sup>2</sup> K		
$\alpha_v$	100 W/m <sup>2</sup> K		

Toplinski spremnik	
$M_{glikol,i}$	19,8 kg
$M_{cijev,i}$	24 kg
$M_{w,i}$	600 kg
$A_{c,i}$	3 m <sup>2</sup>
$A_{pop,i}$	0,000094 m <sup>2</sup>
$A_{v,i}$	5 m <sup>2</sup>
$\alpha_{gl}$	2100 W/m <sup>2</sup> K
$\alpha_w$	1900 W/m <sup>2</sup> K
$r_1$	0,0145 m
$r_2$	0,0155 m
$\lambda_{\check{c}}$	380W/mK
$c_{p,\check{c}elik}$	460 J/kgK
$c_{p,w}$	4200 J/kgK
$\delta$	0,001 m
Isparivač	
$\alpha_w$	2000 W/m <sup>2</sup> K
$a$	0,005 m
$b$	0,6 m
$\delta_s$	0,0005 m
$\rho_w$	850 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_s$	380 W/mK
Ekspander	
$\eta_{el}$	0,9

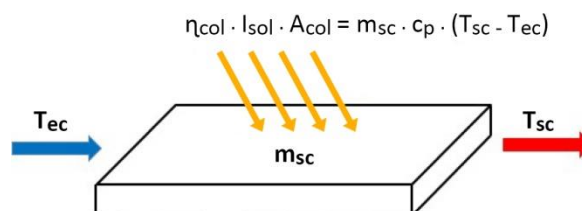
**Tablica 1. Popis korištenih konstanti**

## 4. MATEMATIČKI MODEL

U nastavku će biti prikazane jednačbe koje opisuju termohidrauličke procese u pojedinim komponentama solarnog ORC postrojenja.

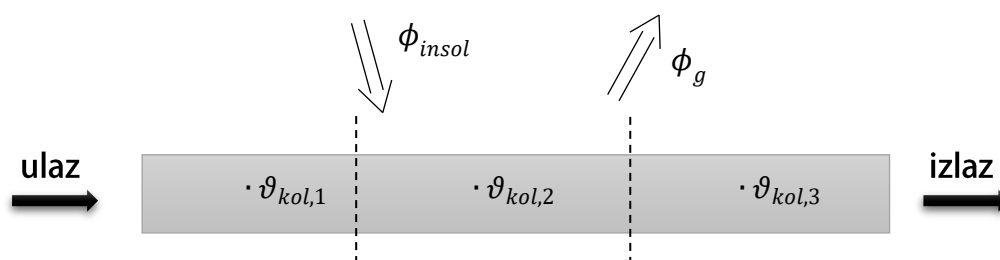
### 4.1. Solarni kolektor

Zbog uporabe u stambenom objektu, odabran je pločasti solarni kolektor pa je cijena proizvodnje i instalacije niža. Pretpostavljeno je da kolektori zauzimaju cijelu površinu krova i položeni su horizontalno (pod kutem od  $0^\circ$ ). Spojeni su serijski kako bi se povećala iskoristivost ciklusa. Izolacija (između kolektora i krova) pretpostavljena je kao idealna, odnosno uzeti su u obzir samo gubici prema zraku. Također, zanemareni su gubici na bočnim stranicama.



Slika 6. Shema kolektora [7]

Ukupna duljina apsorbera kolektora podijeljena je na tri dijela kako bi se simulirala promjena temperature glikola od ulaza do izlaza iz kolektora. Izvedene su energetske jednačbe za glikol.



Slika 7. Diskretizirani model kolektora

Ukupni toplinski tokovi za segment u kolektoru dani su jednačbom (1):

$$\phi_{kol,i} = \phi_{glikol,i} + \phi_{insol,i} - \phi_{g,i} \quad (1)$$

gdje je  $\phi_{kol}$  ukupni toplinski tok u segmentu kolektoru, iz kojeg se dobije promjena temperature unutar istog:

$$\phi_{kol,i} = M_{kol,i} \cdot c_{p,glikol} \cdot \frac{d\vartheta_{kol,i}}{dt} \quad (2)$$

Pretpostavljeno je da se specifični toplinski kapacitet ne mijenja promjenom temperature.  $M_{kol,i}$  je definiran kao umnožak volumena glikola unutar segmenta i njegove gustoće, za koju je također pretpostavljeno da je neovisna o temperaturi.

Toplinski tok koji se prenosi masom glikola  $\phi_{glikol,i}$  jednak je:

$$\phi_{glikol,i} = m_1 \cdot c_{p,glikol} \cdot (\vartheta_{kol,i-1} - \vartheta_{kol,i}) \quad (3)$$

gdje je  $m_1$  protok glikola kroz kolektor.

Dozračeni toplinski tok  $\phi_{insol}$  jednak je:

$$\phi_{insol,i} = A_{kol,i} \cdot I_{kol} \cdot \eta_{kol} \quad (4)$$

gdje je  $\eta_{kol}$  ukupna iskoristivost kolektora, a  $I_{kol}$  dozračena sunčeva energija u  $W/m^2$ . Pretpostavljeno je da sva dozračena energija apsorbira u kolektor, a gubici su uračunati pomoću koeficijenta iskoristivosti. Također se smatra da je sunčeva energija jednoliko raspodjeljena po cijelom kolektoru. Utjecaj nagiba sunčeva zračenja obuhvaćen je preko različitog intenziteta dozračene energije.

Gubici  $\phi_{g,i}$  uslijed izmjene topline s okolišem zbog razlike temperature zraka i površine kolektora dani su izrazom:

$$\phi_{g,i} = k_{kol} \cdot A_{kol,i} \cdot (\vartheta_{kol,i} - \vartheta_v) \quad (5)$$

Pretpostavljeno je da je temperatura površine kolektora jednaka temperaturi glikola, radi jednostavnosti proračuna. Koeficijent prolaza topline dan je jednadžbom (6)

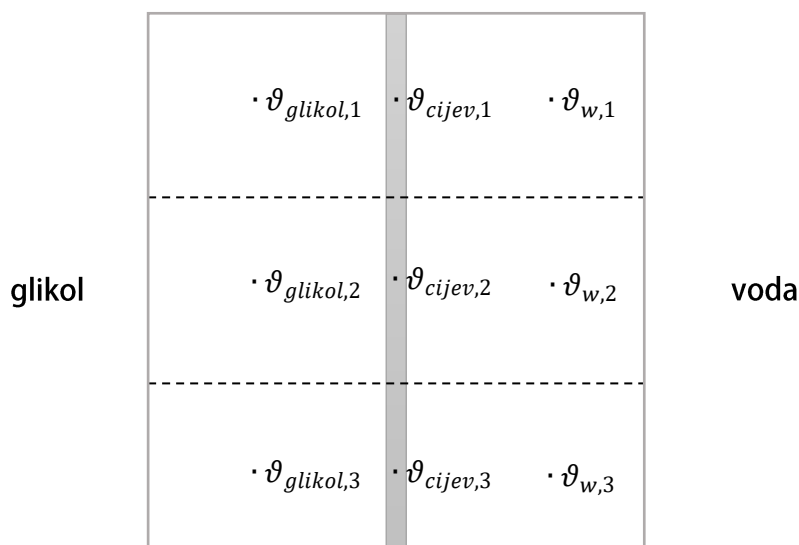
$$k_{kol} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{kol}} + \frac{\delta_{kol}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (6)$$

Konačan oblik diferencijalne jednadžbe iz koje se izvodi simulacija temperatura unutar segmenta kolektora je:

$$\frac{d\vartheta_{kol,i}}{dt} = \frac{m_1 c_{p,glikol} (\vartheta_{kol,i-1} - \vartheta_{kol,i}) + A_{kol,i} I_{kol} \eta_{kol} - k_{kol} A_{kol,i} (\vartheta_{kol,i} - \vartheta_v)}{M_{kol,i} c_{p,glikol}} \quad (7)$$

## 4.2. Toplinski spremnik

Toplinski spremnik je zapravo izmjenjivač topline u kojem glikol prolazeći kroz cijev grije vodu unutar spremnika. Pretpostavljena je konstantna temperatura vode po cijelom spremniku, jednaka onoj na zadnjem segmentu cijevi. Zanemarene su promjene gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta promjenom temperature. Tlak unutar spremnika je veći od okolišnog, kako ne bi došlo do isparavanja vode.



Slika 8. Diskretizirani model toplinskog spremnika

Izvedene su energetske jednadžbe za glikol, vodu te stijenku cijevi na kojoj dolazi do izmjene toplinskog toka između glikola i vode. Duljina cijevi podijeljena je na tri segmenta radi simulacije promjene temperature.

Energetska jednadžba segmenta na strani s glikolom glasi:

$$\phi_{sprem,1,i} = \phi_{glikol,i} - \phi_{konv,gl,i} \quad (8)$$

Promjena temperature glikola dana je jednadžbom (9):

$$\phi_{sprem,1,i} = M_{glikol,i} \cdot c_{p,glikol} \cdot \frac{d\vartheta_{glikol,i}}{dt} \quad (9)$$

Toplinski tok doveden radnom tvari iz kolektora  $\phi_{glikol,i}$  opisan je jednadžbom (10).

$$\phi_{glikol,i} = m_1 \cdot c_{p,glikol} \cdot (\vartheta_{kol,izl} - \vartheta_{glikol,i}) \quad (10)$$

Toplinski tok koji se prenosi na cijev  $\phi_{konv,gl,i}$ :

$$\phi_{konv,gl,i} = k_{c,gl} \cdot A_{c,i} \cdot (\vartheta_{glikol,i} - \vartheta_{cijev,i}) \quad (11)$$

gdje je koeficijent prolaza topline  $k_{c,gl}$  jednak:

$$k_{c,gl} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{gl}} + \frac{r_1}{\lambda_{\check{c}}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{2 \cdot r_1}\right)} \quad (12)$$

Drugu skupinu jednadžbi čine one koje opisuju toplinske tokove za cijev spremnika. Energetska jednadžba segmenta cijevi jednaka je:

$$\phi_{sprem,2,i} = \phi_{konv,gl,i} - \phi_{konv,w,i} + \phi_{pop,i} \quad (13)$$

Toplinski tok iz kojeg se dobije promjena temperature segmenta cijevi dan je jednadžbom (14):

$$\phi_{sprem,2,i} = M_{cijev,i} \cdot c_{p,\check{c}elik} \cdot \frac{d\vartheta_{cijev,i}}{dt} \quad (14)$$

gdje je masa cijevi definirana kao umnožak gustoće i volumena cijevi na tom segmentu. Konvektivni toplinski tok između cijevi i glikola  $\phi_{konv,gl,i}$  dan je jednadžbom (11).

Toplinski tok koji se prenosi s cijevi na vodu u spremniku  $\phi_{konv,w,i}$  dan je jednadžbom (15).

$$\phi_{konv,w,i} = k_{c,w} \cdot A_{c,i} \cdot (\vartheta_{cijev,i} - \vartheta_{w,i}) \quad (15)$$

Koeficijent prolaza topline  $k_{c,w}$  jednak je:

$$k_{c,w} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{r_2}{2 \cdot \lambda_{\check{c}}} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot r_2}{r_1}\right)} \quad (16)$$

Provođenje topline u aksijalnom smjeru u segmentu cijevi dano je jednadžbom (17), a koeficijent prolaza topline jednadžbom (18).

$$\phi_{pop,i} = k_{pop} \cdot A_{pop,i} \cdot [(\vartheta_{cijev,i-1} - \vartheta_{cijev,i}) - (\vartheta_{cijev,i} - \vartheta_{cijev,i+1})] \quad (17)$$

$$k_{pop} = \frac{\lambda_{\check{c}}}{\delta} \quad (18)$$



Uvrštavanjem gornjih jednadžbi u (13) dobije se jednadžba promjene temperature cijevi toplinskog spremnika:

$$\frac{d\vartheta_{cijev}}{dt} = \frac{k_{c,gl}A_c(\vartheta_{glikol} - \vartheta_{cijev}) - k_{c,w}A_c(\vartheta_{cijev} - \vartheta_w) + k_{pop}A_{pop}(\vartheta_{cijev,ul} - 2\vartheta_{cijev} + \vartheta_{cijev,iz})}{M_{cijev} \cdot c_{p,\text{čelik}}} \quad (19)$$

Treća skupina jednadžbi opisuje energetske promjene vode unutar spremnika. Energetska jednadžba vode jednaka je:

$$\phi_{sprem,3,i} = \phi_{w,i} + \phi_{konv,w,i} - \phi_{g,i} \quad (20)$$

Ukupni toplinski tok doveden vodi jednak je:

$$\phi_{sprem,3,i} = M_{w,i} \cdot c_{p,w} \cdot \frac{d\vartheta_{w,i}}{dt} \quad (21)$$

Masa vode unutar spremnika  $M_w$  jednaka je umnošku gustoće vode i volumena. Gustoća i specifični toplinski kapacitet uzeti su kao konstantni, odnosno neovisni o temperaturi.

Toplinski tok izmijenjen u segmentu vode zbog postojanja protoka prikazan je jednadžbom (22):

$$\phi_{w,i} = m_2 \cdot c_{p,w} \cdot (\vartheta_{ulaz,i} - \vartheta_{w,i}) \quad (22)$$

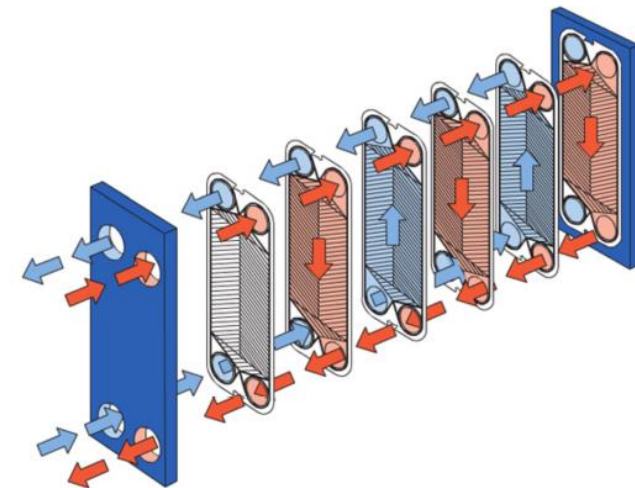
Protok  $m_2$  postoji samo kada temperatura u spremniku naraste do određene zadane vrijednosti i dio vode iz spremnika odvodi se u isparivač. Toplinski tok doveden vodi preko cijevi  $\phi_{konv,w,i}$  dan je jednadžbom (15), a koeficijent prolaza topline  $k_{c,w}$  jednadžbom (16).

Toplinski gubici zbog izmjene topline s okolišem dani su jednadžbom (23)

$$\phi_{g,i} = k_v \cdot A_{v,i} \cdot (\vartheta_{w,i} - \vartheta_{ok}) \quad (23)$$

### 4.3. Isparivač

Zbog specifične primjene i želje za smanjenjem volumena, izabran je pločasti izmjenjivač topline, prikazan na slici 9. Pločasti izmjenjivači topline ističu se malim volumenom, jeftinom izvedbom i visokom učinkovitošću. Raspisane su jednadžbe za jednu ploču ovog isparivača, koja je diskretizirana na šest dijelova i uzeta je u obzir promjena faze radne tvari R-134a.



Slika 9. Pločasti izmjenjivač topline

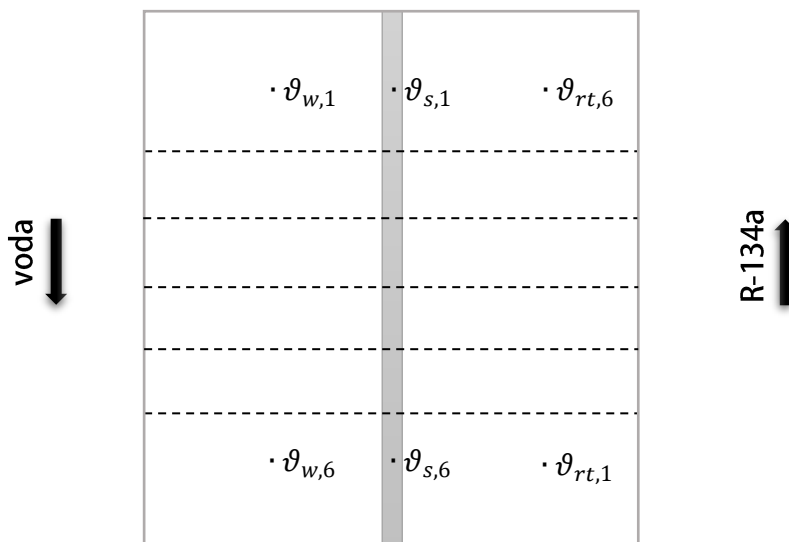
Dimenzioniranje isparivača temelji se na srednjoj logaritamskoj temperaturi, jednadžba (28).

$$DTLM = \frac{\Delta T_{ulaz} - \Delta T_{izlaz}}{\ln \frac{\Delta T_{ulaz}}{\Delta T_{izlaz}}} \quad (24)$$

Ukupna izmijenjena toplina  $Q$  dana je jednadžbom (29),

$$Q = U \cdot A \cdot DTLM \quad (25)$$

gdje je  $U$  ukupni koeficijent prolaza topline i  $A$  ukupna površina izmjenjivača, odnosno isparivača.



**Slika 10. Diskretizirani model isparivača**

Prva skupina jednadžbi opisuje energetske tokove u jednom segmentu na strani vode, protoka  $m_2$ , koja dolazi iz spremnika.

$$\phi_{isp,1,i} = \phi_{w,i} - 2 \cdot \phi_{konv,w,i} \quad (26)$$

Jednadžba (26) prikazuje energetska bilancu na strani vode. U slijedećoj jednadžbi (27) prikazan je ukupni toplinski tok koji se izmjenjuje na strani vode.

$$\phi_{isp,1,i} = M_{w,i} \cdot c_{p,w} \cdot \frac{d\vartheta_{w,i}}{dt} \quad (27)$$

Toplina dovedena zbog postojanja protoka  $m_2$  dana je jednadžbom (28).

$$\phi_{w,i} = m_2 \cdot c_{p,w} \cdot (\vartheta_{ulaz,w} - \vartheta_{w,i}) \quad (28)$$

Gustoća i specifični toplinski kapacitet smatraju konstantnima, kao i u prethodnom modelu za toplinski spremnik.

Toplinski tok izmijenjen sa stijenkom dan je u jednadžbi (29), a koeficijent prolaza topline u jednadžbi (30).

$$\phi_{konv,w,i} = k_{isp,1} \cdot A_{isp,i} \cdot (\vartheta_{w,i} - \vartheta_{s,i}) \quad (29)$$

$$k_{isp,1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{a}{2 \cdot \lambda_{\zeta}}} \quad (30)$$

Konačno, jednažba promjene temperature vode u segmentu isparivača glasi:

$$\frac{d\vartheta_{w,i}}{dt} = \frac{m_2 \cdot c_{p,w} \cdot (\vartheta_{ulaz,w} - \vartheta_{w,i}) - 2 \cdot k_{isp,1} \cdot A_{isp,i} \cdot (\vartheta_{w,i} - \vartheta_{s,i})}{M_{w,i} \cdot c_{p,w}} \quad (31)$$

Druga skupina jednažbi opisuje energetske bilance ploče isparivača. Jednažba (32) prikazuje ukupni toplinski tok koji se izmjenjuje u segmentu ploče.

$$\phi_{isp,2,i} = \phi_{konv,w,i} - \phi_{konv,rt,i} + \phi_{konv,stijenska,i} \quad (32)$$

Jednažba (33) prikazuje ukupni toplinski tok koji se izmjenjuje na stijenci, iz koje definiramo promjenu temperature stijenske.

$$\phi_{isp,2,i} = M_{s,i} \cdot c_{p,s} \cdot \frac{d\vartheta_{s,i}}{dt} \quad (33)$$

Toplinski tok koji se izmjenjuje sa vodom iz spremnika  $\phi_{konv,w,i}$  dan je jednažbom (29), a odgovarajući koeficijent prolaza topline jednažbom (30).

Toplinski tok izmijenjen s radnom tvari R-134a  $\phi_{konv,rt,i}$  prikazan je jednažbom (34), uz odgovarajući izraz za izračun koeficijenta prolaza topline  $k_{isp,2}$  (35).

$$\phi_{konv,rt,i} = k_{isp,2} \cdot A_{isp,i} \cdot (\vartheta_{s,i} - \vartheta_{rt,i}) \quad (34)$$

$$k_{isp,2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{rt}} + \frac{a}{2 \cdot \lambda_{\xi}}} \quad (35)$$

Aksijalni toplinski tok kroz stijenkku izražen je jednažbom (36) i (37).

$$\phi_{konv,stijenska,i} = k_s \cdot A_{s,i} \cdot [(\vartheta_{s,i-1} - \vartheta_{s,i}) - (\vartheta_{s,i} - \vartheta_{s,i+1})] \quad (36)$$

$$k_s = \frac{\lambda_s}{\delta_s} \quad (37)$$

Uvrštavanjem gornjih jednažbi u (32) dobije se diferencijalna jednažba promjene temperature ploče (38):

$$\frac{d\vartheta_{s,i}}{dt} = \frac{k_{isp,1} A_{isp} (\vartheta_{w,i} - \vartheta_{s,i}) - k_{isp,2} A_{isp} (\vartheta_{s,i} - \vartheta_{rt,i}) + k_s A_s (\vartheta_{s,i-1} - 2\vartheta_{s,i} + \vartheta_{s,i+1})}{M_{s,i} c_{p,s}} \quad (38)$$

Treća skupina jednadžbi opisuje promjenu temperature radne tvari R-134a. Energetska bilanca dana je izrazom (39):

$$\phi_{isp,3,i} = \phi_{rt,i} + 2 \cdot \phi_{konv,rt,i} \quad (39)$$

Jednadžba (40) prikazuje ukupni toplinski tok iz kojeg definiramo promjenu temperature R-134a.

$$\phi_{isp,3,i} = M_{rt,i} \cdot c_{p,rt} \cdot \frac{d\vartheta_{rt,i}}{dt} \quad (40)$$

Toplina dovedena zbog postojanja protoka  $m_3$  dana je jednadžbom (41).

$$\phi_{rt,i} = m_3 \cdot c_{p,rt} \cdot (\vartheta_{ulaz,rt} - \vartheta_{rt,i}) \quad (41)$$

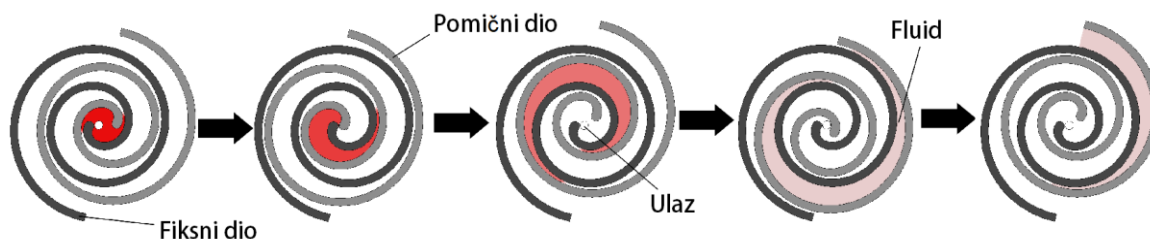
Toplina izmijenjena sa stijenkom  $\phi_{konv,rt,i}$  prikazana je jednadžbom (34), uz odgovarajući koeficijent prolaza topline  $k_{isp,2}$  (35).

Konačno, uvrštavanjem gornjih jednadžbi u (39) dobije se diferencijalna jednadžba promjene temperature R-134a (42):

$$\frac{d\vartheta_{rt,i}}{dt} = \frac{m_3 \cdot c_{p,rt} \cdot (\vartheta_{ulaz,rt} - \vartheta_{rt,i}) + 2 \cdot k_{isp,2} \cdot A_{isp,i} \cdot (\vartheta_{s,i} - \vartheta_{rt,i})}{M_{rt,i} \cdot c_{p,rt}} \quad (42)$$

#### 4.4. Ekspander

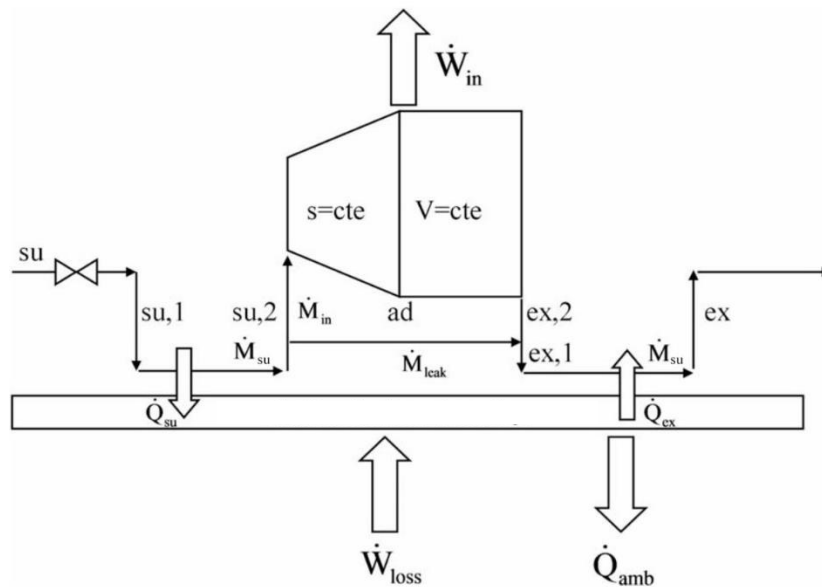
Kao što je navedeno u 2. poglavlju ovoga rada, zbog povoljnih karakteristika radne tvari odabran je pužni (*scroll*) ekspander koji je zapravo modificirani pužni kompresor.



Slika 11. Pužni ekspander [6]

Snaga ekspandera računa se prema izrazu (43). Ulazna entalpija određena je temperaturom i tlakom R-134a na izlazu iz isparivača i fiksirana na određenu vrijednost, jer se regulacija provodi tako da temperatura na izlazu iz isparivača bude konstantna. Sva para nastala u isparivaču ide u ekspander. Entalpija na izlazu iz ekspandera je također fiksirana, stoga je promjena snage uvjetovana promjenom masenog protoka R-134a.

$$P_{eksp} = m_3 \cdot (h_{ul,eksp} - h_{izl,eksp}) \quad (43)$$



Slika 12. Model ekspandera [7]

Snaga dobivena na generatoru dana je izrazom (44), gdje je  $\eta$  efikasnost generatora.

$$P_{el} = \eta_{el} \cdot P_{eksp} \quad (44)$$

## 5. REGULACIJA

Regulacija je ostvarena pomoću nekoliko regulacijskih uređaja. Ostvarena je tako da temperatura R-134a na izlazu iz isparivača bude konstantna, čime je, uz konstantan zadani tlak, jednoznačno određena entropija na ulasku u ekspander.

Protok glikola  $m_1$  u kolektoru uključuje se samo kada je insolacija ( $\text{W/m}^2$ ) veća od nule.

Kada temperatura vode u spremniku topline postane:

- u zimskom režimu veća od  $80^\circ\text{C}$
- u prijelaznom režimu veća od  $110^\circ\text{C}$
- u ljetnom režimu veća od  $140^\circ\text{C}$

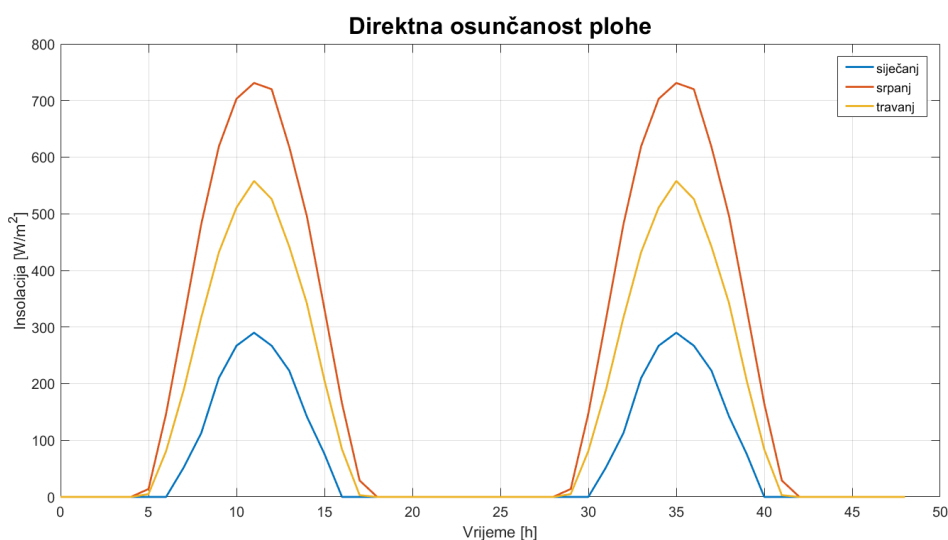
maseni protok vode, u prethodnom poglavlju naznačen kao  $m_2$ , ide u isparivač, čime se pokreće Rankineov ciklus u trećem krugu postrojenja. Kada temperatura vode u spremniku padne ispod gore naznačenih vrijednosti, maseni protok  $m_2$  se zaustavlja.

PI regulatori prilagođavaju maseni protok  $m_3$  tako da temperatura R-134a na izlazu iz isparivača bude konstantna.

## 6. REZULTATI SIMULACIJE

Pomoću programa *MATLAB* i prethodno navedenih jednadžbi dobiveni su odzivi prikazani na slikama. Ulazni podaci o osunčanosti preuzeti su s besplatnog alata *PVGIS (Photovoltaic geographical information system)* za grad Split u Republici Hrvatskoj. Vanjske temperature preuzete su s internet stranica Državnog hidrometeorološkog zavoda. Simulacije su prikazane za dva uzastopna dana u zimskom (siječanj), prijelaznom (travanj) i ljetnom (srpanj) režimu rada.

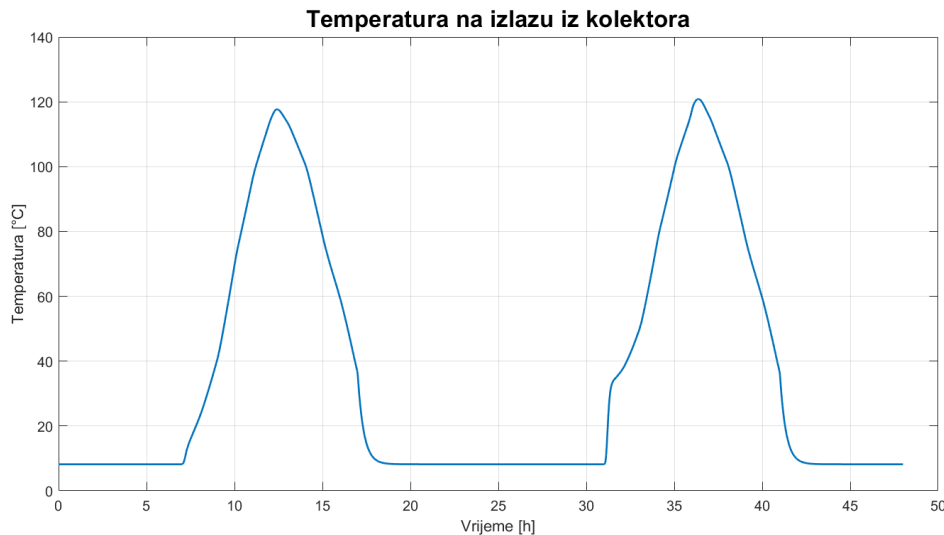
Na slici 13. prikazana je direktna osunčanost plohe za dva uzastopna dana u siječnji, travnju i srpnju, izražena u  $W/m^2$ .



Slika 13. Direktna osunčanost plohe

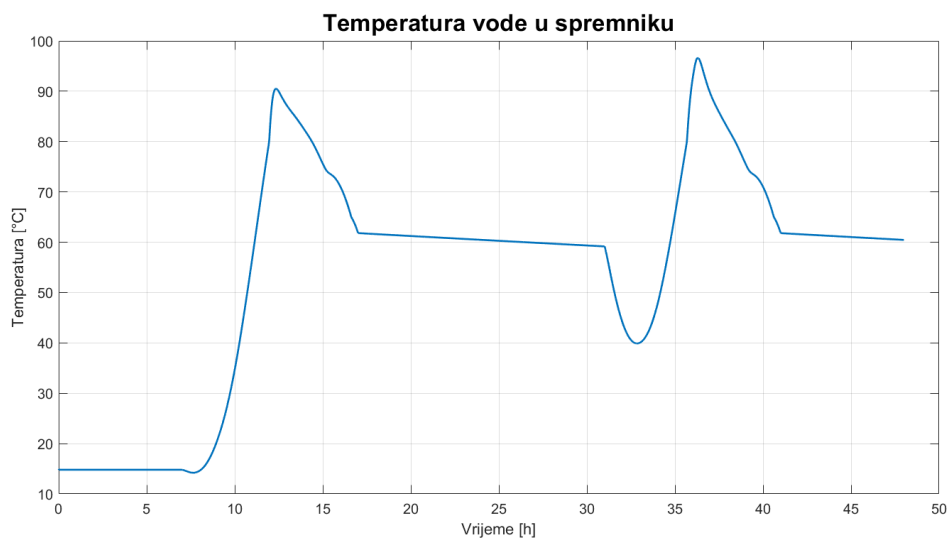


## 6.1. Zimski režim rada



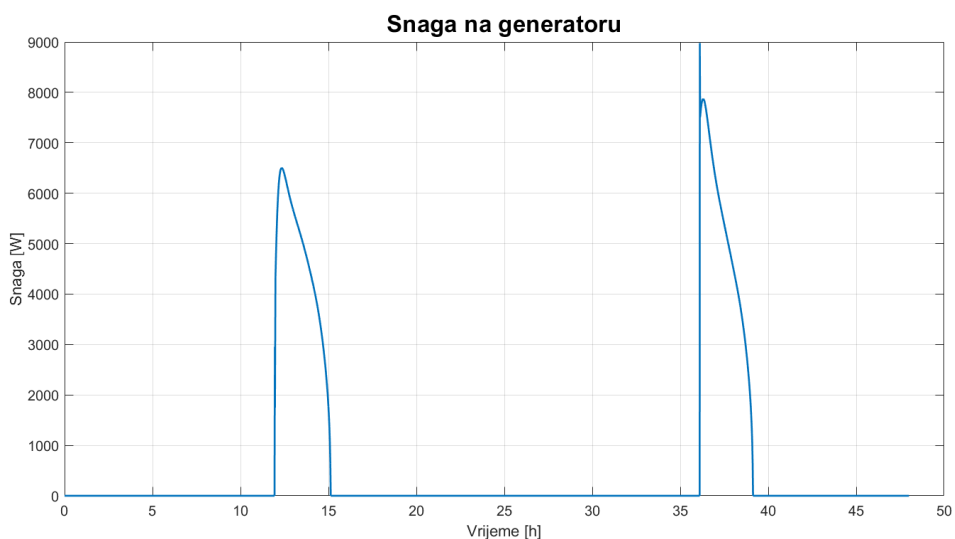
**Slika 14. Temperatura na izlazu iz kolektora**

Na slici 14. prikazana je promjena temperature glikola na izlazu iz kolektora, odnosno na ulazu u spremnik topline (pretpostavljeno je da nema gubitaka topline u transportu). Kao što je i očekivano, promjena temperature prati promjenu količine solarne energije koja pada na kolektor. Postižu se temperature do  $120^{\circ}\text{C}$ . Drugi dan postignute su nešto više temperature unatoč jednakoj pretpostavljenoj osunčanosti. Razlog tomu je manji toplinski tok koji glikol predaje vodi u spremniku u drugom danu, jer se voda ne grije od temperature okoliša, već nešto više, kao što je prikazano na slici 15.



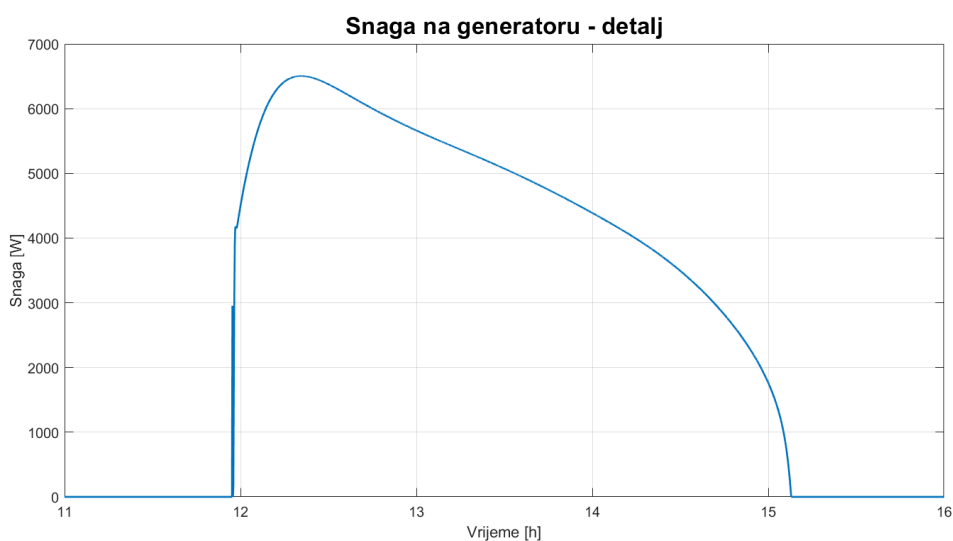
**Slika 15. Temperature vode u spremniku topline**

Također, temperatura vode u spremniku viša je od okolišne čak i kada je osunčanost jednaka nuli, što omogućuje dulji rad pogona u odnosu na postrojenje koje nema spremnik topline. Može se primijetiti kako postoji pad temperature u spremniku u prvoj polovici drugog dana. To je zato što u spremnik ulazi glikol koji se još nije dovoljno zagrijao solarnom energijom, toga se toplina predaje s vode na glikol sve dok temperatura na izlazu iz kolektora ne naraste.

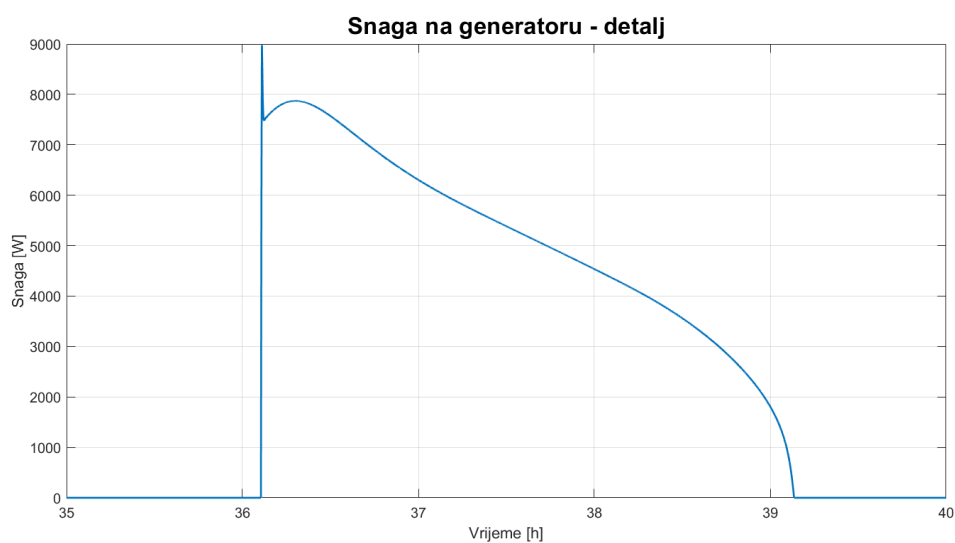


**Slika 16. Električna energija na generatoru**

Kao što je rečeno u prethodnom poglavlju, protok R-134a kroz ekspanzorni ventil bit će veći od nule samo onda kada je temperatura vode u spremniku veća od  $80^{\circ}\text{C}$  u zimskom režimu, stoga će krivulja snage na generatoru izgledati kao na slici 16. Na slikama 17. i 18. prikazana je uvećana krivulja snage za prvi, odnosno drugi dan.



**Slika 17. Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za prvi dan**

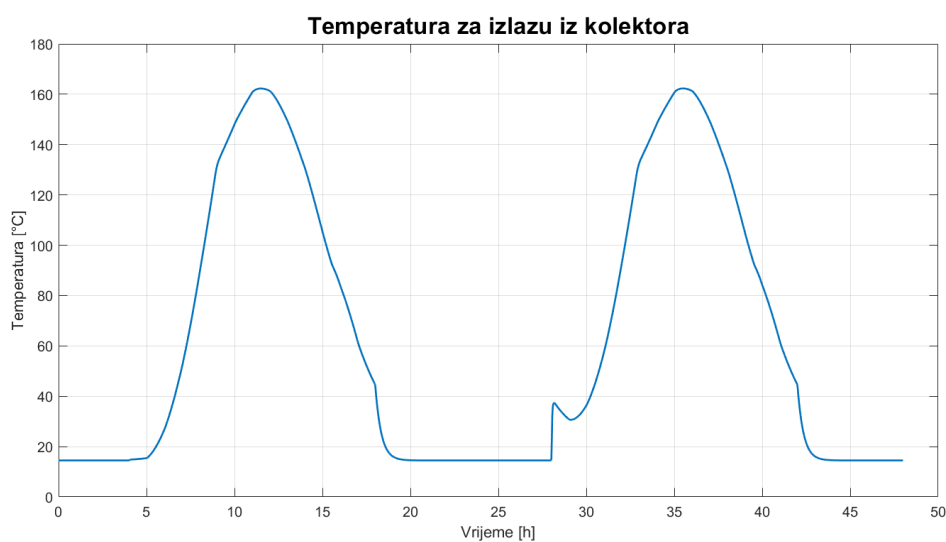


**Slika 18. Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za drugi dan**

Promatranjem dijagrama snage može se uočiti kako je drugi dan snaga veća. Izravan utjecaj na ovo ima implementacija spremnika topline u postrojenje.

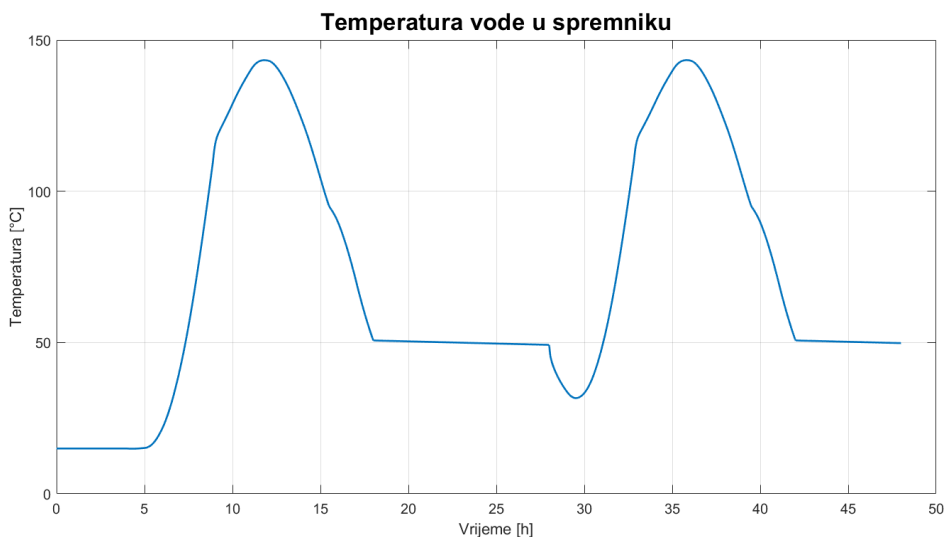
## 6.2. Režim rada u prijelaznom razdoblju

Usporedbom slika 14. i 19. vidljivo je kako se postižu više temperature u kolektoru (do oko  $160^{\circ}\text{C}$ ), što je razumno jer je i osunčanost u travnju veća. U ovom režimu ciklus s R-134a će postojati tek kada mu temperatura na izlazu iz isparivača bude veća od  $110^{\circ}\text{C}$ .

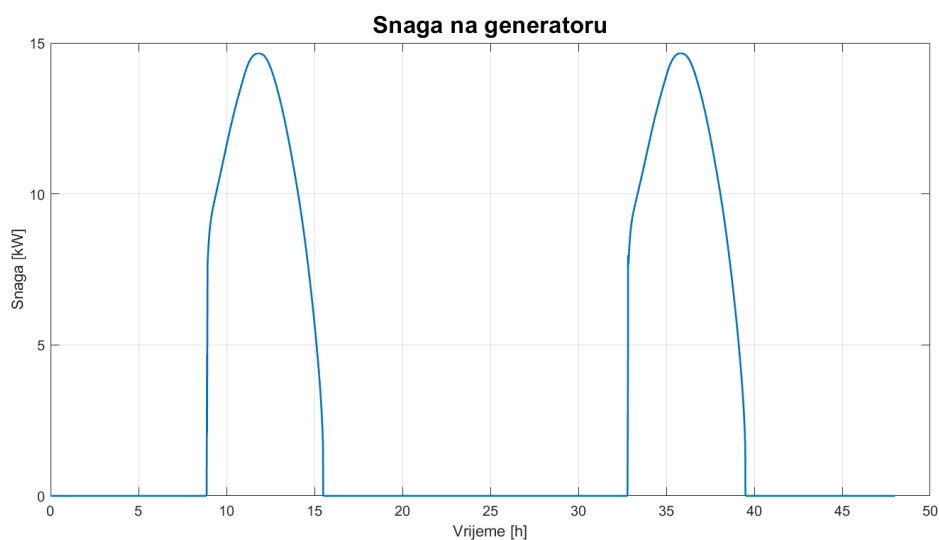


**Slika 19. Temperatura na izlazu iz kolektora**

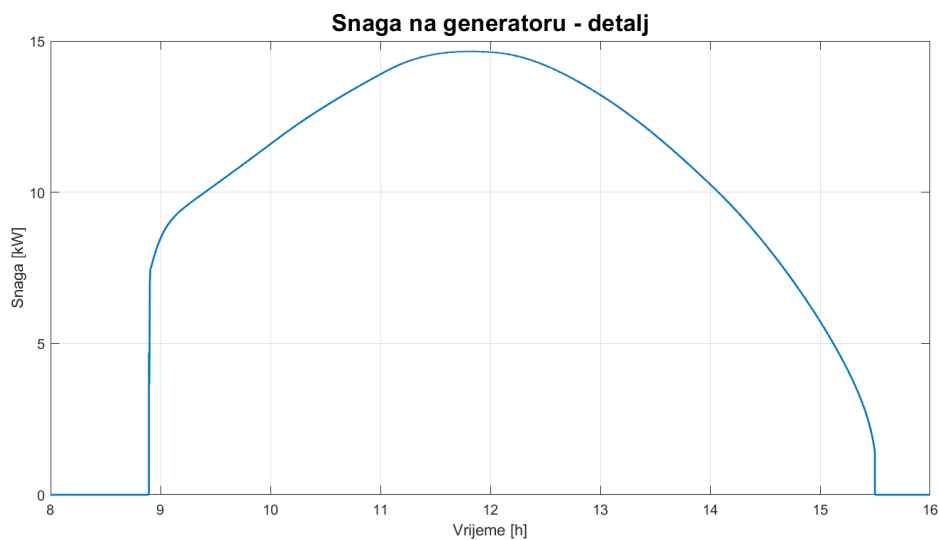
Slijedeće slike (20. – 23.) analogne su slikama 15. – 18., jedino imaju veće vrijednosti parametara. U dijagramima snage vidljivo je kako je proizvodnja snage u prijelaznom režimu skoro dva puta veća od one u zimskom režimu.



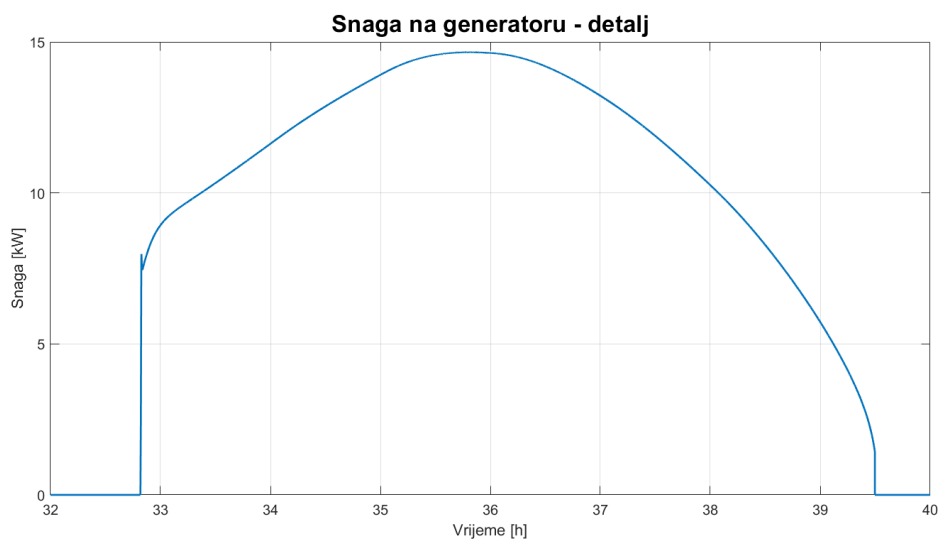
**Slika 20. Temperature vode u spremniku topline**



**Slika 21. Električna energija na generatoru**



**Slika 22. Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za prvi dan**

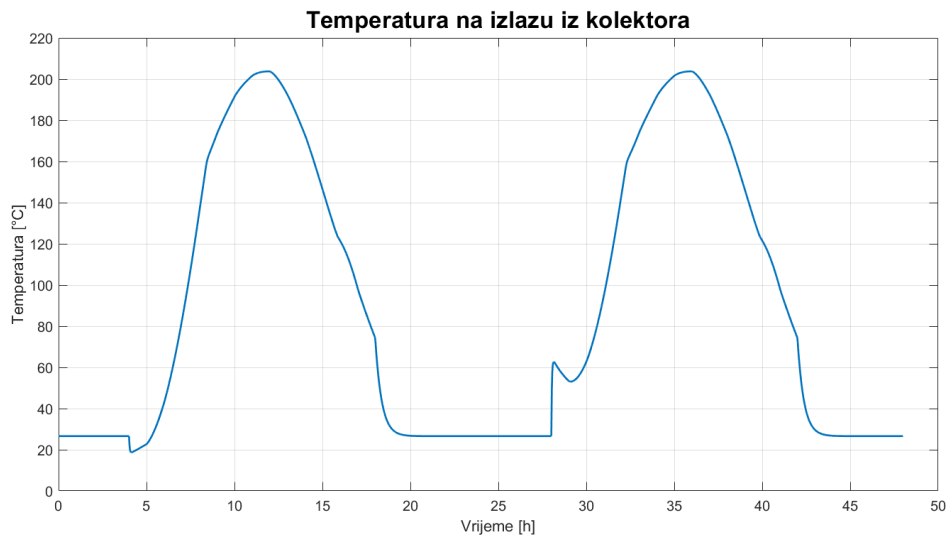


**Slika 23. Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za drugi dan**

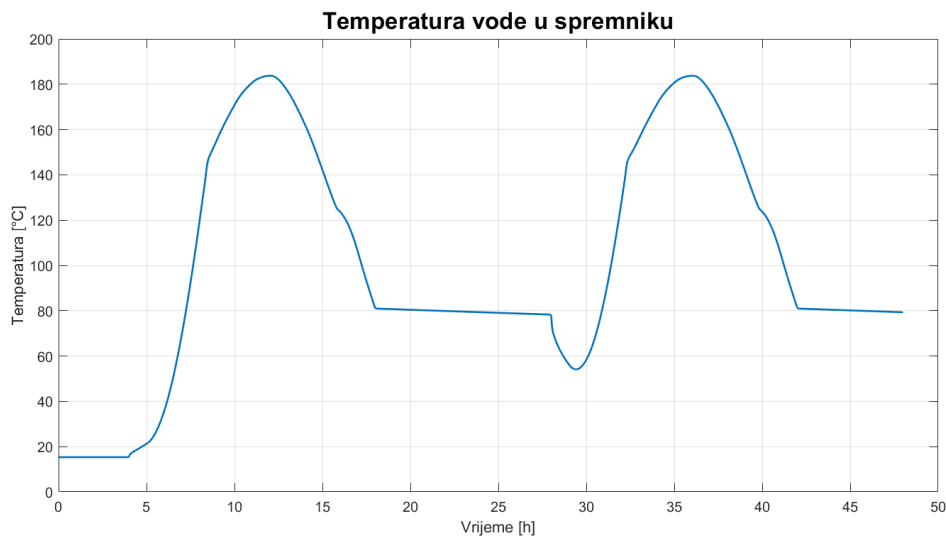
Osim što se postižu veće snage, i vrijeme rada ekspandera, odnosno generatora je duže – zimi proces traje oko tri sata, a u prijelaznom razdoblju preko šest.

### 6.3. Ljetni režim

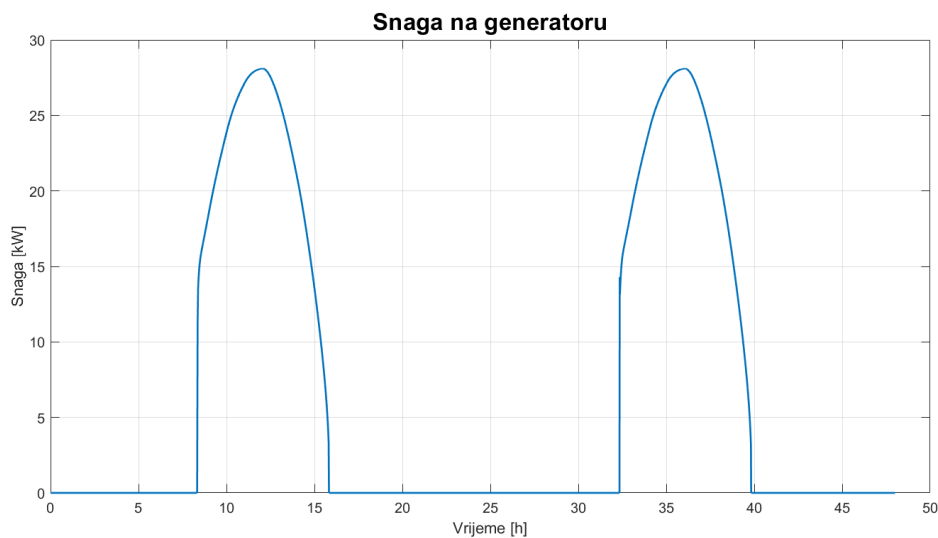
Ljeto su, očekivano, temperature glikola u kolektoru najviše (oko 200°C), a time i temperature vode u spremniku. Regulacijom je protok R-134a veći od nule tek kada je temperatura na izlazu iz isparivača veća od 140°C.



Slika 24. Temperatura na izlazu iz kolektora

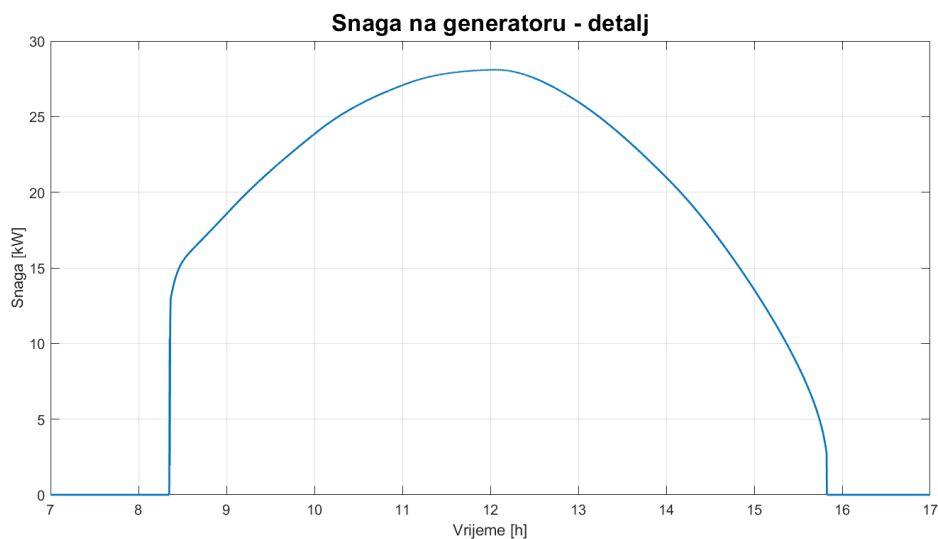


Slika 25. Temperature vode u spremniku topline

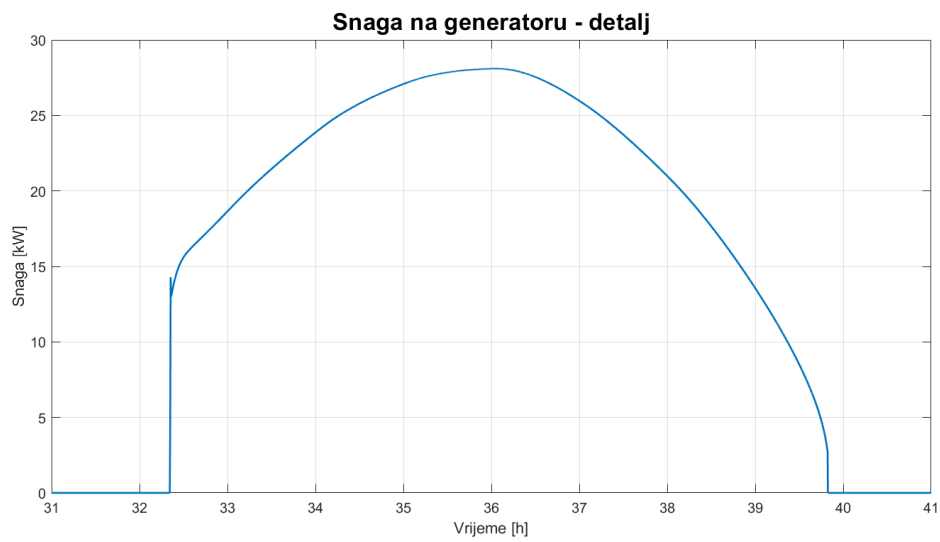


**Slika 26. Električna energija na generatoru**

Ljeti je najveća proizvodnja električne energije, skoro četiri puta veća od proizvodnje zimi, odnosno dva puta u usporedbi s prijelaznim režimom. Također, trajanje procesa ljeti je skoro osam sati.



**Slika 27. Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za prvi dan**



**Slika 28. Električna energija na generatoru – uvećani prikaz za drugi dan**



## 7. ZAKLJUČAK

U radu dimenzionirano je postrojenje s organskim Rankineovim ciklusom za moguću primjenu u stambenom objektu površine 800 m<sup>2</sup>, uz korištenje solarne insolacije kao toplinskog izvora i pločastih solarnih kolektora smještenih na krovu zgrade u Splitu. Postrojenje također ima i toplinski spremnik koji povećava iskoristivost sustava. Dan je matematički model komponenti pomoću kojeg su dobivene simulacije promjena temperatura u pojedinim dijelovima postrojenja te proizvodnje električne energije. Prikazani su rezultati za rad u zimskom (siječanj), prijelaznom (travanj) i ljetnom razdoblju (srpanj).

Proračunata potreba električne energije za ovakav objekt iznosi oko 6,7 kW bez hlađenja, a s hlađenjem preko 80 kW. Iz dijagrama snage na generatoru vidljivo je kako je ova brojka zimi uglavnom nadmašena, dok je u prijelaznom razdoblju proizvedena električna energija jednaka ili veća od potrebne. U tom slučaju, može se razmatrati prodaja viška energije. Ljeti, potrebe za hlađenjem neće biti zadovoljene u potpunosti.

Alternativno, ORC postrojenje može se iskoristiti u režimu pogona dizalice topline, uz odgovarajuću izvedbu jednice za evakuaciju topline energije, pri čemu će radna tvar R-134a iz isparivača ići u kompresor pa u kondenzator. Tamo će toplina iz hlađenog okoliša prelaziti na radnu tvar, koja će se potom prigušiti prije ponovnog ulaska u isparivač. Na taj način moglo bi se ORC postrojenje koristiti u ljetnom periodu isključivo za hlađenje.

Glavni nedostatak ovog sustava je vrijeme rada koje je određeno Sunčevom energijom. Noću ili za oblačne dane nije moguće nadmiriti potrebe za električnom energijom, stoga je potrebno integrirati alternativni izvor topline (npr. kotao na biomasu). Prednost je što izvori topline ne moraju imati visoke temperature.

Veliki izazov komercijalnom razvoju proizvodnje električne energije pomoću ORC sustava u stambenim objektima predstavljaju smanjenje troškova i problemi u održavanju. Iako se trenutno ne smatra zreloom tehnologijom, postoji veliki potencijal za razvoj u stambenoj primjeni.

---

**LITERATURA**

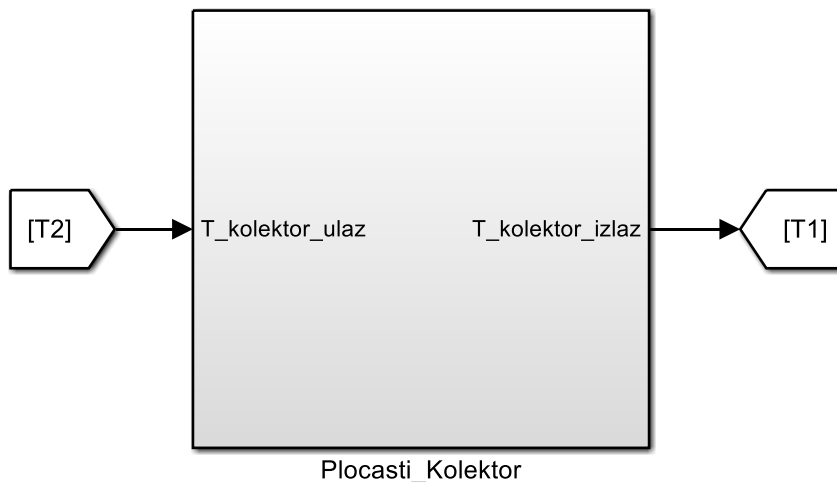
- [1] <http://www.kcorc.org/en/science-technology/history/>
- [2] <https://orc-world-map.org/>
- [3] S. Baral, D. Kim, E. Yun, K. Chun Kim: Experimental and Thermo-economic Analysis of Small-Scale Solar Organic Rankine Cycle (SORC) System, School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Korea, 2015.
- [4] <http://www.horvatic.hr/>
- [5] <http://yousense.info/666c6174/flat-plate-solar-air-collectors-mathematical-modeling.html>
- [6] Sylvain Quoilin: Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications, University of Liège, 2011.
- [7] Irene Garcia-Saez, Juan Méndez, Carlos Ortiz, D. Loncar, J.A. Becerra, R. Chacartegui: Energy and economic assessment of Solar Organic Rankine Cycle for Combined Heat and Power generation in residential applications
- [8] A. Galović: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [9] B. Halas, A. Galović, I. Boras: Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [10] J. Facão, A. Palmero-Marrero, A. C. Oliveira: Faculty of Engineering, University of Porto (New Energy Tec. Unit), Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
- [11] <http://www.horvatic.hr/proizvodi/solarni-kolektori-1/>

---

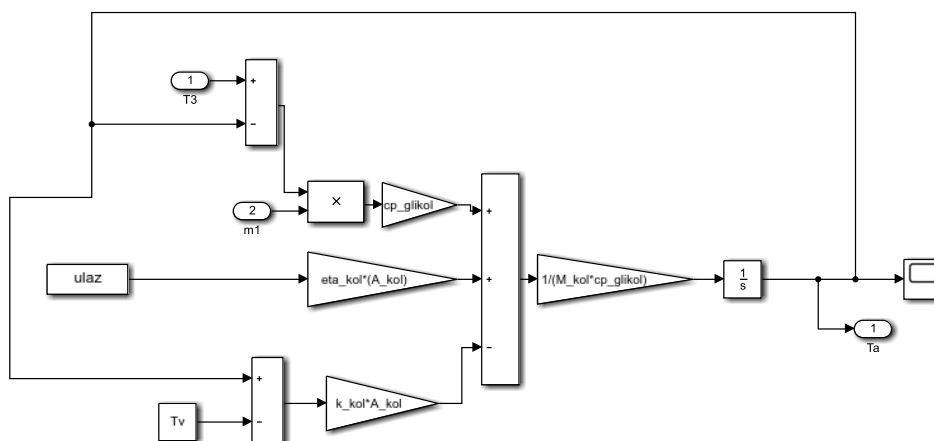
## **PRILOZI**

### I. Simulink sheme

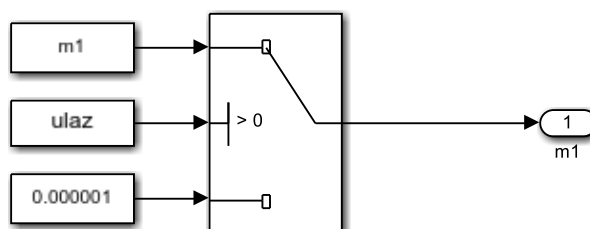
I. Simulink sheme



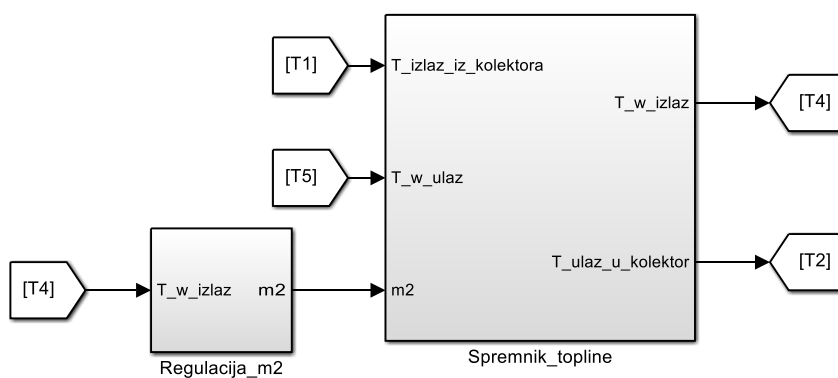
Schema 1 Kolektor



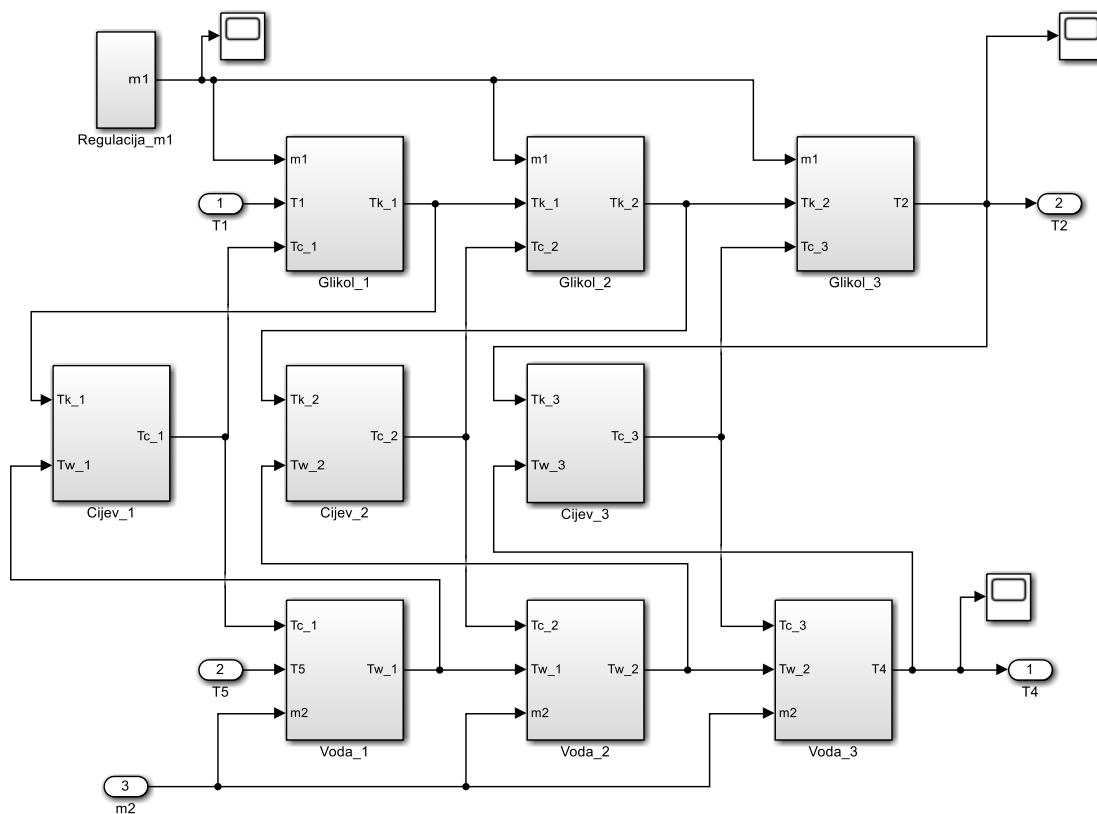
Schema 2 Segment kolektora



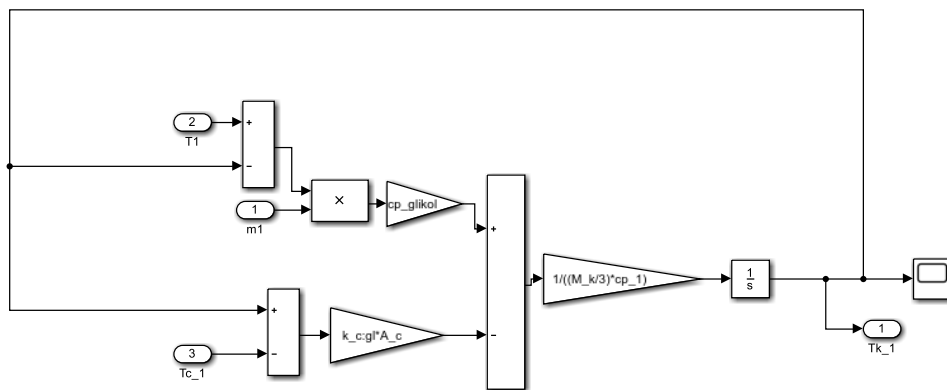
Schema 3 Regulacija protoka glikola



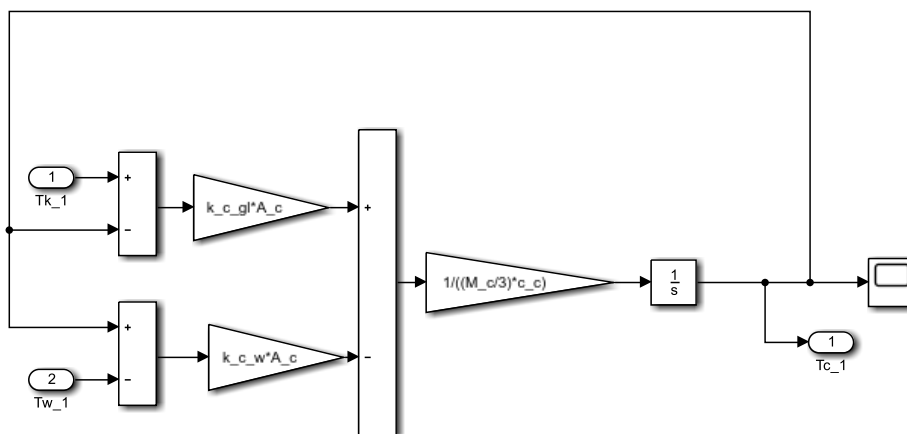
Schema 4 Spremnik topline



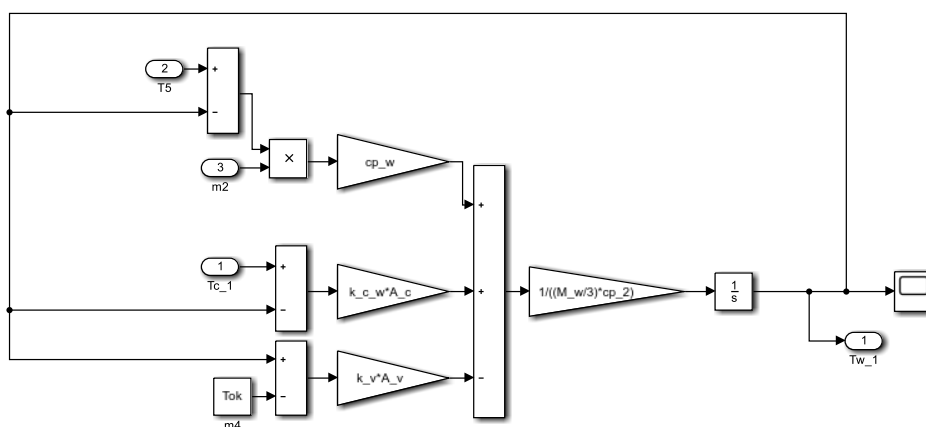
Schema 5 Model spremnika topline



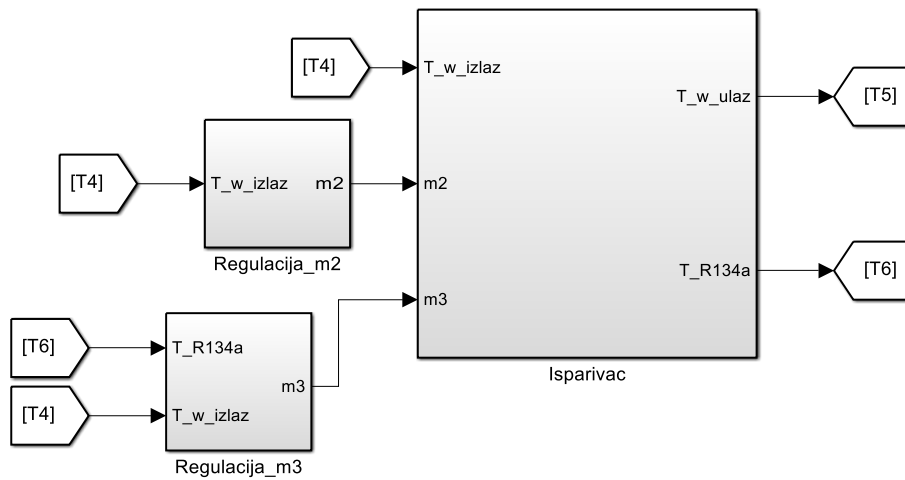
Shema 6 Segment glikola u toplinskom spremniku



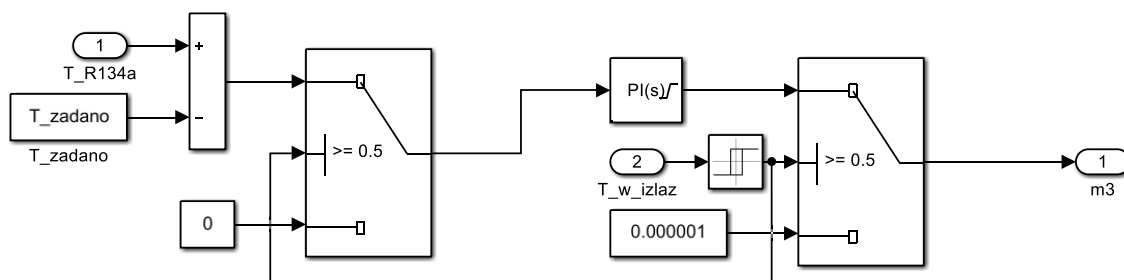
Shema 7 Segment cijevi toplinskog spremnika



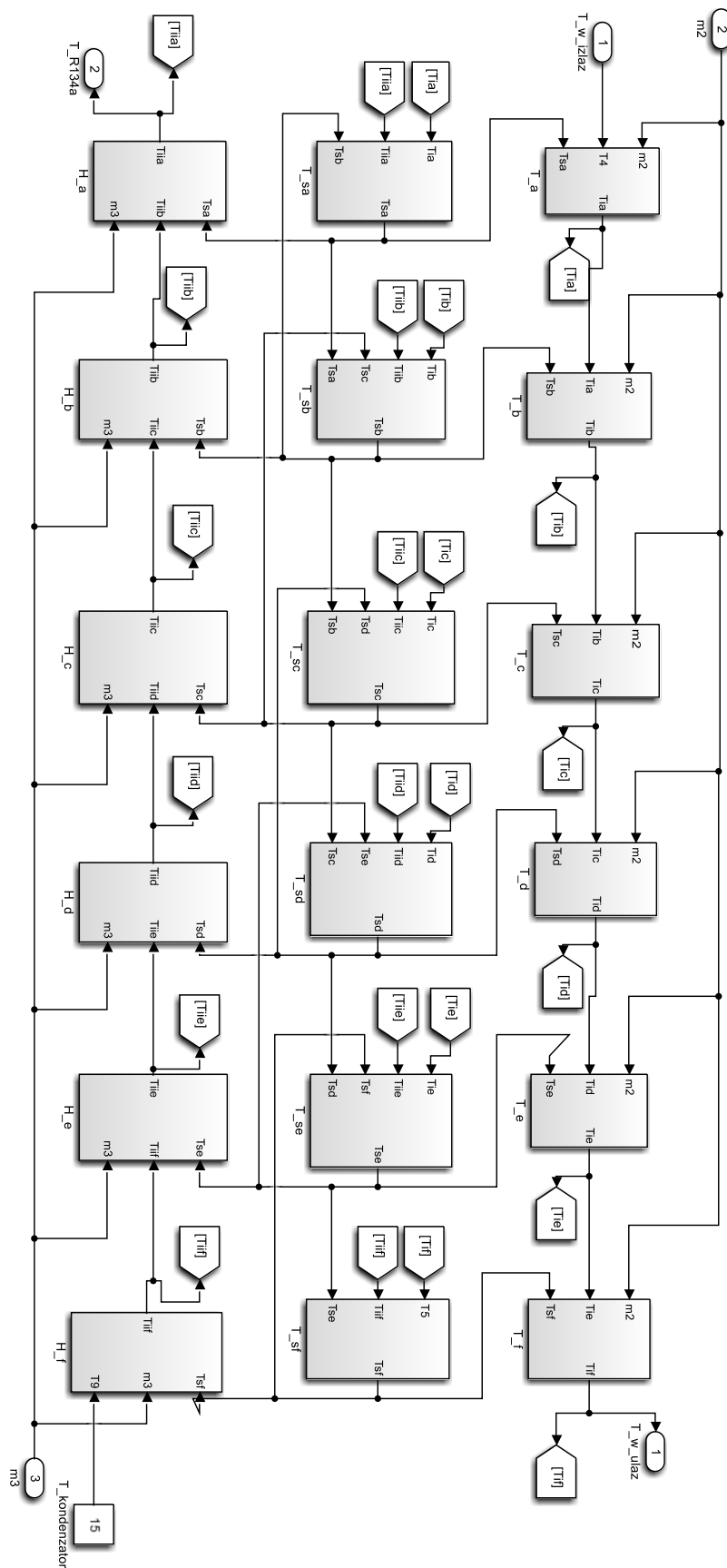
Shema 8 Segment vode u toplinskom spremniku



Shema 9 Isparivač

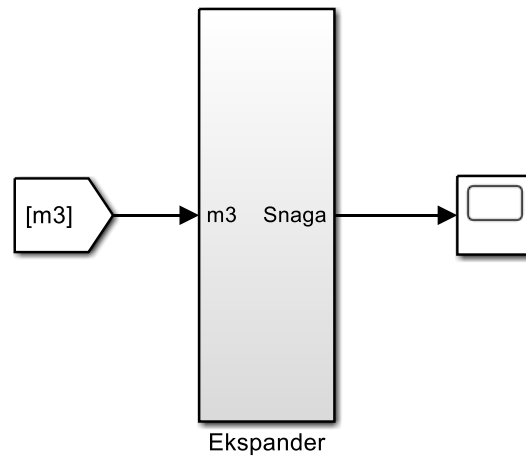


Shema 10 Regulacija protoka isparivača

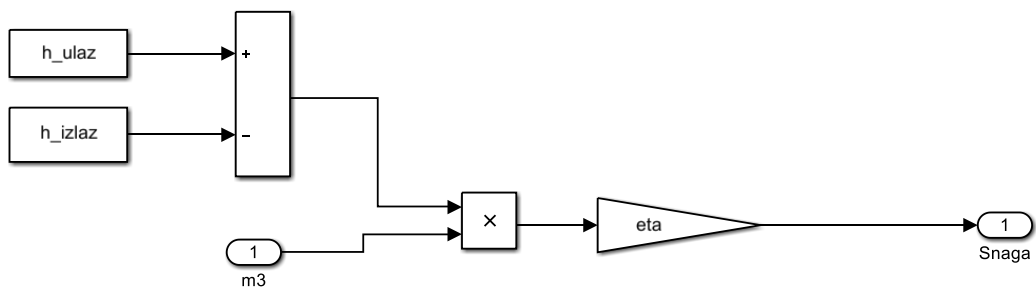


Shema 11 Model isparivača





Shema 12 Ekspander



Shema 13 Model ekspandera