

# Simulacija sustava za regulaciju temperature staklenika

---

**Bilić, Jakov**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:570321>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Jakov Bilić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nenad Ferdelji, dipl. ing

Student:

Jakov Bilić

Zagreb, 2023.

*Mojem tati*

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

Aachen, veljača 2023.

Jakov Bilić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jakov Bilić**

JMBAG: **0035222721**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija sustava za regulaciju temperature staklenika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulation of greenhouse temperature control system**

Opis zadatka:

Jedan od načina za osiguravanje kontroliranog uzgoja povrća tijekom zimskog perioda je upotreba staklenika, koji pružaju zaštitu biljkama od vanjskih uvjeta, ali i postižu efekt akumulacije sunčeve energije unutar prostora staklenika. Međutim, zbog vrlo niskih temperatura tijekom zimskih mjeseci intenzitet zračenja sunčeve energije nije dovoljan da se u stakleniku postigne željena temperatura pa je nužno osigurati sustav koji bi nadoknadio toplinske gubitke staklenika.

Za dva staklenika, svaki površine 1 ha, koji se nalaze u blizini meteorološke postaje Gradište, a služe primarno za kontrolirani uzgoj rajčice, potrebno je definirati sustav koji bi održavao temperaturu u stakleniku unutar dozvoljenih granica. Kao dodatni izvor topline, na toj lokaciji dostupna je geotermalna topla voda stalne temperature 64 °C.

Za zadane uvjete, u radu je potrebno:

- temeljem dostupne literature definirati optimalni temperaturni raspon u stakleniku i potreban broj izmjena zraka te izračunati toplinske gubitke staklenika za jedan karakterističan zimski dan,
- definirati glavne komponente sustava koji bi osiguravao zadanu temperaturu pod a), iskorištavajući pri tome dostupni geotermalni izvor tople vode,
- izraditi funkcionalnu shemu sustava pod b),
- simulirati rad takvog sustava korištenjem jednostavne regulacijske sheme, koja bi osiguravala maksimalno iskorištavanje geotermalnog izvora tople vode,
- prikazati promjenu temperature zraka unutar staklenika tijekom jednog karakterističnog zimskog dana na zadanoj lokaciji te analizirati koliko se dodatno toplinskog toka mora dovoditi u staklenike putem vanjskog izvora topline kada geotermalni izvor ne može pokriti postojeće toplinske gubitke.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2022.

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Nenad Ferdelji

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. GRIJANJE STAKLENIKA.....	2
2.1. Stvarni sustav.....	3
3. OPIS KOMPONENTI I TEORIJSKA POZADINA RADA.....	4
3.1. Ogrjevno tijelo – tračnice .....	4
3.2. Geotermalni izvor topline[13] .....	7
3.3. MIJEŠAJUĆI TROPUTNI VENTIL (Walther E. , 2021) .....	9
3.3.1. Određivanje protoka i temperature miješanja [2] .....	9
3.4. PID KONTROLA VENTILA [2].....	11
3.5. Spremnik tople vode .....	13
3.6. Dogrijavajući kotao.....	15
4. METODOLOGIJA SIMULACIJE .....	17
4.1. Regulacija toplovodnog grijanja.....	17
4.2. Regulacija u simulaciji.....	17
5. REZULTATI .....	20
5.1. Opis rezultata.....	20
6. ZAKLJUČAK.....	31
7. LITERATURA .....	32

## POPIS SLIKA

Slika 3-1: Shematski prikaz simuliranog sustava grijanja .....	4
Slika 3-2: Prikaz kontrolnih volumena cijevi .....	6
Slika 3-3: Korištenje geotermalne energije s obzirom na temperaturu geotermalnog fluida .....	8
Slika 3-4: Geotermalno postrojenje.....	8
Slika 3-5: Prikaz karakteristike troputnog miješajućeg ventila [10] .....	10
Slika 3-6: Kotlovnica.....	10
Slika 3-7: P&ID kontrola ventila .....	12
Slika 3-8: Troputni miješajući ventili.....	12
Slika 3-9: Pojednostavljeni prikaz spremnika tople vode ( <i>buffer</i> ).....	14
Slika 3-10: Dva toplinski izolirana <i>buffer</i> -a .....	15
Slika 3-11: Kotao “dogrijač” .....	16
Slika 5-1: Vanjska temperatura.....	20
Slika 5-2: Temperatura zraka u stakleniku .....	21
Slika 5-3: Snaga kotla i geotermalne bušotine .....	22
Slika 5-4: Temperatura polaza i povrata.....	22
Slika 5-5: Postotak otvorenosti ventila .....	23
Slika 5-6: Ovisnost utrošene snage kotla o karakteristici ventila .....	24
Slika 5-7: Ovisnost temperature staklenika o karakteristici ventila .....	25
Slika 5-8: Snaga grijača u odnosu na gubitke .....	26
Slika 5-9: Snaga kotla i geotermalnog izvora topline .....	27
Slika 5-10: Ušteda energije korištenjem većeg spremnika tople vode.....	28



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1: Režimi rada.....	19
-----------------------------	----

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a$	-	Autoritet ventila
$A_B$	$m^2$	Površina povprečnog presjeka spremnika topline
ACH	1/h	Izmjena zraka po satu
$c_{pw}$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet vode
$c_{pZR}$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet zraka
$d_{u(r_u)}$	m	Unutarnji promjer (polumjer) cijevi
$d_{v(r_u)}$	m	Vanjski promjer (polumjer) cijevi
$g$	$m/s^2$	Gravitacijsko ubrzanje
$Gr$	-	Grashofov broj
$Kp$	-	Konstanta proporcionalnosti
$Nu$	-	Nusseltov broj
$P_i$	m	Opseg spremnika topline
Pr	-	Prandlot broj
$q$	$W/m^2$	Toplinski tok cijevi sveden na jedinični površinu
$q_{m_{supp}}$	kg/s	Maseni protok polaznog toka
$Q_v$	$m^3/s$	Protok kroz ventil
Re	-	Reynoldsov broj
$t$	s	Vrijeme
$T_\infty, \vartheta_\infty$	K	Temperatura vanjskog okoliša
$T_c$	K	Temperatura stijenke cijevi
$T_{ret}$	K	Temperatura povratnog toka
$T_S, \vartheta_S$	K, °C	Temperatura staklenika
$T_{sup}$	K	Temperatura polaznog toka
$U_s$	$W/m^2K$	Koeficijent prolaza topline staklenika
$V_S$	$m^3$	Volumen staklenika
$w_u$	m/s	Brzina unutar cijevi
$\alpha_B$	$W/m^2K$	Termalna difuzivnost
$\alpha_u$	$W/m^2K$	Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj stijenci cijevi
$\alpha_v$	$W/m^2K$	Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj stijenci cijevi
$\Delta p_o$	Pa	Pad tlaka u sustavu
$\Delta p_v$	Pa	Pad tlaka na ventilu
$\lambda_w$	$W/mK$	Provodljivost vode
$\nu$	$m^2/s$	Kinematička viskoznost
$\rho_w$	$kg/m^3$	Gustoća vode
$\rho_{ZR}$	$kg/m^3$	Gustoća zraka

$\Phi_K$	W	Snaga kotla
$\Phi_T$	W	Toplinski učin ogrjevnog tijela

## **SAŽETAK**

U sklopu završnog rada izrađena je simulacija zagrijavanja staklenika tijekom standardnog zimskog dana. Simulacija je napravljena u programskom jeziku Python. Sustav grijanja sastoji se od geotermalnog izvora topline, spremnika tople vode, kotla i ogrjevnog tijela. Regulacija sustava odvija se u dva stupnja, regulacija protoka i temperature.

Ključne riječi: Simulacija, Python, grijanje, staklenik

## **SUMMARY**

As part of the final work, a simulation of the heating of the greenhouse during a standard winter day was created. The simulation was made in the Python programming language. The heating system consists of a geothermal heat source, a hot water tank, a boiler and a heating element. System regulation takes place in two stages, flow and temperature regulation.

Key words: Simulation, Python, heating, greenhouse

## 1. UVOD

Proizvodnja hrane se mijenja rapidno, kao i razvoj tehnologije uopće. Globalizacija, rast broja stanovnika te klimatske promjene su veliki problemi modernog doba. Osim što sve manje ljudi živi u ruralnim područjima, gdje je smještena proizvodnja zbog velikih obradivih površina, nepredvidiva klima predstavlja sve veći problem. Nestabilni i „neprirodni“ uvjeti su sve češći, što pak dovodi do ozbiljnih i često nepremostivih problema kod uzgoja voća i povrća na otvorenom. Staklenička proizvodnja pokazala se kao učinkoviti pristup kod proizvodnje povrća rješavanjem nestabilnih vremenskih uvjeta staklom natkrivenom površinom i kontroliranom klimom. Kontrola klimatskih uvjeta unutar staklenika produžuje period proizvodnje sa svega par mjeseci godišnje s dovoljno Sunčevog zračenja tj. pogodnim temperaturama na gotovo cijelu godinu. Omjeri proizvedene količine po površini tla, te proizvedene količine u godini dana jesu razlozi zašto staklenička proizvodnja postaje norma. Navedeni način proizvodnje je nov i dolazi s mnogo neriješenih problema s raznih područja znanosti. Novi pristupi uzgoju, gnojivima i zaštiti biljke, novi sustavi upravljanja i analize podataka te problemi sa energijom i dobavom vode za navodnjavanje se svakodnevno ažuriraju i nadopunjavaju. Staklenici su za biljke kao zgrade za ljude. Potrebna je adekvatna ventilacija, grijanje i hlađenje kako bi biljke dale svoj maksimum. Potrebe za kondicioniranjem zraka ovise o geografskom položaju staklenika te o sorti same biljke. Predmet rada je staklenik na području Istočne Slavonije u Bošnjacima s proizvodnjom rajčice. Zime u Slavoniji su jake i temperature padaju i do  $-20^{\circ}\text{C}$ , tako da snaga sustava grijanja mora biti pozamašna. Nakon nekoliko godina rada postalo je jasno da će biti potreban novi, ekonomičniji izvor topline od plinskog bojlera te je iskopana geotermalna bušotina. Temperatura bušotine za ovaj rad je pretpostavljena kao konstanta  $60^{\circ}\text{C}$  uz protok u rasponu od 10 l/s do 30 l/s. Simulacija grijanja provodi se u svrhu analize sustava, naknadno se može koristiti za detaljniju analizu regulacije, nove opreme, novih izvora topline i sl. Sustav je u svrhu ovog rada znatno pojednostavljen, no i dalje pruža pouzdanu sliku situacije u stakleniku. Komponente u sustavu su geotermalni izvor, spremnik tople vode, kotao koji snabdjeva sustav energijom u slučaju da je geotermalni izvor nedostatan te cjevovod kao ogrjevno tijelo u stakleniku. Radi jednostavnosti je također zadana temperatura u stakleniku zadana kao konstanta iako temperatura ovisi o dobu dana tj. odgovorna osoba (tehnolog) odlučuje koje su temperatura povoljne u pojedinoj situaciji za biljku.

## 2. GRIJANJE STAKLENIKA

Grijanje u staklenicima gotovo uvijek je toplovodno s različitim izvorima topline, u manjem broju se izvodi s toplim zrakom. Izvori topline najčešće su kotlovi na plinovito i tekuće, a rjeđe i kruto gorivo (briketi). Sve je češća primjena dizalica topline s tlom kao toplinskim izvorom. Izvedbe ogrjevnih tijela variraju s obzirom na sortu i geografski položaj. Ustalila se primjena dugih cjevovoda koji prolaze kroz staklenik na nekoliko razina za toplovodne sustave te zračnih kanala pri dnu staklenika za grijanje na topli zrak. Parametri i zahtjevi na koje je potrebno obratiti pozornost kod dimenzioniranja sustava grijanja su:

**Raspodjela topline:** Vruću vodu treba ravnomjerno rasporediti po stakleniku kako bi se osiguralo dosljedno grijanje. To se može postići pomoću mreže cijevi ili pomoću cijevi koje prolaze ispod gredica ili klupa.

**Izolacija:** Cijevi i druge komponente sustava trebaju biti dobro izolirane kako bi se smanjio gubitak topline i poboljšala energetska učinkovitost.

**Sigurnosne značajke:** Sustav bi trebao imati sigurnosne značajke kako bi se spriječilo pregrijavanje i druge potencijalne opasnosti. Tu se ubrajaju ventili za smanjenje tlaka, temperaturni senzori i automatski prekidače za isključivanje.

**Održavanje:** Redovito održavanje važno je kako bi se osiguralo ispravno funkcioniranje sustava i kako bi se identificirali potencijalni problemi prije nego što postanu ozbiljniji. To može uključivati pregled cijevi i ventila, provjeru curenja i čišćenje sustava prema potrebi.[5]

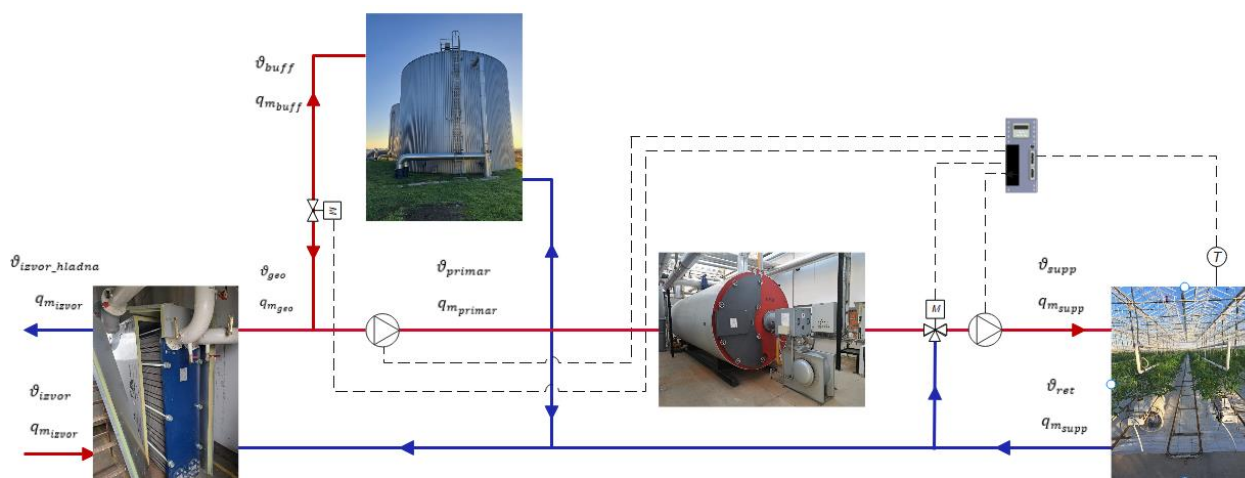
## 2.1. Stvarni sustav

U ovom se odlomku opisuje stvarno stanje sustava u opisanom stakleniku. Izvori topline su kotao od 5 MW te geotermalni izvor koji, osim što predaje toplinu preko pločastih izmjenjivača topline, dolazi sa određenim postotkom otopljenog plina (metana) koji se izdvaja, te u kotlu sagorijeva i zagrijava dodatno vodu ( $\approx 1$  MW snage). Dalje se nalaze akumulacijski spremnici tople vode koji služe kao potpora grijanju u vrhuncima opterećenja, spremnici su popriličnih dimenzija skupa sadržavajući  $2700 \text{ m}^3$  vode. Bitno je za napomenuti da su spremnici izvedeni s jednim ulazom na vrhu i jednim na dnu tako da svako punjenje izaziva pražnjenje istom količinom vode i obratno tj. spremnici su uvijek puni samo se mijenja temperatura vode u njima. Toplovodne cijevi nalaze se na tri razine u stakleniku opisanom u ovom radu. Nalaze se pri dnu te služe i kao tračnice za transportna kolica za berbu i servis biljaka, u visini zrelih plodova biljke kao potpora vegetaciji i u samom vrhu stakleniku kako bi se osiguralo otapanje snijega zbog opasnosti od prevelikog mehaničkog opterećenja u takvim uvjetima. Radi jednostavnosti ovoga rada u obzir je uzet jedan cjevovod kao ogrjevno tijelo, no bez točne specifikacije na koju razinu se točno odnosi. Broj tračnica po stakleniku je 60 svaka duljine 48 m, u svakoj tračnici nalazi se prolaz i povrat svake razine cjevovoda što je ukupno 288m cjevovoda po redu odnosno 17 280 m po stakleniku.



### 3. OPIS KOMPONENTI I TEORIJSKA POZADINA RADA

Slika 1 pojednostavljenu shemu realnog sustava na kojoj se simulacija temelji. Komponente sustava su: geotermalni izvor topline, spremnik tople vode (buffer), kotao, troputni miješajući ventil te ogrjevno tijelo (tračnice). Sljedeća poglavlja navode komponente pojedinačno te opisuju izraze korištene za simuliranje istih.



Slika 3-1: Shematski prikaz simuliranog sustava grijanja

#### 3.1. Ogrjevno tijelo – tračnice

Dugi nizovi cjevovoda promjera 60/50 mm predstavljaju ogrjevno tijelo ovog sustava. Petlje se nalaze na različitim razinama u stakleniku te je potrebno računati utjecaj pojedinačne petlje na unutarnju temperaturnu, no zbog jednostavnosti proračuna pretpostavljeno je da su petlje serijski spojene te su njihove površine zbrojene. Potrebno je izračunati koeficijent prijelaza topline zrak-voda. Proračun koeficijenta prijelaza topline je kako slijedi.

#### Prisilna konvekcija, strujanje kroz cijev

$$Re = \frac{w_u \cdot d_u}{\nu} = \frac{0,5 \cdot 0,05}{0,474 \cdot 10^{-6}} = 52750 \gg 3000 \quad (3.1)$$

strujanje je turbulentno, pa vrijedi:

$$Nu = \frac{\alpha_u d_u}{\lambda} = \frac{0,0398 \cdot Pr \cdot Re^{0,75}}{1 + 1,74 \cdot Re^{-0,125} \cdot (Pr - 1)} \quad (3.2)$$

$$Nu = \frac{\alpha_u d_u}{\lambda} = \frac{0,0398 \cdot 2,9813 \cdot 52750^{0,75}}{1 + 1,74 \cdot 52750^{-0,125} \cdot (2,9813 - 1)} = 219,6 \quad (3.3)$$

$$\alpha_u = \frac{Nu \lambda}{d_u} = \frac{219,6 \cdot 0,654}{0,05} = 2870 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (3.4)$$

### Slobodna konvekcija, vodoravna cijev

$$Gr = \frac{T_c - T_o}{T_o} \frac{g \cdot d_v^3}{\nu_s^2} = \frac{373,15 - 293,15}{283,15} \cdot \frac{9,81 \cdot 0,06^3}{(23,36 \cdot 10^{-6})^2} = 1,5 \cdot 10^6 \quad (3.5)$$

$$Nu = \frac{\alpha_{v,b} \cdot d_v}{\lambda_w} = 0,38 \sqrt[4]{Gr} = 0,38 \sqrt[4]{1,5 \cdot 10^6} = 12,67 \quad (3.6)$$

$$\alpha_{v,b} = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{d_v} = \frac{12,55 \cdot 0,02810}{0,06} = 5,88 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

### Keficijent prolaza topline

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{r_u}{\lambda_c} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{r_u}{r_v \cdot \alpha_v}} = \frac{1}{\frac{1}{2870} + \frac{0,025}{58} \ln \frac{60}{50} + \frac{0,025}{0,03 \cdot 5,88}} = 5,7 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (3.7)$$

Kada je poznat koeficijent prolaza topline potrebno je odrediti temperaturni profil vode kroz cijev. Diskretizacijom cijevi na konačan broj malenih volumena i s pretpostavkom jednake temperature u pojedinom volumenu može se odrediti temperatura svih kontrolnih volumena. Jednadžba koja opisuje zbivanja unutar kontrolnog volumena dobivena je postavljanjem Prvog glavnog stavka na granice pojedinog volumena (Slika 2).

$$\rho_w \cdot c_{p_w} \cdot \pi r_u^2 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial \vartheta_i}{\partial t} = q \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_u \cdot \Delta x + q_{m_{supp}} \cdot c_{p_w} \cdot (\vartheta_{i-1} - \vartheta_i) \quad (3.8)$$

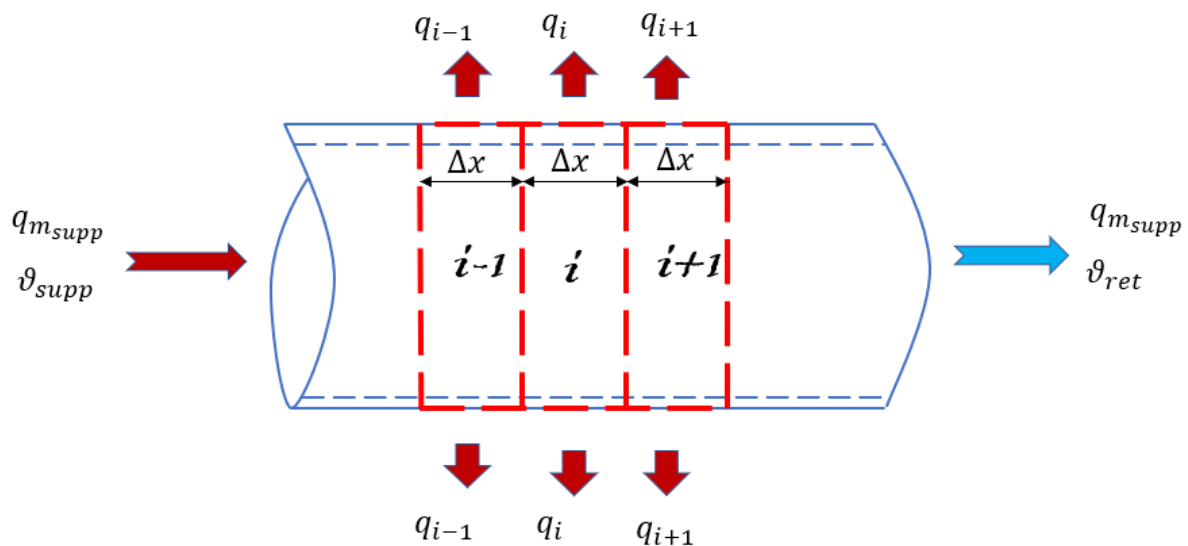
tj.

$$\frac{\partial \vartheta_i}{\partial t} = \frac{q_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta x + q_m \cdot c_p \cdot (\vartheta_{i-1} - \vartheta_i)}{\rho \cdot c_p \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \Delta x} \quad (3.9)$$

Gdje je  $q$  [ $\text{W/m}^2$ ] toplinski tok koji volumen preda/primi preko granica sustava sveden na jedan metar kvadratni površine. Kada je poznat temperaturni profil kroz cijev tračnica, jednostavno se izračunava toplina koju tračnice u tom vremenskom koraku predaju okolišu. Suma toplinskih tokova predanih od kontrolnih volumena pojedinačno predstavlja ukupni toplinski tok tračnica.

$$\Phi_T = \sum_{i=0}^{n_{kv}} \Phi_{Ti} \quad (3.10)$$

$$\Phi_T = \sum_{i=0}^{n_{kv}} q_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta x \quad (3.11)$$



Slika 3-2: Prikaz kontrolnih volumena cijevi

### 3.2. Geotermalni izvor topline[13]

Promatrani prostor pripada hrvatskom dijelu Panonskog bazena koji se ubraja u toplije dijelove istog. Razlog tomu je smanjena debljina zemljine kore zbog čega dolazi do pojačanog dotoka geotermalne topline i pojačane termičke kondukcije. Ono proizlazi iz same prirode hidro-geotermalnih ležišta koja nastaju na putu dotoka zemljine topline na površinu, procesima kondukcije topline (od jednog do drugog zrna minerala) ili konvekcije fluida (gdje toplinu prenose pojedine molekule fluida – geotermalne vode, svojim kretanjem kroz stijene prema površini), a geotermalna voda je jedna od glavnih toplinskih izvora za geotermalne bušotine. Toplina iz geotermalne vode može koristiti direktno i indirektno. Direktno korištenje je tradicionalno u balneološke svrhe (kupanje, rehabilitacija), korištenje u poljoprivredi (grijanje staklenika što je detaljnije pojašnjeno u ovome radu) te u akvakulturi, pa sve do danas sve raširenije primjene u toplinarstvu za grijanje i/ili hlađenje zgrada. Indirektno korištenje geotermalne energije primjenjuje se također u proizvodnji električne energije iz srednjih do visokotemperaturnih geotermalnih izvora. Također ne treba zanemariti niti mogućnost korištenja geotermalnih vodonosnika nižih temperatura koji se koriste za grijanje uz pomoć dizalica topline ali također mogu se koristiti i za vodosnabdijevanje.

Kako je u ovome radu opisano grijanje staklenika u nastavku će biti objašnjeno nekoliko prednosti korištenja geotermalnih izvora za njegovo grijanje;

**Održivost:** Geotermalna energija je obnovljivi izvor energije, što znači da se može neograničeno koristiti neovisno o vanjskim, meteorološkim uvjetima, i ukoliko je rezervoar pravilno održavan, tj nema pada nivoa, dug vremenski period.

**Isplativost:** Samo su početna ulaganja velika, međutim nakon što se geotermalna bušotina izbuši ili stara revitalizira, troškovi rada sustava su relativno niski te povrat ulaganja može biti u vrlo kratkom periodu u odnosu na troškove korištenja konvencionalnih izvora energije.

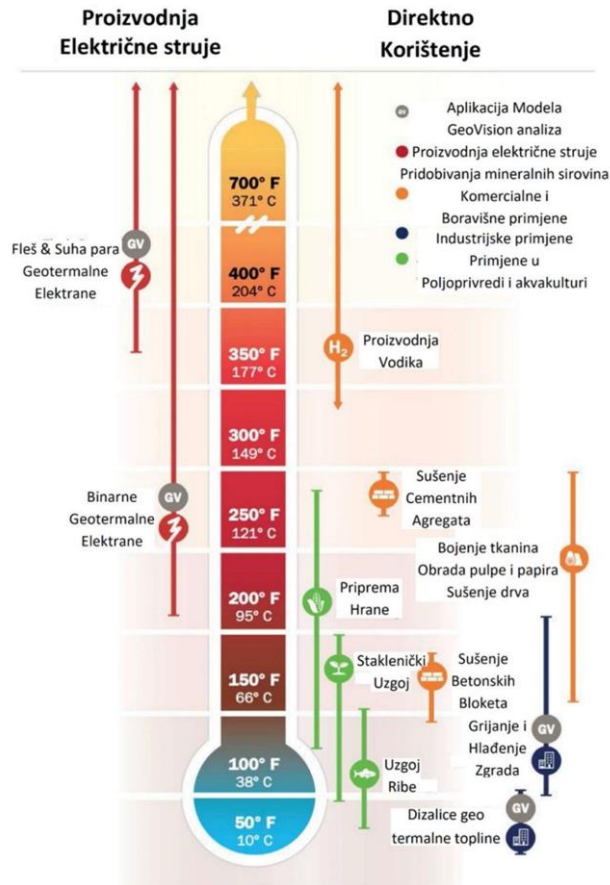
**Dosljednost:** Geotermalna energija dostupna je tijekom cijele godine, što znači da se može koristiti za grijanje staklenika i tijekom dugih hladnih perioda.

**Ekološka prihvatljivost:** Geotermalna energija je čist izvor energije jer ne proizvodi štetne emisije niti zagađivače.

Primjene geotermalnih izvora u grijanju staklenika uključuju:

**Indirektni sustavi:** Ovi sustavi koriste izmjenjivače topline za prijenos topline iz zemlje u staklenik.

**Hibridni sustavi:** Ovi sustavi kombiniraju geotermalno grijanje s drugim obnovljivim izvorima energije, poput solarne energije ili energije vjetra, kako bi se osigurao dosljedan i održiv izvor energije za grijanje staklenika.



Slika 3-3: Korištenje geotermalne energije s obzirom na temperaturu geotermalnog fluida [13]



Slika 3-4: Geotermalno postrojenje

### 3.3. MIJEŠAJUĆI TROPUTNI VENTIL (Walther E. , 2021)

#### 3.3.1. Određivanje protoka i temperature miješanja [2]

Određivanje protoka kroz ventil određuje se pomoću vrijednosti  $K_v$ , koja definira protok kroz ventil s padom tlaka na ventilu od 1 bar. Protok se računa kao  $Q_v = K_v \sqrt{\Delta p}$ . Ovisnost vrijednosti  $K_v$  prikazuje se kako slijedi:

$$\frac{K_v}{K_{vs}} = f(y) \quad (3.12)$$

gdje  $y$  predstavlja otvorenost ventila dok je  $K_{vs}$  vrijednost  $K_v$ -a pri stopostotnoj otvorenosti ventila. Funkcija  $f$  koja opisuje navedenu relaciju može biti kvadratna, linearna ili jednako postotna. Za ovaj rad odabrana je jednako postotna s obzirom da je takav oblik najčešći u industriji. Autoritet ventila definiran je jednadžbom 3.13

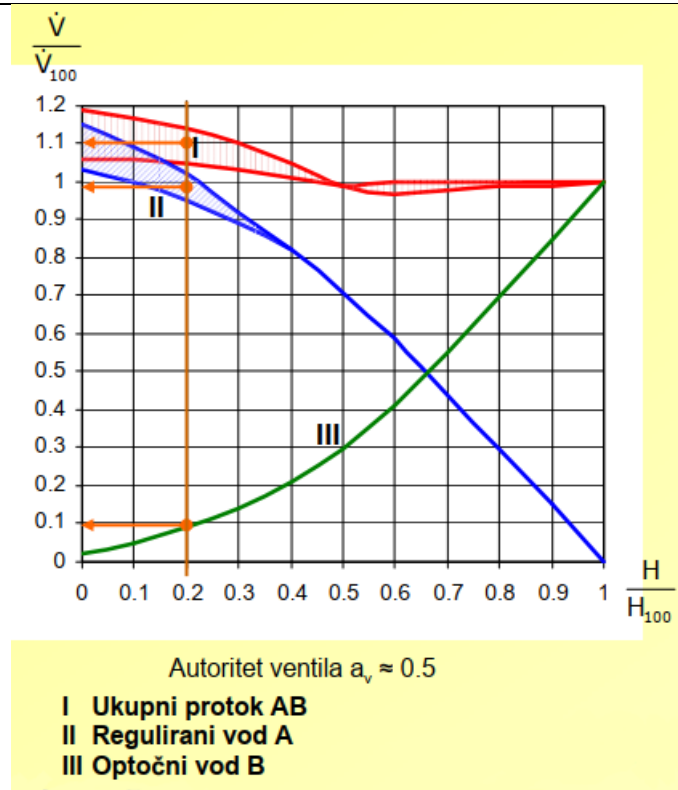
$$a = \frac{\Delta p_v}{(\Delta p_v + \Delta p_o)} \quad (3.13)$$

gdje  $\Delta p_v$  predstavlja pad tlaka na ventilu a  $\Delta p_o$  pad tlaka u ostatku kruga. Ovisnost protoka s obzirom na autoritet ventila i karakteristiku slijedi:

$$\frac{Q_v}{Q_{vs}} = \frac{1}{\sqrt{a \left(\frac{K_{vs}}{K_v}\right)^2 + 1 - a}} \quad (3.14)$$

Odnos je prikazan u omjeru stvarnog i maksimalnog protoka,  $Q_{vs}$ . Izlazna temperatura se naposljetku računa:

$$T_i = Q_v T_{ret} + (1 - Q_v) T_{sup} \quad (3.15)$$



Slika 3-5: Prikaz karakteristike troputnog miješajućeg ventila [10]



Slika 3-6: Kotlovnica

### 3.4. PID KONTROLA VENTILA [2]

Upravljanje se općenito temelji na održavanju odabrane zadane vrijednosti (npr. temperature, protoka, razine vode) uz pomoć aktuatora (motor, pumpa ili ventil). Definira se pogreška  $e(t)$  između izmjerenog izlaza i njegove postavljene vrijednosti, na primjer uzimajući u obzir temperatura  $T$  i njena postavljena vrijednost  $T_0$ :

$$e(t) = T(t) - T_0 \quad (3.16)$$

Mogu se koristiti tri različite radnje kako bi se postigla željena vrijednost izmjerene količine, općenito u kombinaciji:

- Proporcionalno djelovanje: predstavlja trenutnu vrijednost pogreške, a djelovanje korekcije proporcionalno je razlici između stvarnih i postavljenih vrijednosti. Primjetno, ako je pogreška nula, ispravak će također biti nula, što znači da postavljena vrijednost nikada nije dostignuta. Matematički, korekcija je proporcionalna koeficijentu  $K_p$ [2]:

$$\text{Proporcionalna korekcija} \sim K_p \times e(t) \quad (3.17)$$

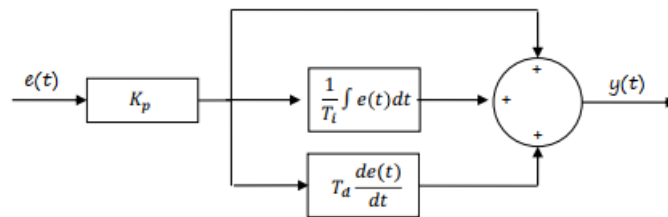
- Integralni dio: predstavlja prošle vrijednosti pogreške i praktički je algebarski zbroj grešaka iz prošlosti. Omogućuje točnu korekciju pogreške i podešen je vremenom integracije  $T_i$ [2]:

$$\text{Integralna korekcija} \sim \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (3.18)$$

- Djelovanje derivacijskog člana: predstavlja buduću vrijednost pogreške. Akcija korekcije predstavlja predviđanje vrijednost pogreške u sljedećem vremenskom koraku korištenjem nagiba pogreške  $de/dt$  i vremena derivacije  $T_d$  [2]:

$$\text{Derivacijska korekcija} \sim T_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (3.19)$$





Slika 3-7: P&amp;ID kontrola ventila

Navedene radnje često kombiniraju kao "PI" ili "PID", iako mogu postojati egzotičnije verzije u kombinacijama ili korištenom obliku. Uobičajeni način prikazivanja principa rada takvih PID regulatora je na slici 5, što se prevodi u jednadžbu u nastavku[2]:

$$y(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (3.20)$$



Slika 3-8: Troputni miješajući ventili

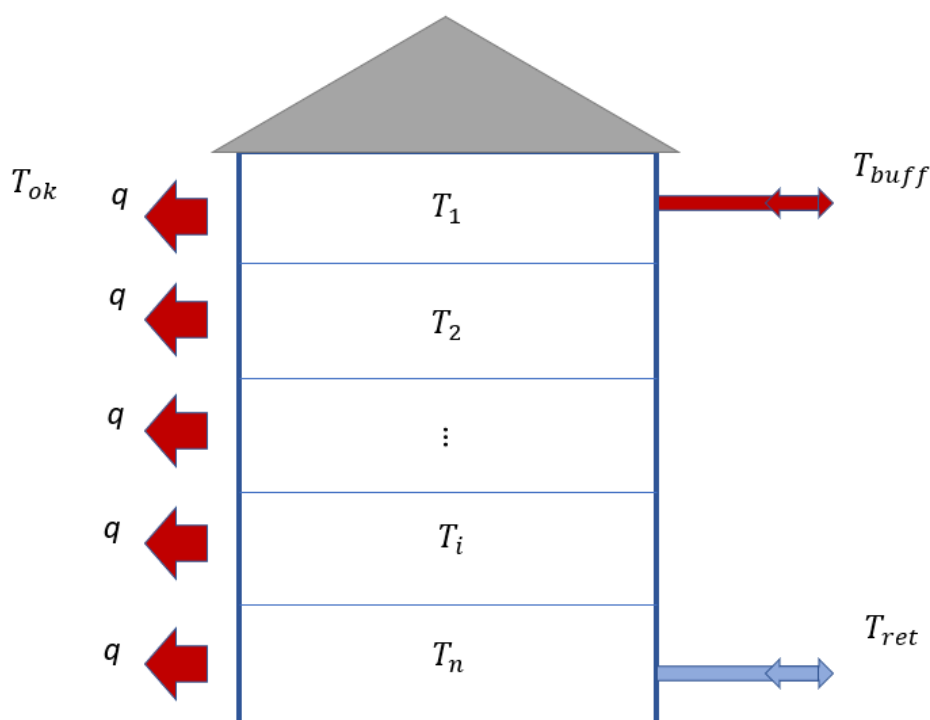
### 3.5. Spremnik tople vode

Spremnici tople (*bufferi*) vode obično se koriste u sustavima grijanja staklenika za pohranu tople vode i osiguravaju stabilan izvor topline tijekom dugih vremenskih razdoblja. Ovi su spremnici dizajnirani za držanje velike količine vode i održavanje njezine temperature, omogućujući da se po potrebi koristi za grijanje staklenika. Spremnici tople vode obično imaju jedan ulaz i jedan izlaz, koji se koriste za punjenje odnosno pražnjenje spremnika. Spremnik je uvijek napunjen vodom, a temperaturni profil vode mijenja se tijekom vremena kako se zagrijava i hladi sustavom grijanja. Voda u spremniku se zagrijava na određenu temperaturu i održava na toj temperaturi sve dok ne bude potrebna za grijanje staklenika. Spremnici tople vode mogu biti izrađeni od raznih materijala, uključujući čelik, beton i plastiku. Mogu se izolirati kako bi se održala temperatura vode i spriječio gubitak topline, što može poboljšati učinkovitost sustava grijanja.

*Bufferi* su važna komponenta mnogih sustava grijanja staklenika, budući da omogućuju stabilan i pouzdan izvor topline. Pohranjivanjem tople vode, sustavom se može upravljati učinkovitije, jer izvor grijanja ne mora stalno raditi da bi se pokrili toplinski gubici. U sustavu simuliranom u ovom radu najviše smisla ima grijati *buffer* samoizljevom geotermalne bušotine. Naime, geotermalna bušotina ima dva režima rada, samoizljev i pumpni rad. Samoizljev ne zahtijeva gotovo nikakav utrošak energije, jedini troškovi su pumpe koje moraju vodu iz bušotine „progurati“ kroz izmjenjivače topline. Stoga se uštede ostvaruju punjenjem *buffera* u trenucima minimalnih opterećenja, samoizljevom. Kao što je ranije navedeno spremnici su skupa volumena 2700 m<sup>3</sup>. Velike dimenzije spremnika rezultiraju pojavom temperaturne stratifikacije vode koju je potrebno simulirati. U slučaju grijanja pomoću *buffera* topla voda se uzima s vrha tj. spremnik se prazni dok u isto vrijeme povratna hladna voda ulazi na dno spremnika tj. spremnik se puni. Obratno vrijedi za punjenje spremnika toplom vodom. Podjelom spremnika u segmente po visini i uz pretpostavku jedne temperature po segmentu (voda u segmentima je dobro promiješana) postavlja se diferencijalna jednačina kako slijedi[3].

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_B \cdot \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} + \frac{P_i \cdot k_i}{\rho_w \cdot c_{p_w} \cdot A_B} (T_\infty - T_i) + \frac{\dot{m}_i \cdot (T_i^{\text{in}} - T_i)}{\rho_w \cdot A_B \cdot \Delta z_i} \quad (3.21)$$

Prvi član  $\alpha \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}$ , u jednadžbi 3.21 predstavlja provođenje topline između slojeva zbog razlike u temperaturi. Drugi član  $\frac{P_i \cdot k_i}{\rho_w \cdot c_{p_w} \cdot A_B} (T_\infty - T_i)$ , predstavlja izmjenu topline između slojeva i vanjskog okoliša. Te treći član  $\frac{\dot{m}_i (T_i^{\text{in}} - T_i)}{\rho_w A_i \Delta z_i}$ , predstavlja razliku entalpija vode koja izlazi i ulazi u pojedini volumen. Bitno je za napomenuti da je  $T_i^{\text{in}}$  kod prvog volumena temperatura ulazne vode dok je kod svih drugih to temperatura vode prethodnog volumena  $T_{i-1}$  [3].



Slika 3-9: Pojednostavljeni prikaz spremnika tople vode (*buffer*)



Slika 3-10: Dva toplinski izolirana *buffer-a*

### 3.6. Dogrijavajući kotao

Plinski kotlovi se obično koriste za grijanje vode u stambenim, poslovnim i industrijskim okruženjima. Mogu biti vrlo učinkoviti i isplativi, što ih čini popularnim izborom za mnoge primjene, uključujući grijanje staklenika. Plinski kotlovi obično su vrlo učinkoviti, s učinkovitošću u rasponu od 80-98%. Plinski kotlovi obično se koriste za zagrijavanje potrošne tople vode za tuševe, umivaonike i druge potrebe u kućanstvu, kao i za grijanje zgrada, uključujući poslovne i industrijske zgrade. Također se mogu koristiti za sustave grijanja zračenjem, koji koriste vodu za prijenos topline kroz zgradu. Plinski kotlovi se obično koriste za grijanje staklenika jer mogu pružiti stabilan izvor topline tijekom dugih vremenskih razdoblja. Staklenici zahtijevaju dosljedan i stabilan izvor topline za održavanje optimalnih uvjeta rasta, a plinski kotlovi mogu osigurati ovu toplinu na pouzdan i učinkovit način. Osim toga, plinski kotlovi često se koriste u kombinaciji s drugim sustavima grijanja, kao što su grijanje zračenjem ili sustavi s prisilnim dovodom zraka, kako bi se osiguralo potpuno rješenje grijanja staklenika. Plinski kotlovi mogu biti pogonjeni prirodnim plinom ili propanom, što ih čini fleksibilnom i svestranom opcijom za grijanje staklenika. U promatranom slučaju plinski kotao koristi se za dogrijavanje vode na unaprijed zadanu fiksnu

temperaturu te će snaga ovog kotla kasnije služiti kao pokazatelj učinkovitosti regulacije.

Snaga kotla računa se postavljanjem Prvog glavnog stavka na grijanu vodu.[12]

$$\Phi_K = q_m \cdot c_w \cdot (\vartheta_i - \vartheta_u) \quad (3.22)$$



Slika 3-11: Kotao "dogrijač"

## 4. METODOLOGIJA SIMULACIJE

### 4.1. Regulacija toplovodnog grijanja

Načela regulacije za sustave grijanja toplom vodom u staklenicima mogu varirati ovisno o specifičnom dizajnu sustava i izvedbi, ali neka od najčešćih načela uključuju:

**Kontrola temperature:** Sustav bi trebao biti dizajniran za održavanje željene temperature u stakleniku. To se obično radi pomoću termostata ili drugog uređaja za kontrolu temperature koji po potrebi uključuje i isključuje sustav grijanja.

**Zoniranje:** staklenik se može podijeliti u različite zone kako bi se omogućila preciznija kontrola temperature. Svaka zona može imati vlastiti senzor temperature i kontrolni ventil za regulaciju protoka tople vode.

### 4.2. Regulacija u simulaciji

Slijedi ukratko opis metodologije simulacije, te pojašnjenje principa regulacije sustava. Potrebno je napomenuti da sustav regulacije ne odgovara u potpunosti onom stvarnom zbog prijašnjih pojednostavljenja kod komponenti i izvedbe sustava.

Sustav je podijeljen u tri regulacijska kruga: PID kontrola miješanja povratne i polazne vode, kontrola kapaciteta pumpi te kapacitet kotla za zagrijavanje vode. Regulacija snage kotla nije obrađena u ovom radu nego je pretpostavljena pretpostavkom da je izlazna temperatura kotla konstanta. Regulacijski elementi (PID kontrola temperature te regulator protoka tj. kapaciteta pumpi) upravljani su samo s obzirom na unutarnju temperaturu staklenika mjerenu termostatom. U programu je određen fiksni korak u vremenu pri kojem se provjerava trenutno stanje u stakleniku te po potrebi utječe na regulacijske elemente. S obzirom na odabrani korak sustav svake 3,5 minute provjerava je li temperatura padala ili rasla od posljednje provjere te odabire režim rada koji će biti opisani u nastavku. Odabrani režim predstavlja regulaciju pumpi u sustavu tako da se povećanjem protoka osigura veći kapacitet sustava. Kada su poznati protoci izračunava se temperaturni profil u ogrjevnom tijelu te potom snaga samog grijača. Također, kada su poznate gore navedene veličine temperatura staklenika u sljedećem trenutku se može izračunati poznavajući toplinske gubitke i dobitke. Jednadžba 4.1 prikazuje diferencijalnu jednadžbu koja opisuje promjenu temperature staklenika u vremenu.

$$\rho_{ZR} \cdot V_S \cdot c_{pZR} \cdot \frac{dT_S}{dt} = \Phi_T - U_S \cdot S \cdot (T_S - T_\infty) + q_{mZR} \cdot c_{pZR} \cdot (T_S - T_\infty) \quad (4.1)$$

Komponenta  $q_{mZR}$  u trećem izrazu desne strane predstavlja maseni protok vanjskog zraka unesenog u staklenik uslijed otvaranja prozora. Češće se koristi izraz:

$$q_{mZR} = \rho_{ZR} \cdot V_S \cdot \frac{ACH}{3600} \quad (4.2)$$

koji koristi ACH (*air changes per hour*) kao mjeru izmijenjene količine zraka u prostoriji, ovakav pristup izračuna je korišten u radu. U radu se veličina ACH mijenja po krivulji normalne distribucije u rasponu od 24 sata pokušavajući replicirati standardni dan u kojem se u noći prozori zatvaraju dok se u danu otvaraju prema tehnološkim potrebama biljaka. Maksimalna vrijednost koju vrijednost ACH poprima jeste 8 izmjena zraka po satu. Treći krug regulacije sastoji se od PID kontrolera također opremljenim termostatom u stakleniku. Princip rada jeste takav da PID kontroler provjerava trenutnu (neposredno izračunatu) temperaturu i uspoređuje ju sa zadanom te na osnovu razlike mijesha vodu polaznog i povratnog voda povećavajući ili smanjivajući učin grijaa. U slučaju da temperatura u stakleniku nastavi padati i nakon što je troputni ventil duže vremena bio potpuno zatvoren za tok vode iz povratnog voda sustav u provjeri spomenutoj na početku odlomka odabire novi režim s većom snagom. Režimi se dijele u šest različitih točaka djelovanja prikazanim u tablici 1. Kao što se može vidjeti, odabirom režima povećavaju se protoci kroz sustav i/ili se postojećim protocima dodaje protok iz spremnika tople vode.

**Tablica 1.** Režimi rada

	REŽIM 1	REŽIM 2	REŽIM 3	REŽIM 4	REŽIM 5	REŽIM 6
Protok geotermalne vode na izvoru, $q_{m_{izvora}}$ [kg/s]	10	10	20	20	30	30
Maksimalni protok sekundarnog toka kroz izmjenjivače, $q_{m_{geo}}$ [kg/s]	20	20	30	30	40	40
Maksimalni protok vode iz spremnika, $q_{m_{buff}}$ [kg/s]	0	10	0	10	0	10
Maksimalni ukupni protok, $q_{m_{primar}}$ [kg/s]	20	30	30	40	40	50



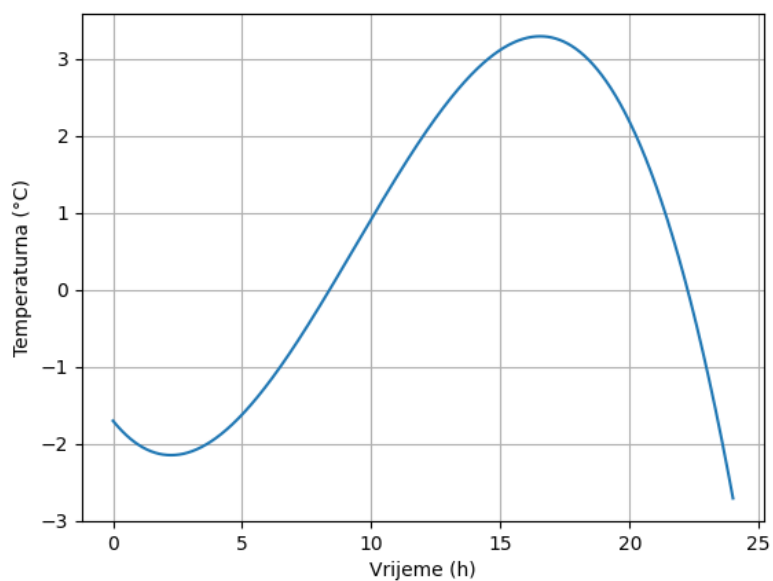
## 5. REZULTATI

### 5.1. Opis rezultata

U ovom odlomku analizirat će se interesantne pojedinosti dobivene simulacijom sustava grijanja staklenika. Zadani ulazni parametri su:

Površina staklenika	-	2 ha
Visina staklenika	-	6 m
Duljina cjevovoda	-	30 km
Visina spremnika	-	10 m
Promjer spremnika	-	9 m
Vrijeme simulacije	-	24 h
Koeficijent proporcionalnosti ventila	-	0.05
Autoritet ventila	-	0.5
Temperatura izvora	-	60°C

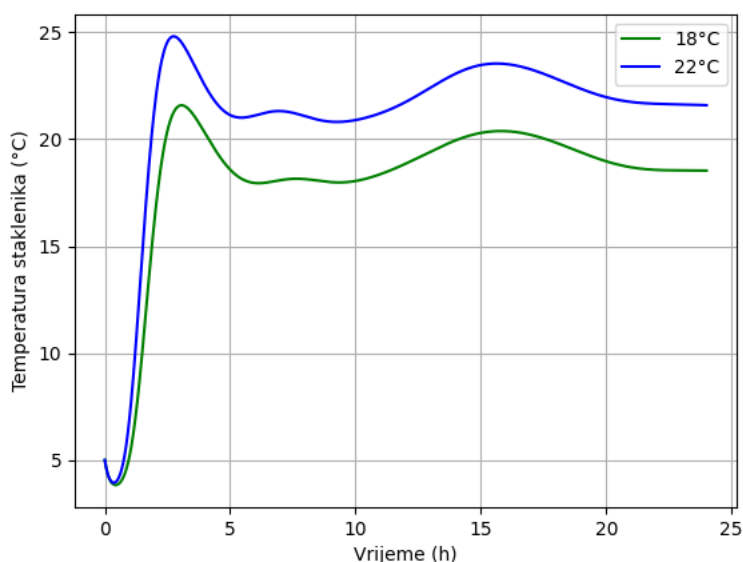
Vanjska temperatura preuzeta je s mjerenja meteorološke stanice u blizini staklenika.



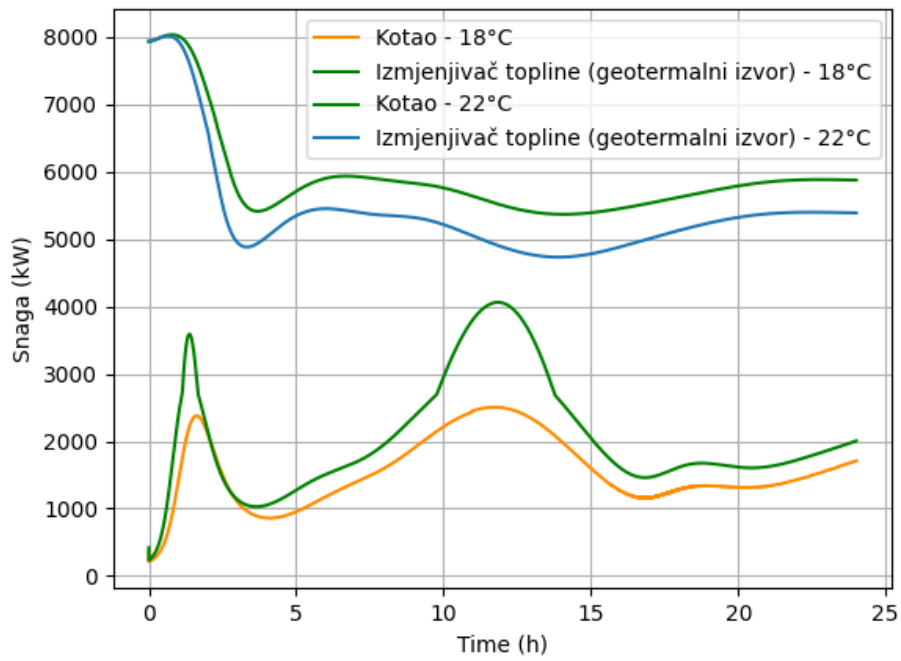
Slika 5-1: Vanjska temperatura

### A) Temperatura staklenika

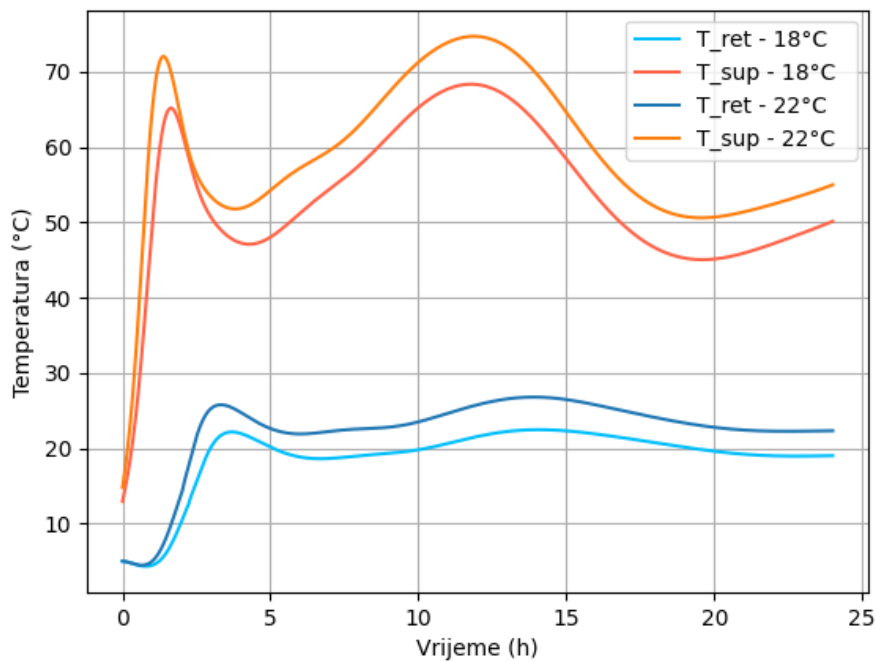
Graf na Slici 12. prikazuje temperaturu u stakleniku tijekom simuliranih 24h pri različitim ciljanim temperaturama (18°C i 22°C). Simulacija ne prikazuje tipičan dan rada staklenika jer se temperatura tipično ne spušta ispod 15°C dok su biljke prisutne. No s obzirom da je cilj rada pokazati sposobnost simulacijskog programa početna temperatura postavljena je na 5°C i moglo bi se reći se opisuje radni dan nakon remonta kada se staklenik nakon čišćenja između sezona ponovno zagrijava. Graf pokazuje početno zagrijavanje na zadanu temperaturu (u ovom slučaju 18°C) sa kratkim padom temperature na samom početku pripisuje toplinskoj inerciji sustava uslijed velike količine vode u sustavu te velikog volumena staklenika. Nakon početnog zagrijavanja temperatura staklenika prelazi zadanu vrijednost za otprilike 3°C zbog *overshooting* – a P&ID kontrolera. Dalje temperatura u stakleniku djelomično pada te nakon toga raste sve dok se kontroler ne prilagodi novim opterećenjima nastalim uslijed otvaranja prozora tj. povećanih ventilacijskih gubitaka. Nakon opisanog perioda dolazi do novog „lakšeg“ *overshooting* – a također popraćenog sada već zatvaranjem prozora i smanjivanjem ukupnih toplinskih gubitaka, što će se bolje vidjeti na Slici 13. Nakon 20h od početka grijanja temperatura u stakleniku se stabilizira na zadanih 18°C odnosno 22°C.



Slika 5-2: Temperatura zraka u stakleniku



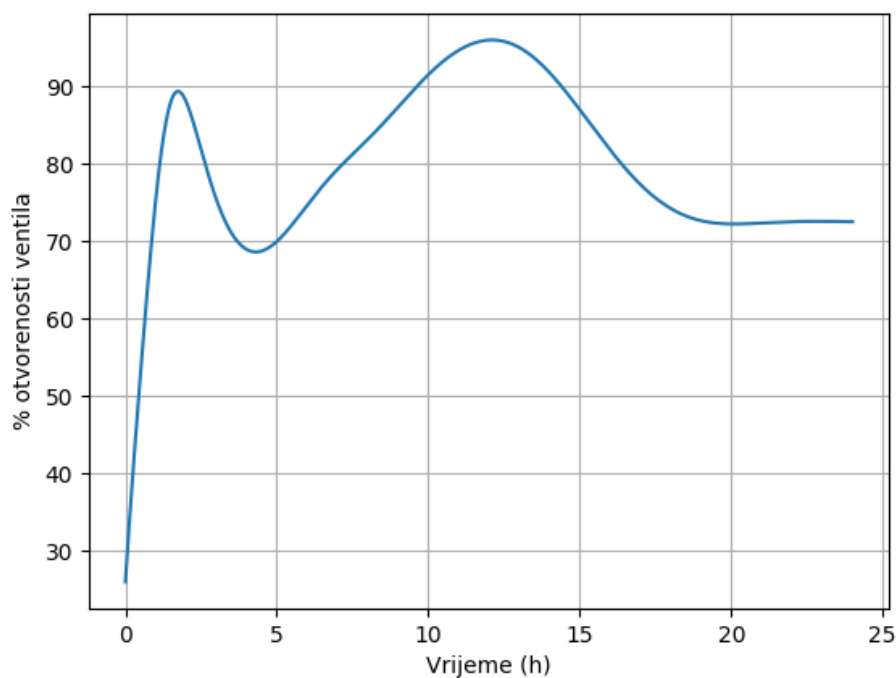
Slika 5-3: Snaga kotla i geotermalne bušotine



Slika 5-4: Temperatura polaza i povrata

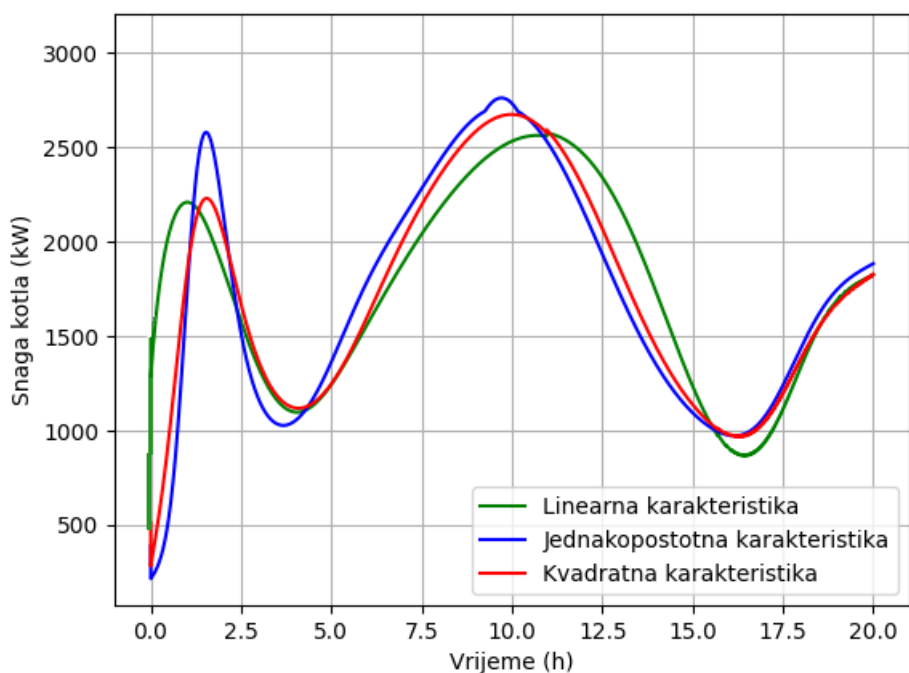
## B) Karakteristika ventila

Ispitana su tri tipa karakteristike ventila: jednakopostotna, linearna i kvadratna. Slika 5-5 prikazuje ponašanje ventila s jednakopostotom karakteristikom na kojoj se može vidjeti ranije opisana pojava *overshooting-a*. Nakon početnog strmog otvaranja ventila može se vidjeti kako ventil premašuje 72% (na što se ustalio na kraju) otvorenosti za otprilike 15% u prvom te 7% u drugom primijećenom *overshooting-u*. Nakon toga ventil se otvara u skladu sa nametnutim toplinskim gubitcima nakon čega se stabilizira na vrijednost od  $\approx 72\%$ .

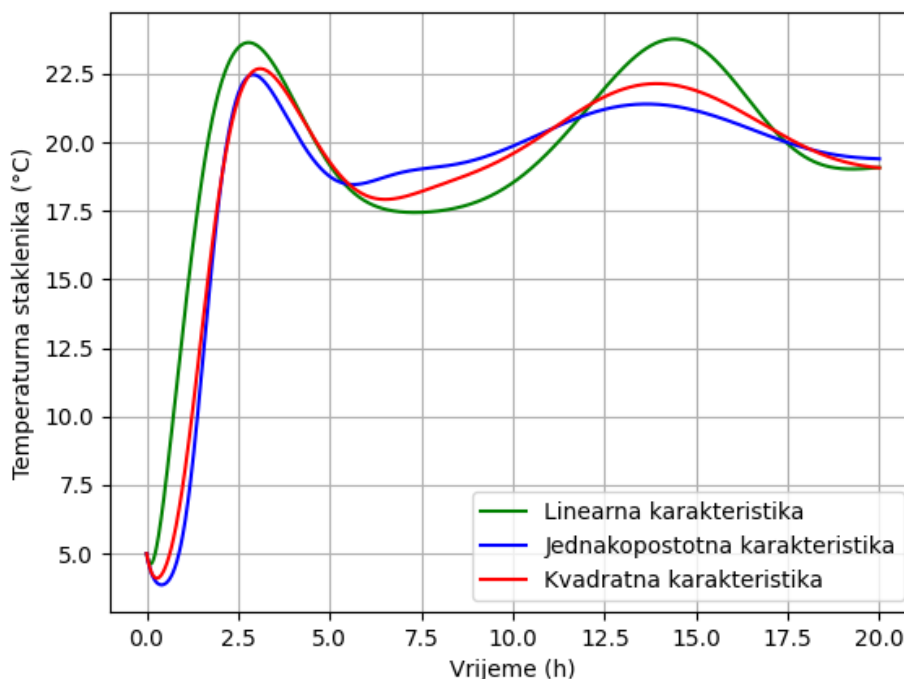


Slika 5-5: Postotak otvorenosti ventila

Na slikama 5-6 i 5-7 može se vidjeti razliku odaziva sustava na različite karakteristike toputnog ventila. Linearna karakteristika rezultira sa najbržim odazivom sustava nametnutim opterećenjima no također na slici 5-7 se može vidjeti kako spomenuta karakteristika također rezultira najvećim *overshooting*-om temperature staklenika. Takvo ponašanje je rezultat zajedničkog djelovanja karakteristika kotla i samog ventila koje zajednički daju puno responzivniji no teže upravljiv sustav. Jednako postotna karakteristika se pokazala kao karakteristika koja najbolje upravlja sustavom što se također može vidjeti na slici 5-7 gdje sustav reguliran ventilom jednakopostotne karakteristike najbrže konvergira ka zadanoj temperaturi.



Slika 5-6: Ovisnost utrošene snage kotla o karakteristici ventila



Slika 5-7: Ovisnost temperature staklenika o karakteristici ventila

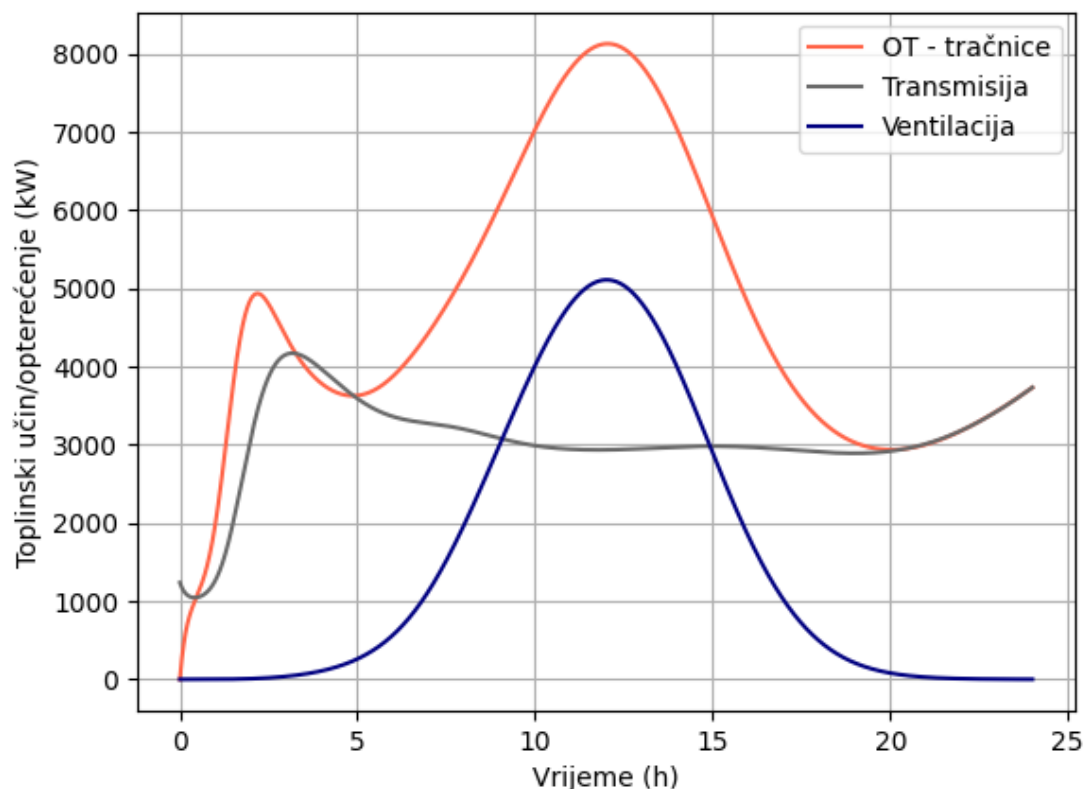
### C) Toplinska bilanca staklenika

Na Slici 14. prikazan je odnos snaga ogrjevnog tijela (tračnica) te toplinskih gubitaka transmisije i ventilacije. Transmisijski gubici staklenika računaju se s pretpostavljenom konstantnom prirodnom konvekcijom zraka sa oba dvije strane stakla, te uz stalnu površinu vrijedi:

$$\Phi_T = f(\vartheta_S, \vartheta_\infty) . \quad (5.1)$$

Ventilacijski gubici ovise o razlici temperatura vanjskog i unutarnjeg zraka te protoku, no s obzirom da je razlika temperatura približno konstantna (vanjska temperatura se ne mijenja drastično) gubici ovise većinom o protoku. Raspodjela ventilacijskih gubitaka odabrana je kompromisom između jednostavnosti funkcije (krivulja normalne distribucije) te relativnim podudaranjem sa stvarnošću (ventilacijski gubici su najveći sredinom dana).

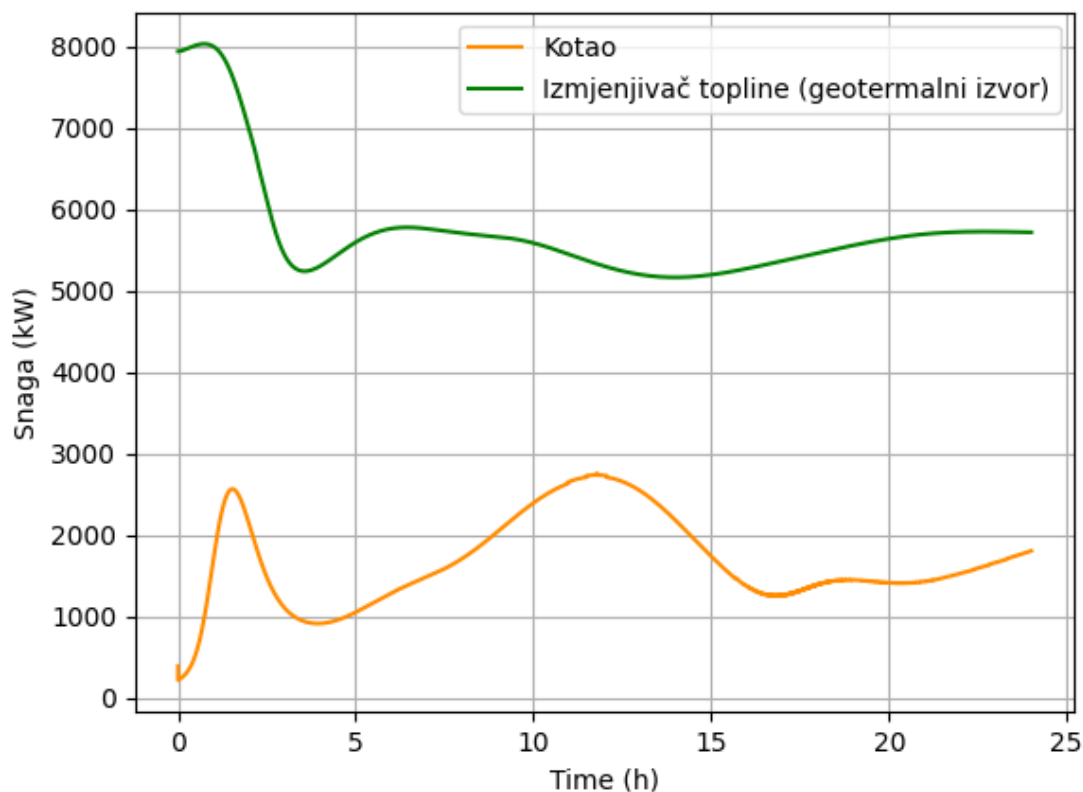
Naposlijetku krivulja snage ogrjevnog tijela je rezultat pravilnog odabira režima rada te regulacije PID kontrolera tako je suma gubitaka toplinskih gubitaka jednaka toplinskim dobitcima.



Slika 5-8: Snaga grijača u odnosu na gubitke

#### D) Izvori topline

Slika 15. prikazuje snagu geotermalnog izvora (izmjenjivača topline) i kotla za dogrijavanje vode. S obzirom da je povratna temperatura vode niska sve dok se cjevovod ne „napuni“ toplom i dok temperatura u stakleniku ne poraste vidi se veće iskorištenje geotermalne vode tj. više je topline preuzeto na izmjenjivačima zbog veće temperaturne razlike. Nakon toga snaga geotermalnog izvora se stabilizira jer se temperatura povrata vode ustali. Temperatura izvora geotermalne bušotine je uzeta konstanta 60°C te kotao koji dogrijava vodu do 75°C mora minimalno nadomjestiti razliku temperatura od 15°C ili više oviseći o protoku. Proučavanjem krivulje snage kotla određuje se efikasnost regulacije i sustava kao cjeline.

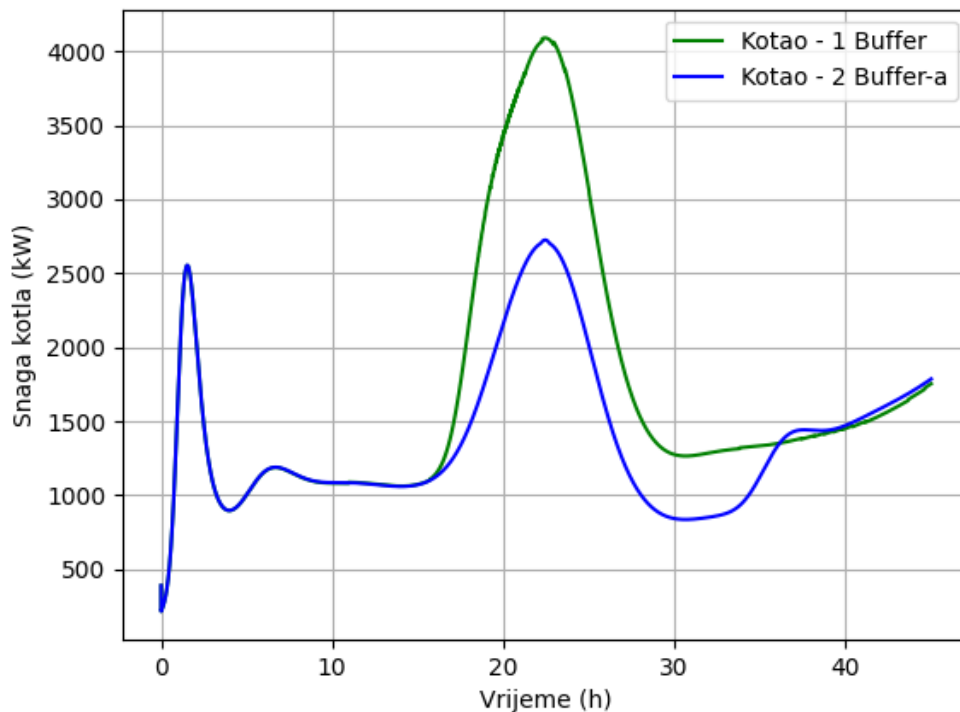


Slika 5-9: Snaga kotla i geotermalnog izvora topline

Na slici 5-10 može se vidjeti prikaz snage kotla kroz vrijeme u dva scenarija, sustav s jednim buffer-om te sustav s dva buffer-a. U oba slučaja pretpostavljeno je da su spremnici na početku ispunjeni vodom temperature  $60^{\circ}\text{C}$ . Krivulje snage podudaraju se sve dok se buffer u sustavu s jednim buffer-om ne isprazni tj. temperatura povrata ne dođe do vrha spremnika. Krivulje nakon 16 sati krenu odudarati jedna od druge zbog pražnjenja spremnika tj. hladnija voda ulazi u kotao te zahtijeva više energije da se zagrije na zadanu temperaturu. Odudaranje krivulja se primjećuje sve dok se i drugi buffer ne isprazni što je otprilike onoliko vremena koliko su se krivulje i podudarale. Površina između dvije krivulje predstavlja ukupno uštedenu energiju u periodu pražnjenja drugog spremnika u kWh. S obzirom da se strategija

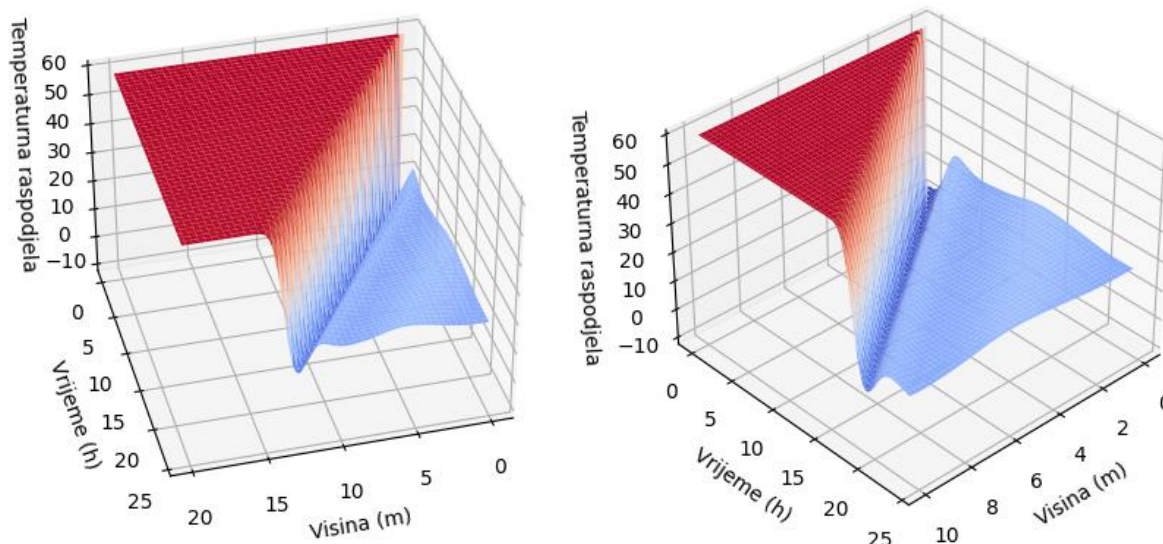


punjenja spremnika toplom vodom bazira da se isti puni u periodima smanjene potrošnje samoizljevom, ostvarena je znatna ušteda energije.



**Slika 5-10: Ušteda energije korištenjem većeg spremnika tople vode**

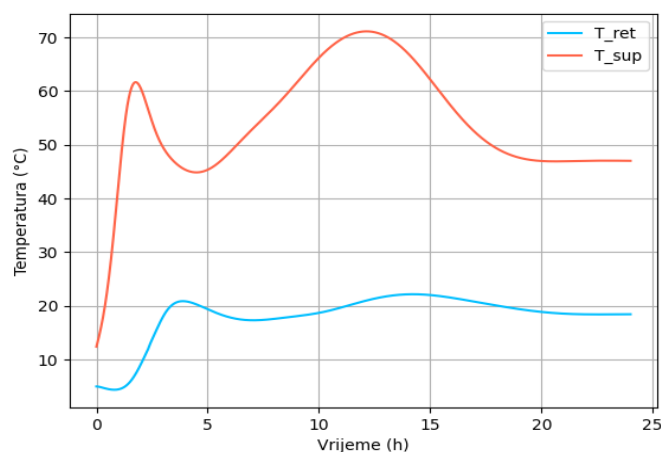
Na slici 5-12 može se vidjeti dinamika temperaturnog profila unutar spremnika tople vode za sustav s jednim i dva buffer-a. U sustavu s dva spremnika spremnici su spojeni paralelno, no zbog jednostavnosti je prikazan jedan spremnik sa duplom visinom. Na grafu se vidi kako na početku simulacije voda povratnog toka ulazi na dno spremnika prvo sa početnom temperaturom vode u cijevima ogrjevnog tijela a onda kako temperatura u stakleniku raste, sa sve višom temperaturom dok ne dođe do ustaljivanja profila kada se temperatura povrata više ne mijenja drastično.



Slika 5-11: Prikaz pražnjenja većeg i manjeg *buffer-a*

### E) Temperature povrata i polaza

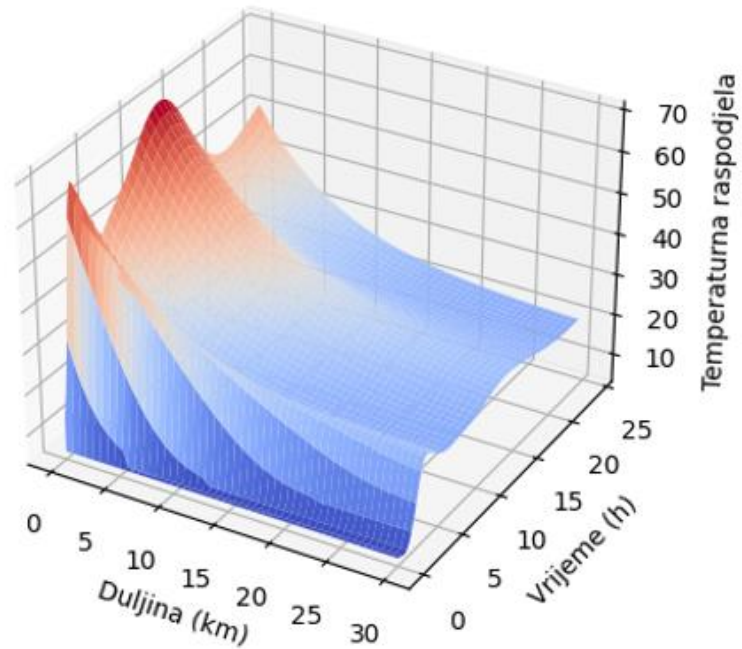
Slika 16. prikazuje promjenu temperature polaza i povrata vode u vremenu. Temperatura povrata zbog velike površine cjevovoda približno prati promjene temperature staklenika, dok se temperatura polaza odnosi proporcionalno sa krivuljom otvorenosti tropnog ventila.



Slika 5-12: Povratna i polazna temperatura vode

Slika 5-13 prikazuje temperaturni profil vode u cijevima kroz vrijeme. Na početku simulacije temperatura vode u cijevima je pretpostavljena kao sobna temperatura ( $5^{\circ}\text{C}$ ). Uzimajući u obzir protok od  $50\text{ kg/s}$  te s poznatim volumenom cjevovoda potrebno je približno 20 minuta

da voda nakon početka simulacije dođe do kraja cjevovoda. Za vrijeme navedenog perioda temperatura vode povratnog toka je 5°C što se može vidjeti u grafu pražnjenja buffer-a, nakon čega temperatura raste razmjerno porastu temperature u stakleniku.



Slika 5-13: Temperature u cijevi kroz vrijeme

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana simulacija sustava grijanja staklenika u programskom jeziku Python. Simulacija se sastoji od geotermalnog izvora topline, kotla, spremnika tople vode, miješajućeg troputnog ventila te ogrjevnog tijela. U sklopu ovog rada program je razrađen na pojednostavljenom modelu stvarnosti no rezultati ukazuju na mogućnost široke primjene u industriji. Analizom sustava i rezultata simulacije objašnjeno je nekoliko interesantnih zaključaka.

Pokazana je isplativost spremnika tople vode koji pokrivaju vršna opterećenja te smanjuju potrebu za predimenzioniranim kotlovima. Spremnici tople vode u ovom sustavu su postavljeni tako da u situacijama smanjenog opterećenje geotermalni izvor može spremnike puniti toplom vodom bez utroška električne energije, samoizljevom.

Također, pokazano je da se spuštanjem temperature povratnog voda uvelike povećava iskoristivost geotermalnog izvora. Miješanje povratnog i polaznog voda mora se odvijati tako da se osigura najniža povratna temperatura moguća.

Kotao koji se nalazi nizvodno od buffera i geotermalnog izvora osigurava konstantu temperaturu vode koju troputni miješajući ventil prilagođava trenutnoj bilanci zgrade miješanjem polaznog i povratnog voda. Krivulja snage kotla je najbitnija veličina na kojoj se buduće analize trebaju temeljiti, ona predstavlja efikasnost sustava kao cjeline, a ponajviše miješajućeg ventila.

Rad obuhvaća razradu simulacije i tek jednostavnu analizu dobivenih varijabli dok je za složeniju analizu potrebno realističnije prikazati toplinske gubitke i dobitke. Ovakav tip dinamičkog simuliranja toplinskih sustava može uvelike olakšati odabir opreme i procjenu godišnjih troškova eksploatacije.

## 7. LITERATURA

- [1] M. K. McGowan: Plants are not people: load calculations for cannabis grow facilities, ASHRAE Journal, vol. 62, no. 4, April 2020.
- [2] Eduard Walther: Building Physics Applications in Python, 2021.
- [3] Lago J., Ridder F., Mazairac W., Schutter B.: A 1-dimensional continuous and smooth model for thermally stratified storage tanks including mixing and buoyancy, 2019.
- [4] Gutman P. O., Lindberg P. O., Ioslovich I., Seginer I.: A Non-Linear Optimal Greenhouse Control Problem Solved by Linear Programming, 1993.
- [5] Nouredine C.,A. Allouhi, A. El Maakoul, T. Kousksou, S. Saadeddine, A. Jamil: Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies, 2019.
- [6] K.D. Rafferty, P.E.:Chapter 14: GREENHOUSES
- [7] Galović A., Termodinamika 1., FSB , Zagreb
- [8] Galović A., Termodinamika 2., FSB , Zagreb
- [9] Ferdelji N., Predavanje iz kolegija Prijenos topline i tvari, FSB, Zagreb, 2021.
- [10] Balen I., Predavanje iz kolegija Grijanje, FSB, Zagreb, 2022.
- [11] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [12] Vox, G.; Teitel, M.; Pardossi, A.; Minuto, A.; Tinivella, F.; Schettini, E. Sustainable Greenhouse Systems. In Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management, New York, 2010.
- [13] 26. Roberts, D. (2020): Geothermal energy is poised for a big breakout, EDT  
<https://www.vox.com/energyandenvironment/2020/10/21/21515461/renewableenergygeothermal-egs-ags-supercritical>