

# Usporedba dinamičkih modela sustava s koncentriranim i distribuiranim parametrima

---

**Glavaš, Andrija**

**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:235:836328>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Andrija Glavaš**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ante Marušić, mag. ing.

Student:

Andrija Glavaš

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Anti Marušiću na pruženoj pomoći pri izradi ovog rada, te na strpljivosti i razumijevanju.

Zahvaljujem se obitelji na podršci tijekom dosadašnjeg studija.

Andrija Glavaš



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Andrija Glavaš**

JMBAG: **0035225786**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba dinamičkih modela sustava s koncentriranim i distribuiranim parametrima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Lumped and distributed parameters dynamic system models comparison**

Opis zadatka:

Računalne simulacije procesa temeljene na detaljnim matematičkim modelima igraju sve veću ulogu u analizi i razvoju kompleksnih termoenergetskih i procesnih postrojenja. Detaljne simulacije omogućavaju rani razvoj i optimizaciju regulacijskih sustava, kao i pred-namještanje parametara regulatora i prije samog puštanja postrojenja u pogon. Tijekom razvoja matematičkog modela potrebno je odrediti razinu pojednostavljenja koja će osigurati ravnotežu između kompleksnosti modela i zadovoljavajuće točnosti simulacije. Dok se za ispitivanje sustava regulacije procesa dinamički sustavi najčešće opisuju kao sustavi s koncentriranim parametrima, postoje slučajevi kada je poželjno sustave opisivati kao sustave s distribuiranim parametrima.

Na primjeru procesa akumulacije topline u spremniku energije sa spiralnim izmjenjivačem topline u okviru ovog rada potrebno je:

- 1) izvesti detaljan matematički model procesa temeljen na eksperimentalnom postavu koji se nalazi u Laboratoriju za energetska postrojenja;
- 2) izvesti matematički model spremnika kao sustava s koncentriranim parametrima i sustava s distribuiranim parametrima;
- 3) usporediti rezultate simulacija temeljenih na modelima iz točke 2) međusobno i s eksperimentalnim rezultatima;
- 4) ocijeniti primjenjivost oba modela za namještanje parametara regulatora.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Ante Marušić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

**SADRŽAJ**

1. UVOD.....	1
1.1. MATLAB.....	2
2. OPIS SUSTAVA .....	3
2.1. Pumpa.....	5
2.2. Protokomjer.....	7
2.3. Regulacijski ventil.....	8
2.4. Električni grijač.....	9
2.5. PLC upravljački sustav .....	9
3. OPIS SUSTAVA REGULACIJE .....	11
4. MATEMATIČKI MODEL.....	13
4.1. Model s koncentriranim parametrima .....	14
4.1.1. Energetska bilanca vode u spremniku.....	14
4.1.2. Energetska bilanca vode u izmjenjivaču.....	16
4.2. Model s distribuiranim parametrima.....	17
4.2.1. Energetska bilanca vode u spremniku.....	18
4.2.2. Energetska bilanca vode u izmjenjivaču.....	20
5. ANALIZA REZULTATA .....	22
5.1. Validacija rezultata .....	22
5.2. Rezultati simulacije.....	24
5.2.1. Regulacija broja okretaja pumpe, model s koncentriranim parametrima .....	24
5.2.2. Regulacija broja okretaja pumpe, model s distribuiranim parametrima .....	27
5.2.3. Regulacija otvorenosti ventila, model s koncentriranim parametrima .....	29
5.2.4. Procesna regulacija otvorenosti ventila, model s distribuiranim parametrima ...	30
5.2.5. Usporedba rezultata modela s koncentriranim i distribuiranim parametrima.....	31
6. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34
PRILOZI.....	35

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Shema eksperimentalne linije [5].....	3
Slika 2. Izvedeni sustav .....	4
Slika 3. Pumpa Grundfos Alpha 1L 25-40 130 [6].....	5
Slika 4. Karakteristika pumpe [6] .....	6
Slika 5. Prostorna ravnina ovisnosti protoka, dobave pumpe i broja okretaja pumpe .....	7
Slika 6. Protokomjer Badger Meter (3/8).....	7
Slika 7. Regulacijski ventil ESBE VLG 100 + ALG 438 [7] .....	8
Slika 8. Karakteristika ventila [7] .....	8
Slika 9. Električni grijač Unival 3.0 [8] .....	9
Slika 10. Upravljački Siemens PLC sustav s dodatnim modulima .....	10
Slika 11. Shema jednostavnog sustava regulacije s negativnom povratnom vezom .....	11
Slika 12. Moodyjev dijagram [9] .....	14
Slika 13. Prikaz podjele spremnika .....	17
Slika 14. Shematski prikaz konvekcije u spremniku.....	17
Slika 15. Slobodna konvekcija u spremniku .....	18
Slika 16. Rezultati mjerenja vode u spremniku.....	22
Slika 17. Usporedba izmjerenih i simuliranih rezultata modela s distribuiranim parametrima	23
Slika 18. Usporedba izmjerenih i simuliranih rezultata modela s koncentriranim parametrima .....	24
Slika 19. Temperatura vode u spremniku, model s koncentriranim parametrima .....	25
Slika 20. Temperature vode u izmjenjivaču, model s koncentriranim parametrima.....	25
Slika 21. Temperatura vode u spremniku, model s koncentriranim parametrima i regulacijom .....	26
Slika 22. Temperature slojeva vode u izmjenjivaču, model s koncentriranim parametrima i regulacijom.....	26
Slika 23. Temperature slojeva vode unutarnjeg volumena .....	27
Slika 24. Temperature slojeva vode vanjskog volumena .....	27
Slika 25. Temperature slojeva vode u izmjenjivaču, model s distribuiranim parametrima, 80% nominalne snage grijača .....	28
Slika 26. Temperatura slojeva vode u izmjenjivaču, model s distribuiranim parametrima, maksimalna snaga grijača.....	28
Slika 27. Temperatura vode u spremniku pri regulaciji otvorenosti ventila .....	29
Slika 28. Karakteristike temperatura u slojevima vode u izmjenjivaču ,model s koncentriranim parametrima pri regulaciji otvorenosti ventila .....	30
Slika 29. Karakteristika temperature u slojevima vode u izmjenjivaču, model s distribuiranim parametrima pri regulaciji otvorenosti ventila .....	30
Slika 30. Usporedba temperatura na izlazu iz izmjenjivača modela s koncentriranim i distribuiranim parametrima, regulacija brzine rada pumpe.....	31
Slika 31. Usporedba protok kroz izmjenjivač modela s koncentriranim i distribuiranim parametrima, regulacija brzine rada pumpe .....	32

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Popis korištene opreme ..... 4



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_b$	$m^2$	Površina baze spremnika
$A_{bu}$	$m^2$	Površina presjeka unutarnjeg sloja vode
$A_{bv}$	$m^2$	Površina presjeka vanjskog sloja vode
$A_p$	$m^2$	Površina dodira vode i stijenke od pleksiglasa
$A_{pr}$	$m^2$	Unutarnja površina presjeka cijevi izmjenjivača
$A_s$	$m^2$	Površina dodira vanjskog i unutarnjeg volumena spremnika
$A_u$	$m^2$	Unutarnja površina izmjenjivačke površine izmjenjivača
$c_w$	J/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet vode
$d_u$	m	Unutarnji promjer cijevi izmjenjivača i cjevovoda
f	-	Faktor trenja u cjevovodu
g	$m/s^2$	Ubrzanje Zemljine sile teže
H	m	Visina dobave pumpe
K	-	Ukupni koeficijent lokalnih gubitaka cjevovoda
$k_b$	W/( $m^2K$ )	Koeficijent prolaza topline baze spremnika
$k_p$	W/( $m^2K$ )	Koeficijent prolaza topline kroz stijenku pleksiglasa
$k_u$	W/( $m^2K$ )	Koeficijent prolaza topline kroz bakrenu cijev
$L_{uk}$	m	Ukupna duljina cjevovoda
$M_c$	kg	Masa vode u cjevovodu
Nu	-	Nusseltov broj
$P_{el}$	W	Snaga grijača
$\Delta p_{pumpa}$	Pa	Dobava pumpe
Pr	-	Prandtlov broj
Q	$m^3/s$	Protok vode u cjevovodu
$Q_s$	$m^3/s$	Cirkulacija vode u spremniku pri prirodnoj konvekciji
$r_b$	m	Unutarnji primjer stijenke pleksiglasa
Re	-	Reynoldsov broj
$r_u$	m	Unutarnji polumjer bakrene cijev izmjenjivača
s	m	Udaljenost referentnih točaka vanjskog i unutarnjeg volumena
$s_b$	m	Debljina stijenke bakrenog izmjenjivača
$s_{in}$	m	Debljina postolja nehrđajućeg čelika
$s_p$	m	Debljina stijenke pleksiglasa

$t$	s	Vrijeme
$T_{in}$	$^{\circ}C$	Temperatura n-tog sloja vode u izmjenjivaču
$T_{ok}$	$^{\circ}C$	Temperatura okoliša
$T_s$	$^{\circ}C$	Temperatura vode u spremniku
$T_{ul}$	$^{\circ}C$	Temperatura vode na ulazu u izmjenjivač
$T_{un}$	$^{\circ}C$	Temperatura n-tog sloja vode u unutarnjem volumenu spremnika
$T_{vn}$	$^{\circ}C$	Temperatura n-tog sloja vode u vanjskom volumenu spremnika
$V_c$	$m^3$	Volumen vode u cjevovodu
$V$	$m^3$	Volumen vode u izmjenjivaču
$V_s$	$m^3$	Volumen spremnika
$V_u$	$m^3$	Volumen unutarnjeg dijela spremnika
$V_v$	$m^3$	Volumen vanjskog dijela spremnika
$w$	m/s	Brzina vode u cjevovodu
$\lambda_b$	W/(mK)	Koeficijent toplinske provodnosti bakra
$\lambda_{in}$	W/(mK)	Koeficijent toplinske provodnosti nehrđajućeg čelika
$\lambda_p$	W/(mK)	Koeficijent toplinske provodnosti pleksiglasa
$\lambda_w$	W/(mK)	Koeficijent toplinske provodnosti vode
$\rho_w$	$kg/m^3$	Gustoća vode
$\alpha_u$	W/( $m^2K$ )	Unutarnji koeficijent prijelaza topline voda-bakar
$\alpha_v$	W/( $m^2K$ )	Vanjski koeficijent prijelaza topline voda-bakar
$\alpha_{zr}$	W/( $m^2K$ )	Koeficijent prijelaza topline zrak-pleksiglas
$\mu_w$	Pa s	Dinamička viskoznost vode

---

**SAŽETAK**

U radu je napravljena usporedba dva pristupa modeliranju dinamike jednostavnog sustava koji uključuje spremnik topline sa spiralnim izmjenjivačem. Razvijeni dinamički modeli validirani su na temelju eksperimentalnih podataka. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za energetska postrojenja. U prvom dijelu rada opisan je predmetni sustav i njegove osnovne komponente. Opisana je oprema za upravljanje i praćenje procesa te princip procesne regulacije u sustavu. U drugom dijelu rada razvijena su dva detaljna matematička modela sustava. Razvijeni modeli potom su validirani. U završnom dijelu rada međusobno su uspoređeni rezultati simulacija temeljenih na modelima s koncentriranim i distribuiranim parametrima. Simulacije su izvedene u programskom paketu *MATLAB*, odnosno dodatku programa *SIMULINK*.

Ključne riječi: procesna regulacija, validacija modela, simulacija dinamike prijenosa topline

---

**SUMMARY**

The paper compares two approaches to modeling the dynamics of a simple system that includes a heat storage tank with a spiral exchanger. The developed dynamic models were validated on the basis of experimental data. The experiment was conducted in the Laboratory for energy plants. The first part of the paper describes the subject system and its basic components. The equipment for managing and monitoring the process and the principle of process regulation in the system are described. In the second part of the work, two detailed mathematical models of the system were developed. The developed models were then validated. In the final part of the paper, the results of simulations based on models with concentrated and distributed parameters were compared. The simulations were performed in the MATLAB software package, i.e. the SIMULINK program add-on.

Key words: proces regulation, model validation, simulation of heat transfer dynamics

## 1. UVOD

Procesna regulacija se susreće gotovo svakodnevno u životu, a cilj je održati jednu ili više promjenjivih veličina na određenoj razini unatoč utjecajima okoline. Regulacija može biti nisko tehnološka kao regulacija razine vode u vodokotliću, pa sve do visoko tehnoloških primjera kao elektronički uređaji u automobilu. Procesi regulacije mogu biti upravljani ručno ili pomoću kompjutorski upravljanih sustava ugrađenih u mikroprocesorski kontrolni uređaj. Regulirati se može jedna i/ili više varijabli. Tako na primjer gotovo svako kućanstvo ima uređaje koje gotovo svakodnevno koristi, a u koje je ugrađen bar jedan mikrokontroler, dok moderni automobili mogu imati i preko 100 mikrokontrolera. U procesnoj industriji, kontroleri igraju ključnu prirodu pogonskih postrojenja, od običnog punjenja spremnika, preko regulacije broja okretaja pumpe, do složenih kemijskih procesa. Kod dizajniranja regulacijskih sustava bitno je shvatiti ulogu promjenjivih varijabli. Onda je potrebno odlučiti koje komponente se želi kontrolirati, čime se želi manipulirati, koji su izvori promjena u procesu i sl. Kad su svi parametri procesa poznati, odabiru se kontroleri, aktuatori i drugi dijelovi upravljačkog procesa, te je nakon svega potrebno znati kako upravljati kontrolerom i nadzirati ga. Uz sve navedeno je potrebno uzeti u obzir mjere zaštite kako ne bi došlo do ugrožavanja sudionika procesa i okoline. [1], [2]

Projektiranje sustava regulacije može biti složen proces te je često potrebno provesti određene simulacije prije nego se ideja procesa pretvori u stvarnost, kako bi se provjerilo hoće li proces funkcionirati onako kako je zamišljeno. Razvoj sustava regulacije bez prethodnih detaljnih simulacija, čak i kod jednostavnijih procesa, može dovesti do značajnih dodatnih troškova prilikom puštanja procesa u pogon. Računalne simulacije procesa temeljene na detaljnim matematičkim modelima igraju sve veću ulogu u analizi i razvoju kompleksnih termoenergetskih i procesnih postrojenja. Detaljne simulacije omogućavaju rani razvoj i optimizaciju regulacijskih sustava, kao i pred-namještanje parametara regulatora i prije samog puštanja postrojenja u pogon. Tijekom razvoja matematičkog modela potrebno je odrediti razinu pojednostavljenja koja će osigurati ravnotežu između kompleksnosti modela i zadovoljavajuće točnosti simulacije. Dok se za ispitivanje sustava regulacije procesa dinamički sustavi najčešće opisuju kao sustavi s koncentriranim parametrima, postoje slučajevi kada je poželjno sustave opisivati kao sustave s distributivnim parametrima.

U zadatku se koriste regulatori koji su isprogramirani u PLC upravljački sustav. Oni reguliraju temperaturu vode u spremniku i izmjenjivaču, kako je opisano u nastavku rada. Cilj rada je zapravo napraviti usporedbu simulacije rada procesne regulacije sa stvarnim procesom

regulacije. Prvo je napravljen matematički model simulacije, te je simulacija provedena u programskom paketu *MATLAB*, odnosno njegovu dodatku *SIMULINK*. Nakon toga je proveden eksperiment te je provedena usporedba simulacije sa stvarnim odzivom komponenti.

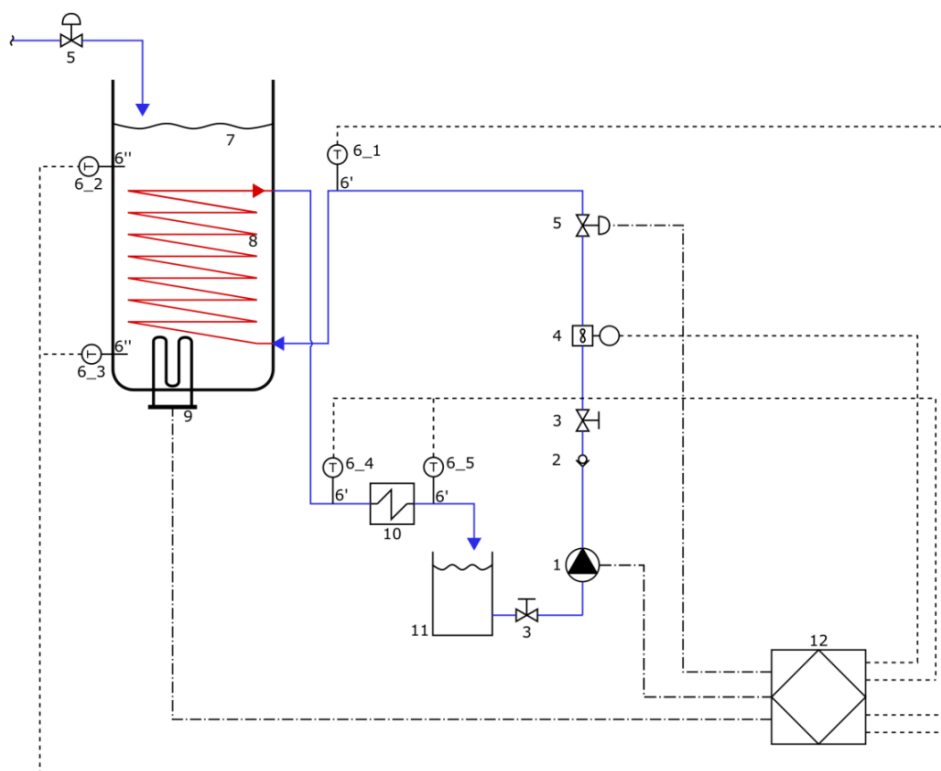
### **1.1. MATLAB**

*MATLAB (Matrix Laboratory) je programski jezik visoke razine, odnosno jezik s visokom razinom apstrakcije, koji čini interaktivno okruženje za numeričke proračune, vizualizacije i programiranje. MATLAB se primjenjuje u analizi i obradi te vizualizaciji podataka, razvoju algoritama i aplikacija, modeliranju i simulacijama, različitim matematičkim proračunima te raznim drugim područjima. Unutar MATLAB-a su unaprijed ugrađene funkcije i alati koji znatno ubrzavaju proces rješavanja problema. Osim unaprijed određenih funkcija, korisnik može i sam razvijati vlastite alata i funkcije ili doraditi postojeće. [3]*

SIMULINK je dodatni program unutar programskog paketa MATLAB. Koriste se za provedbu simulacija. MATLAB i SIMULINK nude modeliranje dinamike postrojenja, projektiranje kontrolnih algoritama i izvođenje simulacije zatvorene petlje. [4]

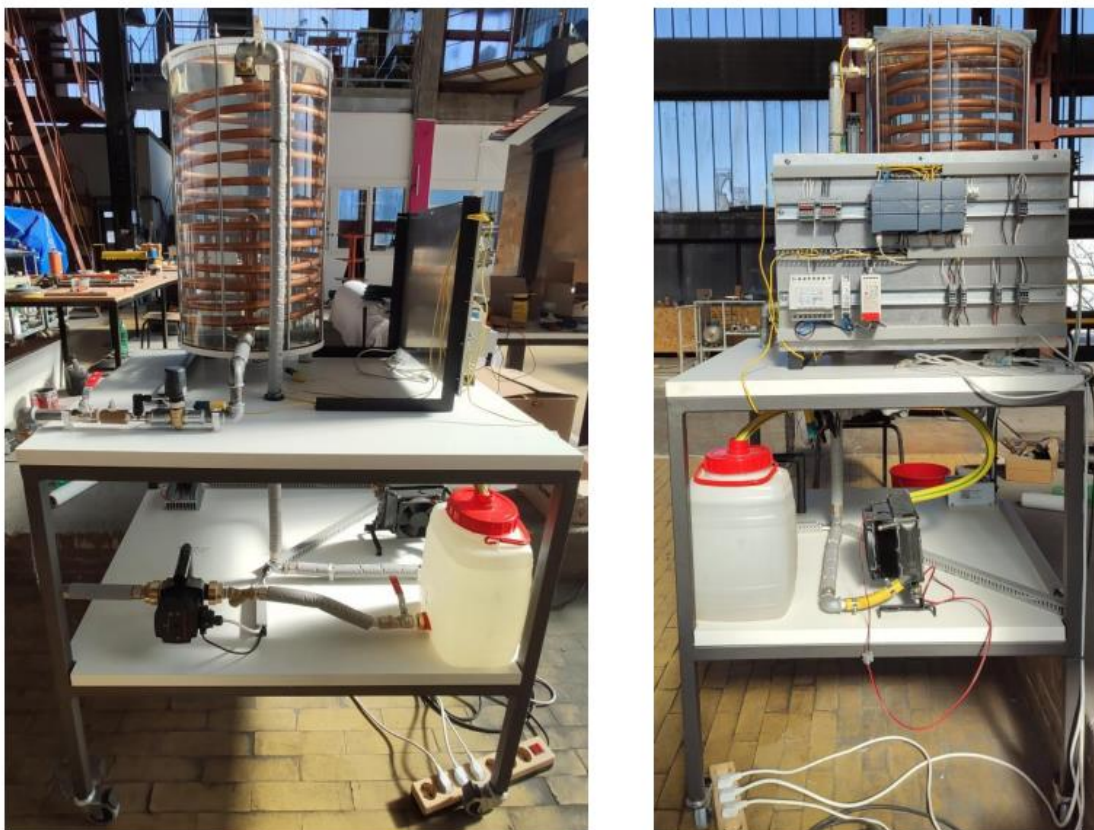
## 2. OPIS SUSTAVA

U Laboratoriju za energetska postrojenja nalazi se eksperimentalna linija za regulaciju jednostavnog procesa akumulacije i izmjene topline te regulacije protoka. Pojednostavljena shema eksperimentalne linije prikazana je na slici 1.



**Slika 1. Shema eksperimentalne linije [5]**

Linija se sastoji od pleksiglas spremnika vode (7) volumena 70 l s električnim grijačem (9) snage 3 kW upravljanim preko poluvodičkog releja te kruga za izmjenu topline. Spremnik i krug za izmjenu topline izmjenjuju toplinu preko bakrenog izmjenjivača (8) ukupne duljine 11 m, debljine stijenke 1 mm i unutarnjeg promjera 16 mm uronjenog u spremnik. Strujanje vode kroz sekundarni krug osigurava pumpa s promjenjivom brzinom vrtnje (1), protok vode mjeri se turbinskim protokomjerom (4) a regulira se regulacijskim ventilom (5). Za praćenje temperatura u sustavu koristi se 5 termoparova (6\_x). Za upravljanje, regulaciju i akviziciju mjernih veličina koristi se industrijski Siemens PLC (12) proširen s dodatnim modulima. Toplina preuzeta iz spremnika odbacuje se u okoliš preko hladnjaka (10). Detaljniji popis opreme nalazi se u tablici Tablica 1. Cijeli sustav je izrađen „in house“ u Laboratoriju za energetska postrojenja, a izvedeni sustav je prikazan na slici 2.



Slika 2. Izvedeni sustav

Sustavom se upravlja korištenjem računala preko jednostavnog SCADA sustava izrađenog u Siemens WinCC Advanced softveru. Za programiranje PLC-a korišten je Siemens Step7 softver, odnosno TIA portal V17. [5]

Tablica 1. Popis korištene opreme

Broj	Naziv	Model	Komentar
1	Pumpa	Grundfos Alpha 1L 25-40 130	Upravljanje brzine vrtnje
2	Nepovratni ventil	ITAP 1/2"	
3	Zaporni ventil	ARCO 1/2"	
4	Protokomjer	Badger Meter (3/8)	Prozirno kućište
5	Regulacijski ventil	ESBE VLG 100 + ALG 438	
6	Termopar	Omega	Tip K
7	Spremnik	Vlastita proizvodnja	Pleksiglas, 70 litara



<b>8</b>	Bakreni izmjenjivač	Vlastita proizvodnja	11m, 18x1mm
<b>9</b>	Električni grijač	Unival EH 3.0	3 kW
<b>10</b>	Hladnjak		Hladnjak motora s ventilatorom
<b>11</b>	Sekundarni spremnik		10 litara
<b>12</b>	PLC	Siemens Simatic S7-1200 Thermocouple modul Analog I/O modul	
<b>13</b>	Poluvodički relej	Panasonic AQA211VL	Za regulaciju snage el. grijača

Na shemi i u tablici s opremom se nalazi nepovratni ventil, no kasnije je izbačen iz sustava zbog odzračivanja.

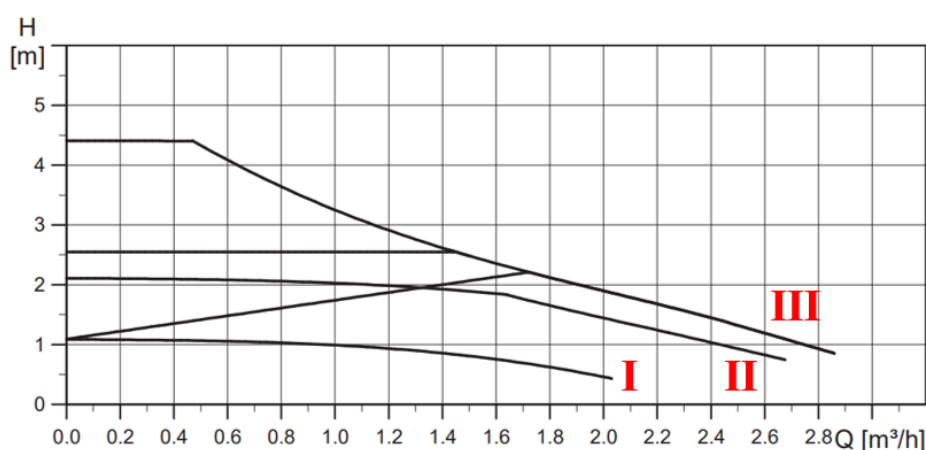
## 2.1. Pumpa

Za pumpu je korišten model Grundfos Alpha 1L 25-40 130, prikazan na slici 3.



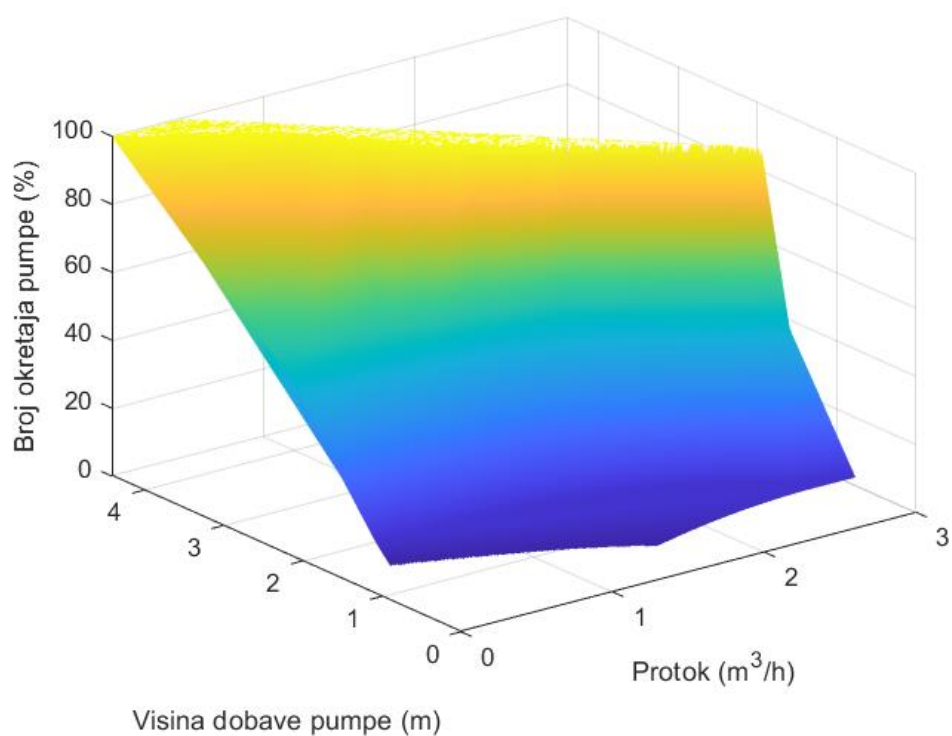
Slika 3. Pumpa Grundgos Alpha 1L 25-40 130 [6]

Pumpa radi s promjenjivom brzinom vrtnje, što omogućuje promjenu protoka odnosno visine dobave pumpe. Pumpa je upravljana preko PLC sustava koji, ovisno o podacima o temperaturi, povećava ili smanjuje protok promjenom broja okretaja pumpe čime omogućuje regulaciju temperature na izlazu iz izmjenjivača. Ako je temperatura vode na izlazu izmjenjivača veća od zadane, potrebno je povećati broj okretaja pumpe čime se povećava protok i smanjuje temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača. Nasuprot, ako je temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača manja od zadane, potrebno je smanjiti broj okretaja pumpe čime se smanjuje protok i povećava temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača. Na slici 4 prikazana je Q-H karakteristika pumpe za 3 različite brzine vrtnje.



Slika 4. Karakteristika pumpe [6]

Apscisa predstavlja protok, a ordinata visinu dobave pumpe. Linija III predstavlja rad pumpe pri maksimalnom broju okretaja. Linija I predstavlja rad pumpe pri minimalnom broju okretaja. Dok linija II predstavlja rad pumpe pri broju okretaja između minimalnog i maksimalnog, te se može nalaziti bilo gdje između te dvije linije. To bi značilo da se vrijednost broja okretaja pumpe, ovisno o izlaznoj temperaturi iz izmjenjivača, može nalaziti bilo gdje između linija I i III. Ta liniju koja prikazuje konstantan broj okretaja, visina dobave pumpe definirana je protokom, što bi značilo da postoji 3D krivulja definirana s dvije od sljedeće tri varijable: protokom, dobavom i brojem okretaja pumpe. Navedena površina prikazana je na slici 5.



**Slika 5. Prostorna ravnina ovisnosti protoka, dobave pumpe i broja okretaja pumpe**

Pri očitavanju iz prostorne ravnine, ulazni podaci će biti broj okretaja i protok, a očitavati će se visina dobave pumpe.

## 2.2. Protokomjer

Za protokomjer je korišten model Badger Meter (3/8) koji se nalazi na slici 6.



**Slika 6. Protokomjer Badger Meter (3/8)**

Protokomjer služi za mjerenje protoka. Navedeni protokomjer ima prozirno kućište kroz koje prolazi voda. U kućištu se nalazi turbina. U PLC sustav se šalje informacija o broju okretaja turbine, te se pomoću te informacije izračuna protok vode koji se koristi za daljnji proračun.

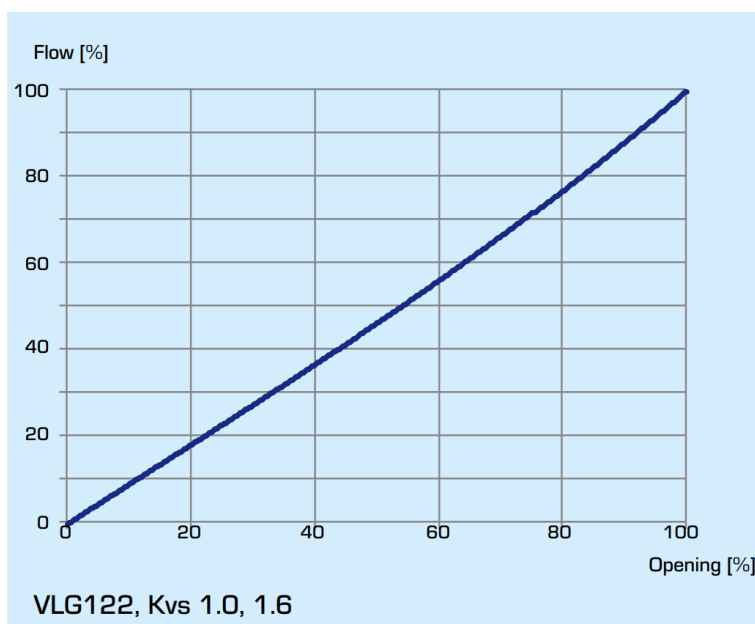
### 2.3. Regulacijski ventil

Za regulacijski ventil korišten je ventil ESBE VLG 100 + ALG 438 prikazan na slici 7.



Slika 7. Regulacijski ventil ESBE VLG 100 + ALG 438 [7]

Regulacijski ventil regulira protok medija smanjenjem i povećanjem presjeka kroz koji prolazi medij. Ovisnost protoka o postotku otvorenosti ventila nalazi se na slici 8.



Slika 8. Karakteristika ventila [7]

Na slici je vidljivo da je karakteristika ventila približno linearna, što bi značilo da je promjena podizanja pladnja u ventilu proporcionalna promjeni vrijednosti volumenskog protoka.

## 2.4. Električni grijač

Za električni grijač je korišten grijač proizvođača Unival model 3.0, nominalne snage 3 kW, prikazan na slici 9.



**Slika 9. Električni grijač Unival 3.0 [8]**

Snaga grijača regulira temperaturu vode u spremniku. Regulira se pomoću SSR (Solid state relay) uređaja i PWM (Pulse width modulation) modulacije. SSR je elektronički uređaj koji nema mehaničkih dijelova i radi na principu On/Off, odnosno pali i gasi grijač, ovisno o potrebi. Koliki je iznos snage grijača ovisi o temperaturi vode u spremniku, a njim upravlja PWM modulacija. Ona određuje amplitudu signala, odnosno iznos snage grijača.

## 2.5. PLC upravljački sustav

Za upravljački sustav regulacije korišten je PLC model Siemens Simatic S7-1200 s dva dodatna modula: Thermocouple modul i Analog I/O modul. Centralna jedinica s oba modula prikazana je na slici 10.



**Slika 10. Upravljački Siemens PLC sustav s dodatnim modulima**

U navedeni sustav su isprogramirani regulacijski algoritmi pomoću kojih se regulira snaga grijača, otvorenost ventila i brzina vrtnje pumpe.

### 3. OPIS SUSTAVA REGULACIJE

U sustavu su isprogramirana 3 PID regulatora koji omogućavaju regulaciju temperature u spremniku i temperature na izlazu iz izmjenjivača. Svi izvršni uređaji mogu se upravljati ručno ili preko PID regulatora. Režim rada izvršnog uređaja bira se korištenjem grafičkog sučelja. Regulatori u sustavu su:

a) Regulator snage grijača

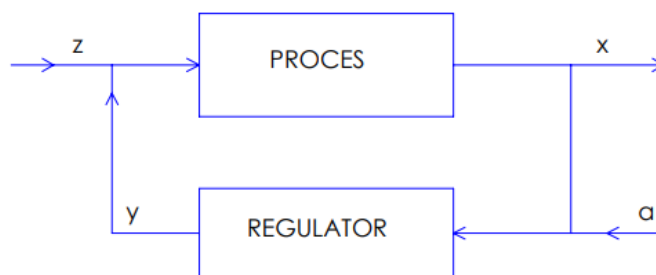
Temperatura vode unutar spremnika regulira se promjenom snage električnog grijača. Nazivna snaga grijača iznosi 3 kW. Temperatura u spremniku računa se kao srednja temperatura gornjeg (6\_2) i donjeg (6\_3) termopara unutar spremnika. Snaga grijača mijenja se periodičnim paljenjem grijača (PWM metoda) . Regulator snage grijača radi neovisno o protoku i temperaturi na izlazu iz spiralnog izmjenjivača.

b) Regulator otvorenosti ventila

Temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača regulira se mijenjanjem protoka, odnosno mijenjanjem otvorenosti ventila. Temperatura se mjeri pomoću termopara koji se nalazi na izlazu iz bakrenog izmjenjivača (6\_4). PLC šalje naponski signal (0-10) koji proporcionalno otvara termoelektrični regulacijski ventil. Regulacijski ventil je jako spor (0-100% otvaranje traje 400 s).

c) Regulator brzine vrtnje pumpe

Kao i u prethodnom slučaju temperatura na izlazu iz izmjenjivača regulira se mijenjanjem protoka. Protok se u ovom slučaju upravlja promjenom brzine pumpe dok je otvorenost regulacijskog ventila konstantna. Ova metoda regulacije značajno je brža od prethodne, no ima manje područje rada zbog minimalnog broja okretaja pumpe.



Slika 11. Shema jednostavnog sustava regulacije s negativnom povratnom vezom

---

U proces ulazi varijabla  $z$ , a izlazi varijabla  $x$ , ona ulazi u regulator gdje se uspoređuje sa zadanom vrijednosti  $a$  za varijablu  $x$ , te pomoću PID regulacije varijablom  $y$  utječe na vrijednost ulazne varijable u proces kako bi iz procesa izašla tražena vrijednost varijable  $x$ .



## 4. MATEMATIČKI MODEL

U sklopu zadatka potrebno je izvesti matematički model dinamike promjene temperature na izlazu iz izmjenjivača, te temperature vode u spremniku. U ovisnosti o diskretizaciji spremnika, izvedena su dva modela:

- a) model s koncentriranim parametrima,
- b) model s distribuiranim parametrima.

Kod modela s koncentriranim parametrima spremnik se gleda kao jedna cjelina, dok je kod modela s distribuiranim parametrima podijeljen na deset dijelova. Neovisno o spremniku, izmjenjivač je u oba slučaja podijeljen na deset dijelova.

Bez obzira na diskretizaciju spremnika, jednačba očuvanja količine gibanja (JKG) glasi jednako:

$$\frac{d(M_c \cdot w)}{dt} = \Delta p_{pumpa} \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} - \frac{f \cdot L_{uk}}{d_u} \cdot \frac{\rho_w \cdot w^2}{2} \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} - K \cdot \frac{\rho_w \cdot w^2}{2} \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4}$$

U navedenoj jednačbi prvi član s desne strane jednačbe predstavlja visinu dobave pumpe, a preostala dva člana predstavljaju linijske i lokalne gubitke. Masa vode u cjevovodu je konstantna, te se u jednačbu uvrste sljedeće jednakosti:

$$M_c = \rho_w \cdot V_c$$

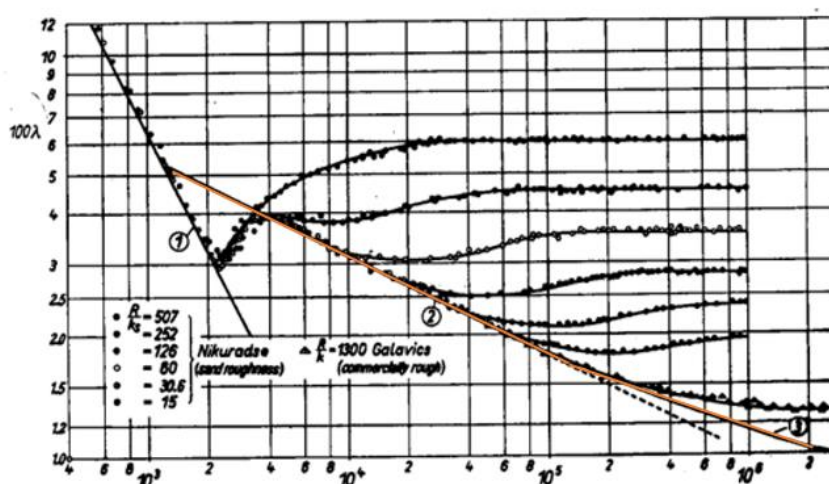
$$w = \frac{Q}{A_{pr}}$$

$$\Delta p_{pumpa} = \rho_w \cdot g \cdot H$$

Oznaka  $f$  predstavlja faktor trenja. Za laminarno strujanje vrijedi jednačba:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Za turbulentno strujanje faktor trenja očitava se iz Moodyjevog dijagrama u ovisnosti o Reynoldsovu broju.



Slika 12. Moodyjev dijagram [9]

Konačna JKG za cjevovod glasi

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{A_{pr}^2}{\rho_w \cdot V_c} \cdot \left( \rho_w \cdot g \cdot H - \frac{\rho_w \cdot Q^2}{2 \cdot A_{pr}} \cdot \left( \frac{f \cdot L_{uk}}{d_u} + K \right) \right)$$

Pomoću JKG cjevovoda dobije se ovisnost protoka o visini dobave pumpe.

#### 4.1. Model s koncentriranim parametrima

Kod modela s koncentriranim parametrima, cijeli volumen spremnika se uzima kao jedna cjelina, dok je voda u izmjenjivaču podijeljena na deset dijelova. Kod ovog modela u obzir su uzete sljedeće pretpostavke:

- spremnik nije u potpunosti ispunjen vodom, već se iznad gornjeg sloja vode nalazi i sloj zraka, te je zanemaren prijenos topline na taj sloj zraka,
- zanemarena promjena gustoće vode i specifičnog toplinskog kapaciteta promjenom temperature.

##### 4.1.1. Energetska bilanca vode u spremniku

Promjena energije vode u spremniku jednaka je razlici ulaznih i izlaznih energetskih tokova.

$$\frac{dE}{dt} = E_{ulaz} - E_{izlaz}$$

Kod ovog modela ulazni energetski tok sustava vode u spremniku je toplinska snaga predana od grijača, a izlazni energetski tok čine toplinski tok predan prema deset slojeva vode u

spremniku i toplinski tok predana okolišu kroz stijenku pleksiglasa i postolje od nehrđajućeg čelika.

$$\frac{d(V_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot T_s)}{dt} = P_{el} - \sum_{n=1}^{10} k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_s - T_{in})$$

$$-k_p \cdot A_p \cdot (T_s - T_{ok}) - k_b \cdot A_b \cdot (T_s - T_{ok})$$

Član  $\sum_{n=1}^{10} k_u \cdot A_u \cdot (T_s - T_{in})$  u prethodnoj jednadžbi predstavlja sumu toplinskih tokova predanih od vode u spremniku prema deset slojeva vode u izmjenjivaču. Konačni oblik te jednadžbe je sljedeći:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{V_s \cdot \rho_w \cdot c_w} \cdot (P_{el} - \sum_{n=1}^{10} k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_s - T_{in}))$$

$$-k_p \cdot A_p \cdot (T_s - T_{ok}) - k_b \cdot A_b \cdot (T_s - T_{ok})$$

U prethodnoj jednadžbi  $k_u$  predstavlja koeficijent prolaza topline između vode u spremniku i vode u izmjenjivaču. Njegova jednadžba glasi:

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{r_u}{\lambda_b} \cdot \ln\left(\frac{r_u + s_b}{r_u}\right) + \frac{r_u}{\alpha_v}}$$

Koeficijent prijelaza topline  $\alpha_u$  se mijenja s promjenom temperature, te se za laminarno strujanje modelira pomoću sljedeće jednadžbe [10]:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 13 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

Za turbulentno strujanje modelira se pomoću Gnielinskiove korelacije [10]:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

U prethodnim jednadžbama  $Nu$ ,  $Re$  i  $Pr$  predstavljaju redom Nusseltovu, Reynoldsovu i Prandtlovu značajku koje se izražavaju sljedećim jednadžbama:

$$Nu = \frac{\alpha_u \cdot d_u}{\lambda_w}$$

$$Re = \frac{w \cdot d_u \cdot \rho_w}{\mu_w}$$

$$Pr = \frac{\mu_w \cdot c_w}{\lambda_w}$$

Član  $f$  iz Gnielinskiove korelacije predstavlja faktor trenja. Nakon što su poznate sve značajke, te se vrijednost brzine  $w$  izrazi pomoću omjera protoka i površine unutarnjeg presjeka cijevi, dobije se konačni izraz za koeficijent prijelaza topline koji glasi:

$$\alpha_u = \frac{\frac{f \cdot \mu_w \cdot c_w}{8 \cdot d_u} \cdot \left( \frac{d_u \cdot \rho_w \cdot Q}{\mu_w \cdot A_{pr}} - 1000 \right)}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot \left( \left( \frac{\mu_w \cdot c_w}{\lambda_w} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}$$

U jednadžbi očuvanja energije nalazi se koeficijent prolaza topline  $k_b$  koji se koristi pri proračunu prijelaza topline iz spremnika kroz bazu spremnika od nehrđajućeg čelika, te se računa prema sljedećem izrazu:

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{s_{in}}{\lambda_{in}} + \frac{1}{\alpha_{zr}}}$$

U jednadžbi očuvanja energije se nalazi i član  $k_p$  koji predstavlja koeficijent prolaza topline između vode u izmjenjivaču i okoliša kroz stijenku pleksiglasa, te njegova jednadžba glasi:

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{r_b}{\lambda_p} \cdot \ln\left(\frac{r_b + s_p}{r_b}\right) + \frac{r_b}{(r_b + s_p) \cdot \alpha_{zr}}}$$

#### 4.1.2. Energetska bilanca vode u izmjenjivaču

Kao što je već rečeno, voda u izmjenjivaču je podijeljena na deset slojeva. Voda iz spremnika predaje toplinski tok vodi u izmjenjivaču. Toplinska tromost stijenke izmjenjivača je zanemarena, te je u svakom trenutku pretpostavljena progrijanost stijenke. Voda koja ulazi u izmjenjivač predaje toplinski tok prvom sloju vode, a izlazni toplinski tok iz prvog sloja je toplinski tok predat drugom sloju vode u izmjenjivaču. Jednadžba prvog sloja vode u izmjenjivaču glasi:

$$\frac{dT_{i1}}{dt} = \frac{10}{V_i \cdot \rho_w \cdot c_w} (k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_s - T_{i1}) + Q \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{ul} - T_{i1}))$$

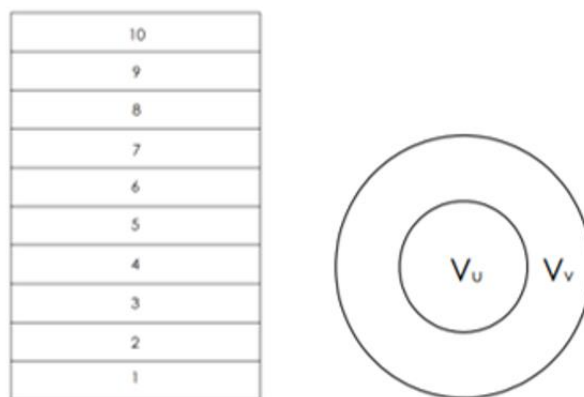
Jednadžbe za preostalih devet slojeva glase

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{10}{V_i \cdot \rho_w \cdot c_w} \cdot \left( k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_s - T_{in}) + Q \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{i(n-1)} - T_{in}) \right)$$

gdje je  $n=2 \dots 10$ .

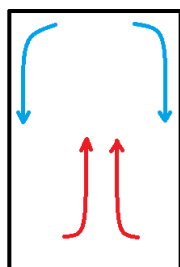
## 4.2. Model s distribuiranim parametrima

Kod modela s distribuiranim parametrima, spremnik i izmjenjivač topline su podijeljeni na 10 jednakih dijelova. Pri tome je za daljnji proračun najdonji dio spremnika, onaj gdje dolazi grijalica, uzet kao prvi sloj, a najgornji dio spremnika je uzet kao deseti sloj, kao što je prikazano na slici 13 lijevo.



**Slika 13. Prikaz podjele spremnika**

U spremniku se odvija konvekcija gdje se voda na dnu spremnika zagrijava pomoću toplinskog toka koji predaje grijalica, slobodnom konvekcijom kroz središnji dio volumena ide prema gore, tj. kroz unutarnji volumen, te se oko tog središnjeg volumena, tj. vanjskim volumenom vraća na dno spremnika, gdje se ponovno zagrijava, te proces počinje ponovno. Opisani proces je pojednostavljeno prikazan na slici 14.



**Slika 14. Shematski prikaz konvekcije u spremniku**

Stvarni prikaz slobodne konvekcije je prikazan na slici 15.



**Slika 15. Slobodna konvekcija u spremniku**

Znači da je spremnik osim poprečne podjele na deset dijelova, vertikalno podijeljen na dva volumena, na unutarnji kroz koji se uzdiže zagrijana voda, i vanjski kroz koji se hladnija voda vraća na dno spremnika. Izmjenjivač topline se nalazi u vanjskom volumenu. Poprečni presjek volumena je prikazan na slici 13 desno.

Unutarnji volumen se proteže kroz unutarnji krug na slici 13, a vanjski volumen prolazi kružnim vijencem. Spremnik je prema tome podijeljen na dvadeset dijelova, deset dijelova unutarnjeg volumena i deset dijelova vanjskog volumena.

U obzir su uzete sljedeće pretpostavke:

- proces predaje toplinske snage od grijalice vodi u spremniku se odvija u prva četiri sloja vode,
- spremnik nije u potpunosti ispunjen vodom, već se iznad gornjeg sloja vode nalazi i sloj zraka, te je zanemaren prijenos toplinskog toka na sloj zraka,
- zanemarena promjena gustoće vode i specifičnog toplinskog kapaciteta promjenom temperature,
- pri proračunu površine slojeva vode, zanemarena površina cijevi.

Za svaki pojedini sloj vode u spremniku i vode u izmjenjivaču postavljena je jedna jednadžba očuvanja energije.

#### **4.2.1. Energetska bilanca vode u spremniku**

Kod prvog sloja unutarnjeg volumena vode energetski tok koji ulazi je toplinska snaga dobivena od grijalice i energetski tok koji dolazi iz sloja vode predane od vanjskog volumena. Izlazni energetski čine energetski tokovi predani drugom sloju vode i okolišu kroz postolje od nehrđajućeg čelika, te toplinski tok predan kondukcijom prvom sloju vanjskog volumena vode.

$$\frac{d\left(\frac{V_u}{10} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot T_{u1}\right)}{dt} = \frac{P_{el}}{4} + Q_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{v1} - T_{u1})$$

$$-k_b \cdot A_{bu} \cdot (T_{u1} - T_{ok}) - \lambda_w \cdot \frac{A_s}{10} \cdot s \cdot (T_{u1} - T_{v1})$$

Nakon što se uzme u obzir da su članovi u  $V_u$ ,  $\rho_w$  i  $c_w$ , u početnoj jednadžbi očuvanja energije za prvi sloj vode u spremniku konstantni, dobije se konačni izraz jednadžbe koji glasi:

$$\frac{dT_{u1}}{dt} = \frac{10}{V_u \cdot \rho_w \cdot c_w} \cdot \left( \frac{P_{el}}{4} + Q_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{v1} - T_{u1}) \right)$$

$$-k_b \cdot A_{bu} \cdot (T_{u1} - T_{ok}) - \lambda_w \cdot \frac{A_s}{10} \cdot s \cdot (T_{u1} - T_{v1})$$

Kod drugog sloja ulazni energetski tok je toplinski snaga koju voda dobije od grijalice i toplinski tok koji se predaje od prethodnog, u ovom slučaju prvog, sloja, a izlazna energetski tok je toplinski tok predan idućem, u ovom slučaju trećem sloju i toplinski tok predan kondukcijom sloju vode u odgovarajućem vanjskom volumenu. Isto vrijedi za treći i četvrti sloj, te je skraćeni zapis za ta tri sloja sljedeći:

$$\frac{dT_{un}}{dt} = \frac{10}{V_u \cdot \rho_w \cdot c_w} \cdot \left( \frac{P_{el}}{4} + Q_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{u(n-1)} - T_{un}) - \lambda_w \cdot \frac{A_s}{10} \cdot s \cdot (T_{un} - T_{vn}) \right)$$

gdje je  $n=2\dots4$ .

Razlika između prve i druge jednadžbe je zapravo to što kod drugog sloja, i svih sljedećih, nema gubitaka prema dnu.

Svaki sloj vode od petog do desetog ima zapravo istu jednadžbu, razlika je samo u redoslijedu slojeva, te se te jednadžbe skraćeno mogu zapisati na sljedeći način:

$$\frac{dT_{un}}{dt} = \frac{10}{V_u \cdot \rho_w \cdot c_w} \cdot \left( Q_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{u(n-1)} - T_{u2}) - \lambda_w \cdot \frac{A_s}{10} \cdot s \cdot (T_{un} - T_{vn}) \right)$$

za  $n=5\dots10$ .

Time su izvedene jednadžbe očuvanja energije za unutarnji volumen spremnika, te slijede jednadžbe očuvanja energije za vanjski volumen spremnika.

U desetom, gornjem, sloju navedenog volumena, ulazni energetski tok je toplinski tok, dobiven od desetog sloja unutarnjeg volumena kondukcijom i konvekcijom, a izlazni energetski tokovi su toplinski tok predana idućem sloju, toplinski tok predan vodi u izmjenjivaču, te toplinski tok predan okolišu kroz stijenku pleksiglasa.

$$\frac{dT_{v10}}{dt} = \frac{10}{V_v \cdot \rho_w \cdot c_w} \cdot \left( \lambda_w \cdot \frac{A_s}{10} \cdot s \cdot (T_{10n} - T_{10n}) + Q_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{u10} - T_{v10}) \right)$$

$$-k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_{v10} - T_{i10}) - k_p \cdot \frac{A_p}{10} \cdot (T_{v10} - T_{ok})$$

Jednadžbe od devetog do drugog sloja su fizikalno gledano iste, ulazni energetska tok je toplinski tok iz prethodnog sloja i toplinski tok od vode odgovarajućeg sloja unutarnjeg volumena, a izlazni energetska tokovi su toplinski tok predan idućem sloju, te toplinski tokovi predani okolišu i vodi u izmjenjivaču. Njihov skraćeni zapis je sljedeći:

$$\frac{dT_{vn}}{dt} = \frac{10}{V_u \cdot \rho_w \cdot c_w} \cdot \left( \lambda_w \cdot \frac{A_s}{10} \cdot s \cdot (T_{un} - T_{vn}) + Q_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{v(n+1)} - T_{vn}) - k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_{vn} - T_{in}) - k_p \cdot \frac{A_p}{10} \cdot (T_{vn} - T_{ok}) \right)$$

za  $n=2\dots 9$ .

Jednadžba prvog sloja vanjskog volumena dobiva toplinski tok od drugog sloja konvekcijom i od prvom sloja vode unutarnjeg volumena kondukcijom, a predaje toplinski tok prvom sloju unutarnjeg volumena konvekcijom, vanjskom okolišu kroz stijenku pleksiglasa i kroz postolje spremnika i vodi u izmjenjivaču, te jednadžba navedenog sloja glasi:

$$\frac{dT_{v1}}{dt} = \frac{10}{V_u \cdot \rho_w \cdot c_w} \cdot \left( \lambda_w \cdot \frac{A_s}{10} \cdot s \cdot (T_{un} - T_{vn}) + Q_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{v2} - T_{v1}) - k_b \cdot A_{bv} \cdot (T_{v1} - T_{ok}) - k_p \cdot \frac{A_p}{10} \cdot (T_{v1} - T_{ok}) - k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_{v1} - T_{i1}) \right)$$

#### 4.2.2. Energetska bilanca vode u izmjenjivaču

Voda u izmjenjivaču je također podijeljena na deset volumena. Za svaki od slojeva definirana je jednadžba očuvanja energije. U prvom sloju ulazni energetska tok čini toplinski tok koji voda u izmjenjivaču dobije od vode u spremniku i toplinski tok dobiven od vode ulazne temperature, a izlazni energetska tok je toplinski tok predan drugom sloju vode u izmjenjivaču, te jednadžba prvog sloja glasi:

$$\frac{d\left(\frac{V_i}{10} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot T_{i1}\right)}{dt} = k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_{v1} - T_{i1}) + Q \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{ul} - T_{i1})$$

Konačna jednadžba prvog sloja vode u izmjenjivaču glasi:

$$\frac{dT_{i1}}{dt} = \frac{10}{V_i \cdot \rho_w \cdot c_w} \left( k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_{v1} - T_{i1}) + Q \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{ul} - T_{i1}) \right)$$

Kod drugog sloja, ta jednadžba glasi:

$$\frac{dT_{i2}}{dt} = \frac{10}{V_i \cdot \rho_w \cdot c_w} \left( k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_{v2} - T_{i2}) + Q \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{i1} - T_{i2}) \right)$$

Prema tome ulazi toplinski tok iz prethodnog sloja vode i toplinski tok od vode u spremniku, a izlazi toplinski tok predan idućem sloju.



Jednadžbe u idućim slojevima su iste te se sve jednadžbe skraćeno mogu zapisati na idući način:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{10}{V_i \cdot \rho_w \cdot c_w} \left( k_u \cdot \frac{A_u}{10} \cdot (T_{vn} - T_{in}) + Q \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{i(n-1)} - T_{in}) \right)$$

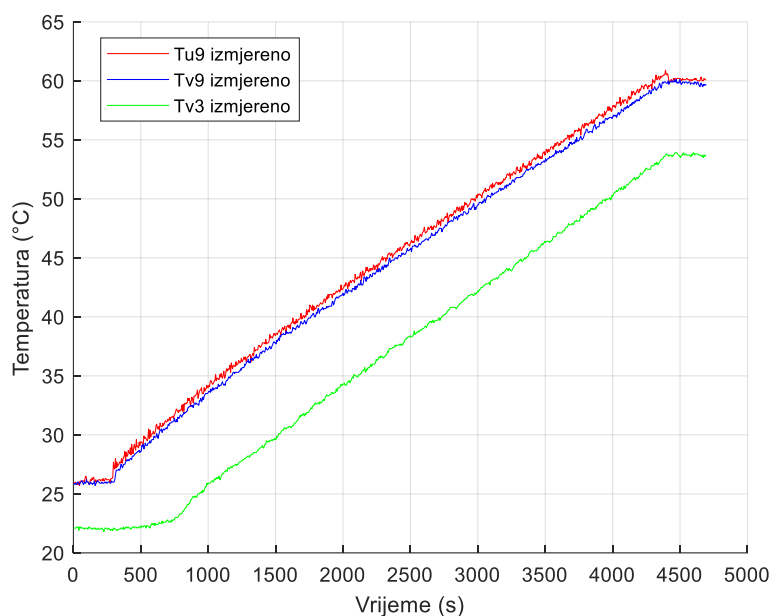
gdje je  $i=3 \dots 10$ .

## 5. ANALIZA REZULTATA

U Laboratoriju za energetska postrojenja su izvedena mjerenja, nakon čega je provedena validacija rezultata simulacije u usporedbi se rezultatima mjerenja.

### 5.1. Validacija rezultata

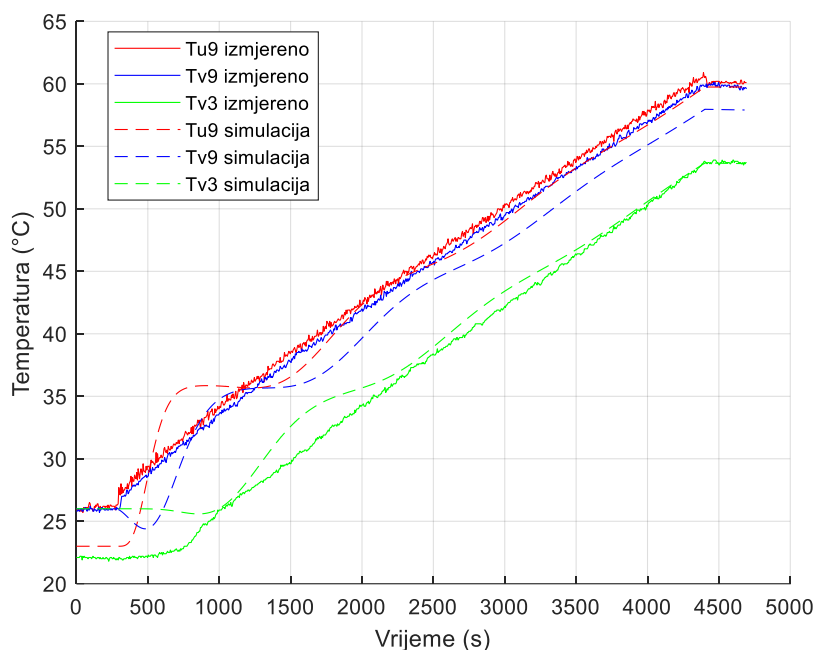
Tijekom mjerenja bilježeni su iznosi temperatura u tri točke, navedene točke nalaze se u tri različita volumena prema prethodno opisanoj diskretizaciji spremnika: u devetim slojevima vanjskog i unutarnjeg volumena, te u trećem sloju vanjskog volumena. U izmjenjivaču nije bilo vode, već je mjerena promjena temperature vode u spremniku. Grijač je radio na 80% snage, zagrijavanje počinje nakon 270 s, a prestaje nakon 4400 s. Rezultati mjerenja su prikazani na slici 16.



**Slika 16. Rezultati mjerenja vode u spremniku**

Sa slike je vidljivo da se slojevi zagrijevaju gotovo linearno uz minimalne oscilacije. Crvena linija, prema slici, predstavlja temperaturu vode u devetom sloju unutarnjeg volumena, te je ona najviša od svih mjerenih, što je i očekivano jer toplinski tok dolazi kroz unutarnji volumen. Plava linija predstavlja temperaturu vode u devetom sloju vanjskog volumena, a zelena temperaturu vode u trećem sloju vanjskog volumena. Zadnja linija se počinje zagrijevati nakon određenog vremenskog odmaka, jer je potrebno vrijeme dok toplina dođe u niže slojeve vanjskog volumena.

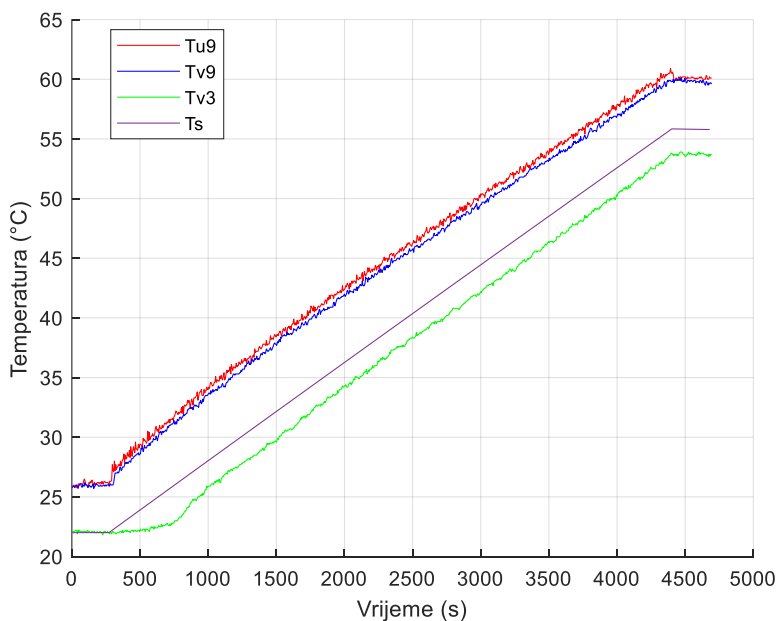
Nakon što je provedena simulacija uz iste uvijete, dobiveni su rezultati za iste slojeve vode u spremniku te su uspoređeni s izmjerenim rezultatima, a usporedba se nalazi na slici 17.



**Slika 17. Usporedba izmjerenih i simuliranih rezultata modela s distribuiranim parametrima**

Isprekidane linije na slici 17 predstavljaju rezultate simulacije, a boje su usklađene s odgovarajućim slojevima vode iz rezultata mjerenja. Sa slike je vidljivo da rezultati mjerenja imaju određeni skok i tu je razlika izmjerenih i simuliranih rezultata najveća i ona iznosi oko 5 °C. Nakon toga temperature u simulaciji rastu približno linearno i relativno su usklađeni s rezultatima mjerenja. Linije temperature u devetom sloju unutarnjeg volumena i trećem sloju vanjskog volumena gotovo naliježu na linije mjerenih temperatura, dok temperatura devetog sloja vanjskog volumen ima određeno odstupanje koje ne prelazi 2.5 °C. Iz navedenog se može zaključiti da su rezultati dobiveni simulacijom modela s distribuiranim parametrima približno jednaki rezultatima mjerenja, te se mogu uzimati u obzir pri za određene proračune.

Nakon toga je provedena usporedba modela s koncentriranim parametrima u odnosu na rezultate mjerenja. Usporedba se nalazi na slici 18.



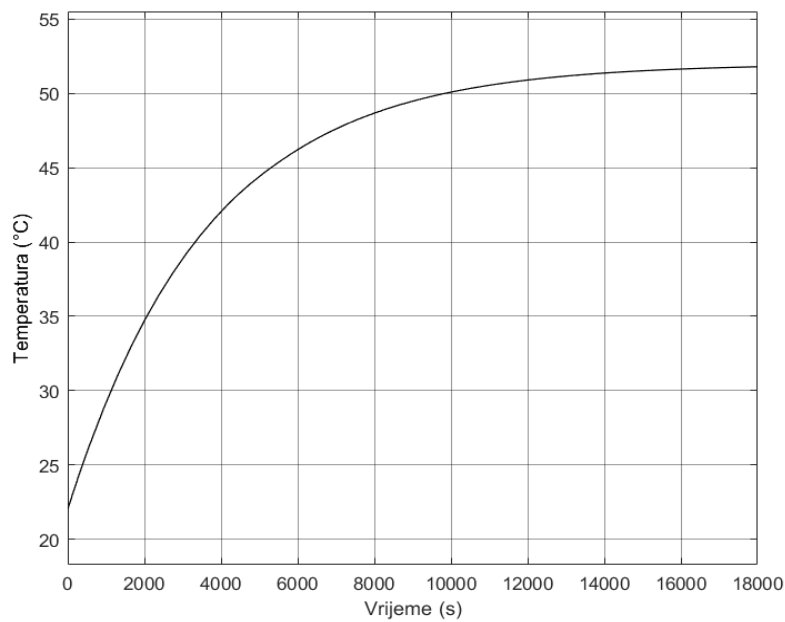
**Slika 18. Usporedba izmjerenih i simuliranih rezultata modela s koncentriranim parametrima**  
 Spremnik se gleda kao jedna cjelina, te ima jednu srednju temperaturu koja je na slici 19 označena  $T_s$ . Vidljivo je da se promjena temperature vode u spremniku odvija linearno, te nagib krivulje ima odgovara nagibu krivulja mjenjenih temperatura. Karakteristika temperatura  $T_s$  se nalazi između karakteristika izmjerenih temperatura, što ima smisla, jer ona predstavlja srednju temperaturu svih dvadeset slojeva vode kod modela s distribuiranim parametrima.

## 5.2. Rezultati simulacije

Nakon što je ustvrđeno da rezultati simulacije približno odgovaraju rezultatima mjerenja, provedene su daljnje simulacije.

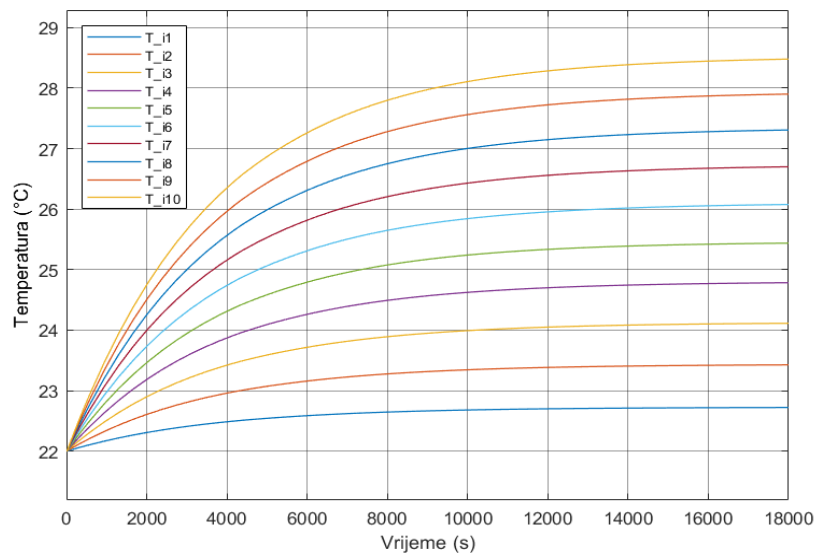
### 5.2.1. Regulacija broja okretaja pumpe, model s koncentriranim parametrima

Provedena je simulacija modela s koncentriranim parametrima pri snazi grijača na 80%, a voda teče izmjenjivačem. Karakteristika temperature spremnika je prikazana na slici 19.



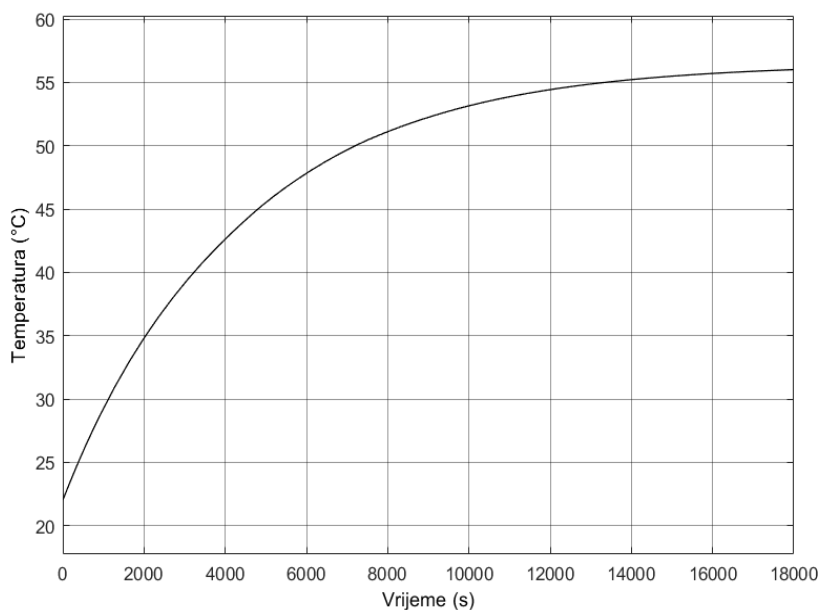
**Slika 19. Temperatura vode u spremniku, model s koncentriranim parametrima**

Temperatura vode u spremniku teži prema vrijednosti od 52 °C. Temperature slojeva vode u izmjenjivaču su prikazane na slici 20.

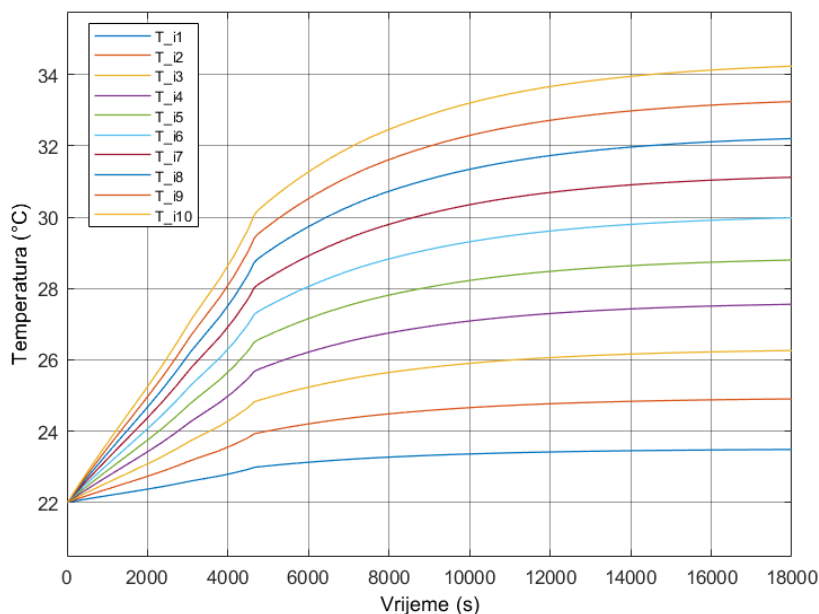


**Slika 20. Temperature vode u izmjenjivaču, model s koncentriranim parametrima**

Temperature se stabiliziraju u rasponu od 22.5 do 28.5 °C. Simulacije rezultata je provedena bez regulacije. Kad se u sustav uvede regulacija brzine okretaja pumpe, te za izlaznu temperaturu vode u izmjenjivaču se zada temperatura od 60 °C, onda temperatura u spremniku ima karakteristiku prikazanu na slici 21.



**Slika 21. Temperatura vode u spremniku, model s koncentriranim parametrima i regulacijom**  
 Temperatura vode u spremniku teži u prema 56 °C. Temperature slojeva vode u izmjenjivaču su prikazane na slici 22.

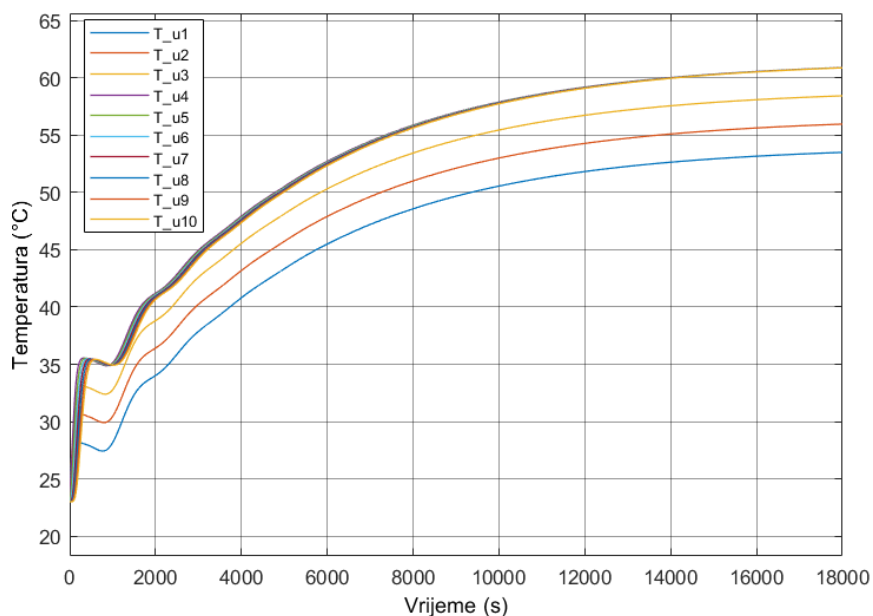


**Slika 22. Temperature slojeva vode u izmjenjivaču, model s koncentriranim parametrima i regulacijom**

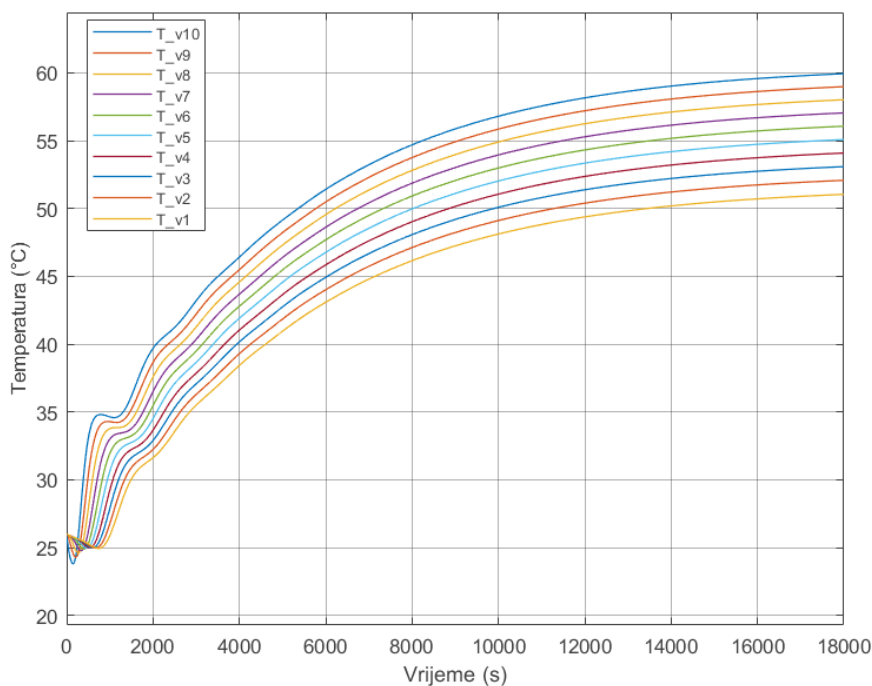
Iz slike 22 je vidljivo da izlazna temperatura vode koja izlazi iz izmjenjivača iznosi 34.5 °C, što je više nego u slučaju s regulacijom, no poprilično mnogo ispod zadane vrijednosti koja iznosi 60 °C, iz čega se zaključuje da regulacija ni približno ne zadovoljava postavljene zahtjeve. Nakon provedene simulacije modela s koncentriranim parametrima, provedena je simulacija modela s distribuiranim parametrima.

### 5.2.2. Regulacija broja okretaja pumpe, model s distribuiranim parametrima

Pri simulaciji modela s distribuiranim parametrima grijač radi na 80% nominalne snage, trajanje simulacije iznosi 5h, a zadana vrijednost izlazne temperature iz izmjenjivača je 60 °C. Temperature slojeva vode u spremniku vanjskog i unutarnjeg volumena su prikazane na slikama 23 i 24.

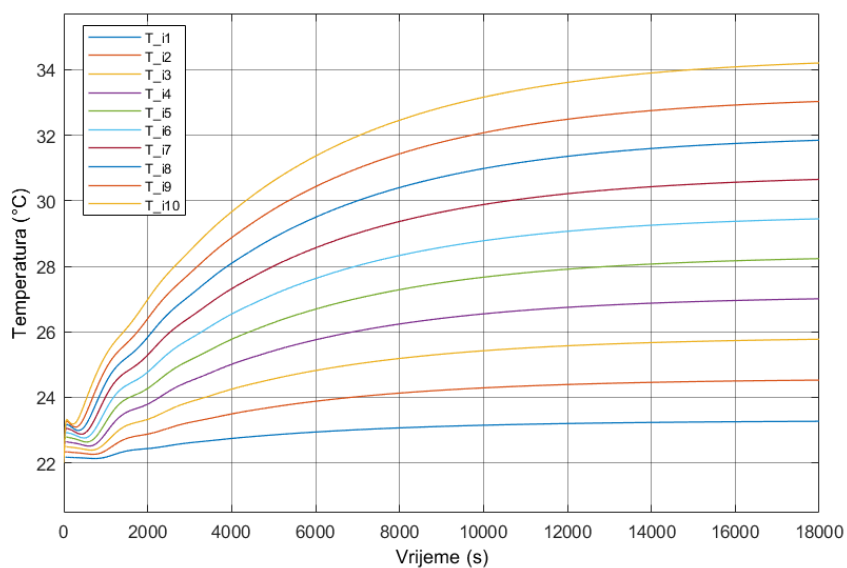


Slika 23. Temperature slojeva vode unutarnjeg volumena



Slika 24. Temperature slojeva vode vanjskog volumena

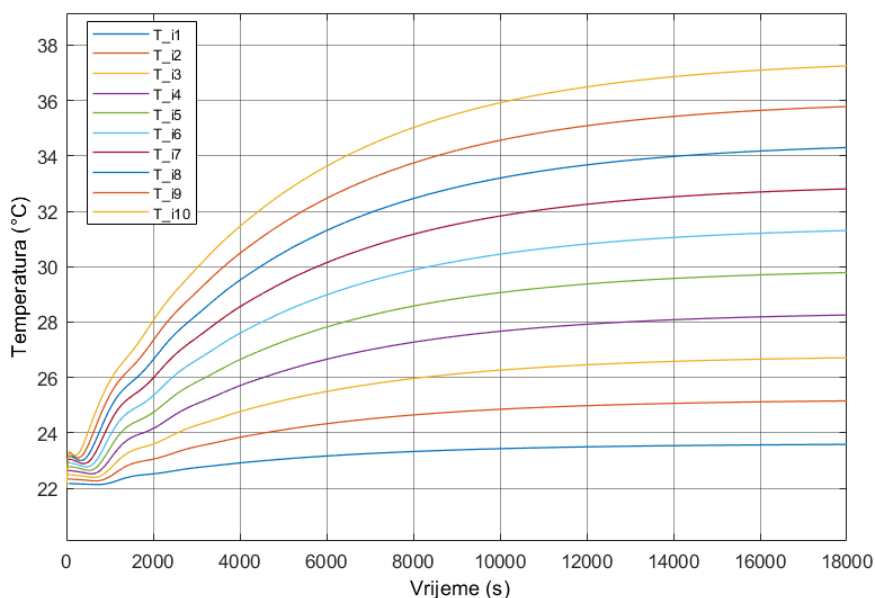
Temperature slojeva vode u izmjenjivaču su prikazane na slici 25.



**Slika 25. Temperatura slojeva vode u izmjenjivaču, model s distribuiranim parametrima, 80% nominalne snage grijača**

Sa slike 25 je vidljivo da voda iz izmjenjivača izlazi s temperaturom od 34 °C, gotovo jednako kao kod modela s koncentriranim parametrima, no ponovo poprilično mnogo ispod zadane temperature koja iznosi 60 °C.

Ako svi parametri ostanu isti, a snaga grijača se poveća na 100% nominalne snage, temperature vode u izmjenjivaču imaju karakteristike prikazane na slici 26.



**Slika 26. Temperatura slojeva vode u izmjenjivaču, model s distribuiranim parametrima, maksimalna snaga grijača**

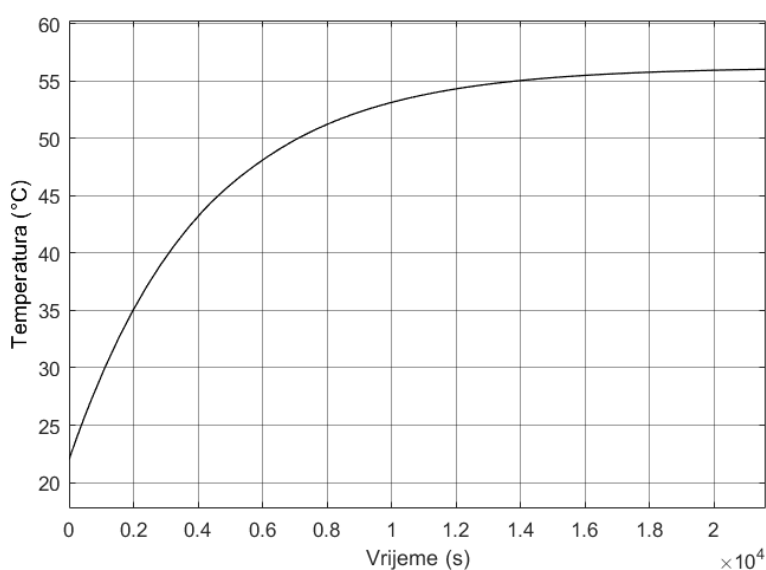


Temperatura vode se povećala, te sad voda iz izmjenjivača izlazi s 37.5 °C, no i ta vrijednost ne zadovoljava postavljeni zahtjev.

Očigledno je da se temperatura vode u izmjenjivaču ne može regulirati brojem okretaja pumpe, jer se ne postiže tražena temperatura vode.

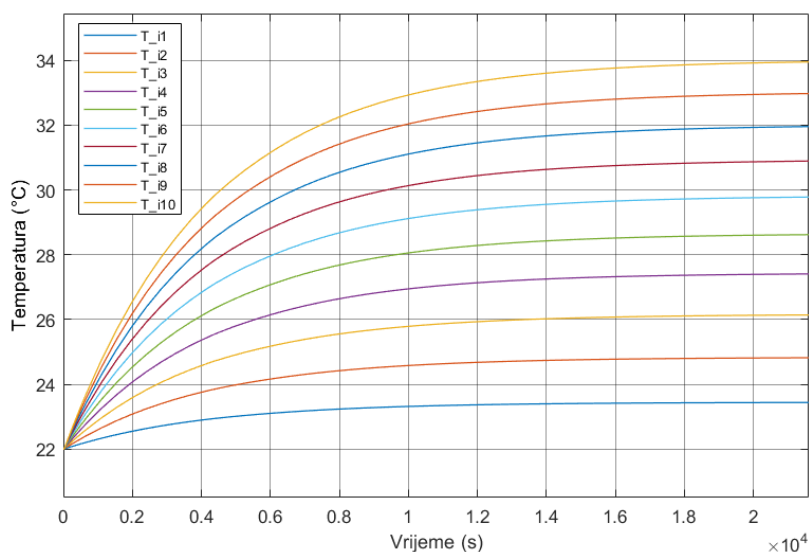
### 5.2.3. Regulacija otvorenosti ventila, model s koncentriranim parametrima

Provedena je simulacija modela s koncentriranim parametrima u trajanju od 6h, pri 80% nominalne snage grijača. Zadana temperatura za vodu koja izlazi iz izmjenjivača je 60 °C. Temperatura vode u spremniku ima karakteristiku prikazanu na slici 27.



**Slika 27. Temperatura vode u spremniku pri regulaciji otvorenosti ventila**

Temperatura vode u spremniku se stabilizira na 56 °C, a otvorenost ventila iznosi 7%. Karakteristike temperatura u izmjenjivaču su prikazane na slici 28.

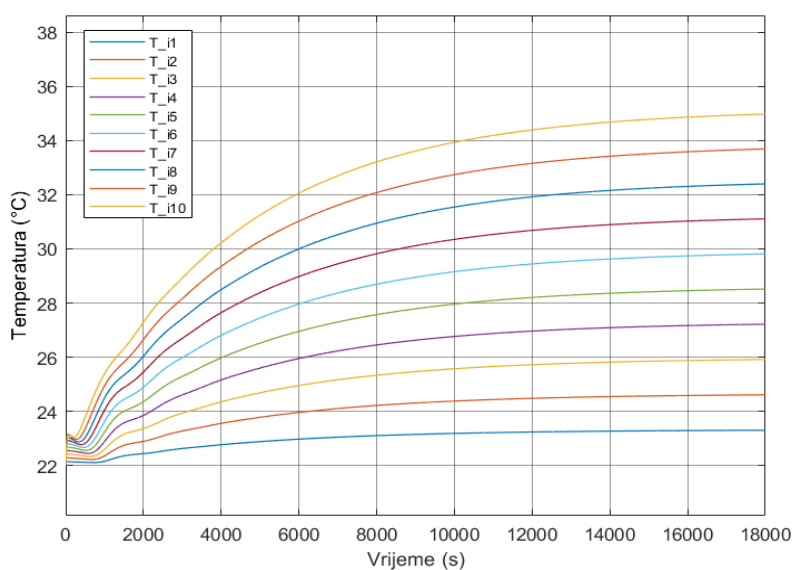


**Slika 28. Karakteristike temperatura u slojevima vode u izmjenjivaču ,model s koncentriranim parametrima pri regulaciji otvorenosti ventila**

Temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača iznosi 34 °C, isto kao pri regulaciji broja okretaja pumpe.

#### 5.2.4. Procesna regulacija otvorenosti ventila, model s distribuiranim parametrima

Kod regulacije otvorenosti ventila u modelu s distribuiranim parametrima, na 80% nominalne snage grijača, u trajanju od 5h karakteristike temperature slojeva vode u izmjenjivaču su prikazane na slici 29.

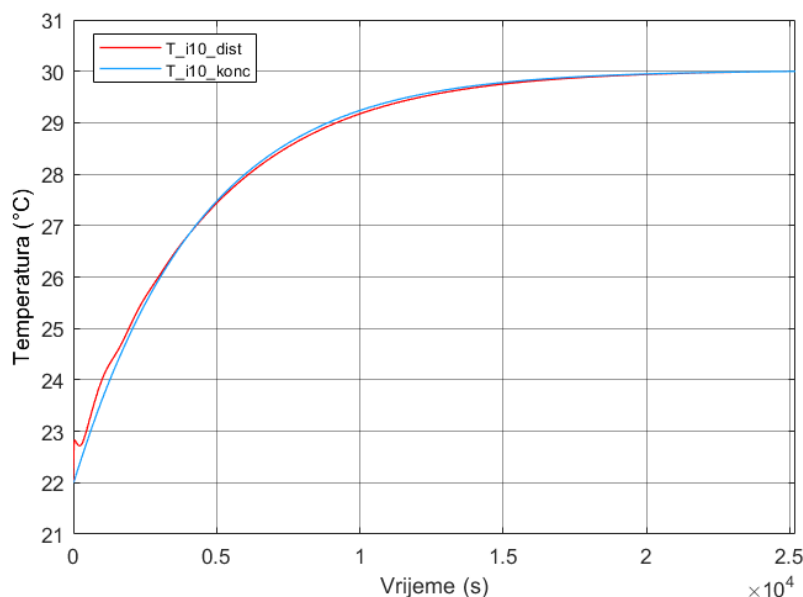


**Slika 29. Karakteristika temperature u slojevima vode u izmjenjivaču, model s distribuiranim parametrima pri regulaciji otvorenosti ventila**

Otvorenost ventila nakon simulacije iznosi 8%. Zadana temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača je 60 °C. Sa slike 30 je vidljivo da je temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača 35 °C, što je približno isti kao u prethodna tri slučaja regulacije te je očigledno da sustav ne može dosegnuti zadanu temperaturu od 60 °C, te je očigledno da sustav regulacije ne može zadovoljiti zadane uvjete.

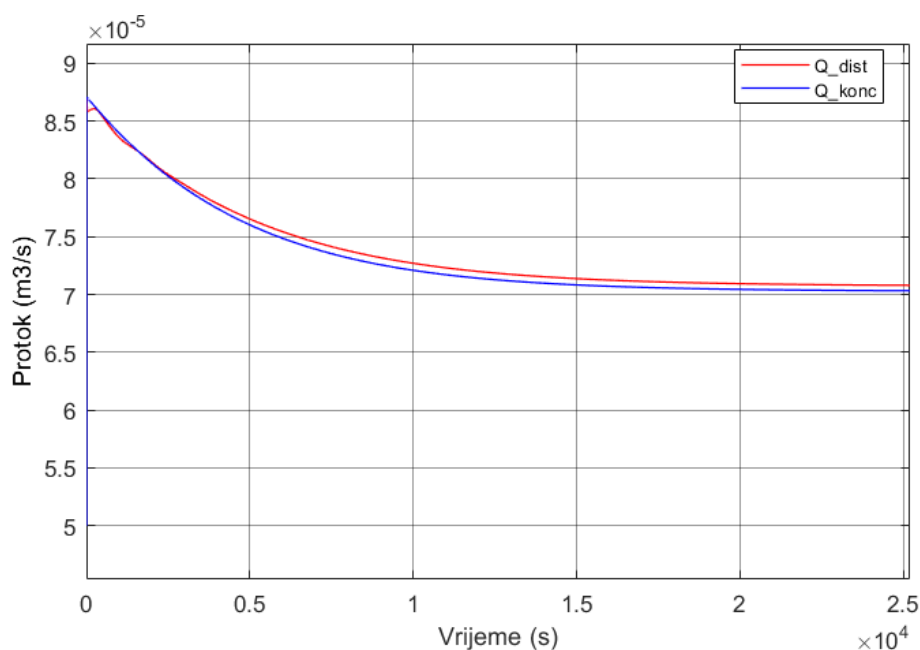
### 5.2.5. Usporedba rezultata modela s koncentriranim i distribuiranim parametrima

Nakon provedenih simulacija, provedena je usporedba modela s koncentriranim parametrima u odnosu na model s distribuiranim parametrima. Nakon što je ustanovljeno da temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača ne može dosegnuti 60 °C, za navedenu usporedbu, zadana temperatura vode na izlazu je iznosila 30 °C. Usporedba temperatura na izlazu iz izmjenjivača pri regulaciji brzine rada pumpe je prikazana na slici 30.



**Slika 30. Usporedba temperatura na izlazu iz izmjenjivača modela s koncentriranim i distribuiranim parametrima, regulacija brzine rada pumpe**

Vidljivo je da temperature teže u 30 °C, što znači da sustav može zadovoljiti taj uvjet zadane temperature, te da je regulacija sustava stabilna. Karakteristike temperatura se u početku međusobno isprepleću uz minimalne oscilacije, no na kraju obje teže u zadanu temperaturu. Uspoređeni su i protoci, a usporedba karakteristika je prikazana na slici 31.



**Slika 31. Usporedba protok kroz izmjenjivač modela s koncentriranim i distribuiranim parametrima, regulacija brzine rada pumpe**

Sa slike 31 je vidljivo da su protoci vrlo niski, reda 0.25 m<sup>3</sup>/h, a razlog zašto su vrlo niski je taj što je za niži protok veća izmjena topline, te se onda voda u izmjenjivaču može zagrijati na potrebnu temperaturu. Karakteristike protoka su gotovo jednake, no vidljivo je da ne teže u istu vrijednost, no zbog navedenih niskih protoka ta razlika je gotovo zanemariva.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je provedena simulacija zagrijavanja vode u spremniku s izmjenjivačem topline i sustavom regulacije temperatura. Simulacije su prethodno validirane na temelju eksperimenta zagrijavanja vode u spremniku bez regulacije.

Simulacija bez reguliranja temperature je uspoređena s eksperimentom, nakon čega je ustanovljeno da su rezultati simulacije približno jednaki rezultatima mjerenja. Zaključeno je da se rezultati preostalih simulacija mogu shvatiti kao rezultati odvijanja stvarnog procesa s i bez regulacije.

Nakon toga je provedena simulacija procesa s regulacijom. Ustanovljeno je da regulacija ne može postići zadanu vrijednost temperature. Problem može biti u tome što se temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača može povećati smanjenjem protoka, no smanjenjem protoka se smanjuje i koeficijent prolaza topline između vode u spremniku i vode u izmjenjivaču što je nepoželjno. Nadalje, ako se temperatura regulira promjenom broja okretaja pumpe, onda je problem što je broj okretaja pumpe ne omogućava smanjivanje protoka vode ispod neke razine, što za posljedicu ima neučinkovitost regulacije. Naime promjenom proporcionalnog člana PID regulatora, ne može se ništa postići jer je pumpa ograničena na minimalni broj okretaja, te je vrijednost temperature daleko od zadane i zbog nemogućnosti daljnjeg povećanja proporcionalnog člana, ne mogu se postići rezultati približni željenima.

Pri usporedbi modela s koncentriranim i distribuiranim parametrima utvrđeno je da modeli daju približno jednake rezultate, te se oba modela mogu koristiti pri simulaciji procesne regulacije uz zadovoljavajuću točnost. Ako je potrebno da rezultati budu precizniji, preporuča se koristiti model s distribuiranim parametrima.

Kako bi se poboljšao proces regulacije temperature postoje pojedina rješenja. Kao prvo, može se dodati sloj izolacije na stijenku i dno spremnika, kako bi se smanjili gubici. Dalje, može se koristiti pumpa koja ima veću širinu broja okretaja, kako taj segment ne bi ograničavao procesnu regulaciju. Zadnji način poboljšanja procesa je korištenje grijača s većom nominalnom snagom.

---

**LITERATURA**

- [1] P. C. Chau, Chemical Process Control: A First Course with MATLAB, San Diego: University of California, 2001.
- [2] N. Šerman, »Interna literatura iz kolegija Regulacija procesa,« Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.
- [3] P. Pokrivka, »Završni rad,« Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [4] MathWorks, »<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>«.
- [5] D. Lončar i A. Marušić, »Interna literatura iz kolegija Regulacija procesa,« Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [6] GRUNDFOS, »<https://product-selection.grundfos.com/hr/products/alpha/alpha1-1?tab=models>«.
- [7] ESBE, »<https://esbe.eu/group/products/linear-valves/vlg100>«.
- [8] IKOMA, »<https://www.ikoma.hr/hr/bojleri-i-spremnici-za-toplu-vodu-48/elektricni-grijaci-za-akumulacijske-spremnike-80/elektricni-grijac-za-spremnike-tople-vode-3-kw-eh-3-0-5630>«.
- [9] Z. Virag, M. Šavar i I. Džijan, MEHANIKA FLUIDA II PREDAVANJA, UDŽBENICI SVEUČILIŠTA U ZAGREBU, FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE, 2018.
- [10] J. L. Lienhard IV i J. L. Lienhard V, A Heat Transfer Handbook third edition, 2000.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc