

# Numeričko modeliranje i analiza izmjene topline u solarnom spremniku

---

Sinčić, Jakša

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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:235:280191>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Jakša Sinčić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Dr. sc. Ivan Horvat, dipl. ing.

Student:

Jakša Sinčić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentorima prof. dr. sc. Damiru Doviću te dr.sc Ivanu Horvatu na stručnoj pomoći i korisnim savjetima pri izradi ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom studija.

Jakša Sinčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -           |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Jakša Sinčić** JMBAG: 0035199351

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko modeliranje i analiza izmjene topline u solarnom spremniku**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical modelling and analysis of heat transfer in solar storage tank**

Opis zadatka:

U sklopu diplomskog rada potrebno je numerički modelirati izmjenu topline u akumulacijskom spremniku solarnog toplovodnog sustava za pripremu potrošne tople vode i grijanje prostora.

Dinamičke simulacije rada spremnika provesti za odabrani period dana i režim korištenja u računalnom programu ANSYS Fluent.

Zapreminu spremnika te nazivne toplinske učine izmjenjivača topline solarnog kruga i pomoćnih izvora topline prilagoditi odabranom solarnom sustavu, dnevnoj potrošnji tople vode te potrebnoj energiji za grijanje prostora.

Potrebno je:

- analizirati zasebno utjecaj provođenja topline i slobodne konvekcije na temperaturnu raspodjelu u spremniku;
- usporediti rezultate simulacija s rezultatima proračuna temperature raspodjele u spremniku prema normi prEN 15316-5:2021, satna metoda, s podjelom spremnika na jedan i više volumnih dijelova;
- ocijeniti utjecaj rezultata simulacija i proračuna na toplinsku učinkovitost solarnog kolektora u promatranom vremenskom periodu.

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

Zadatak zadan:

3. ožujka 2022.

Datum predaje rada:

5. svibnja 2022.

Predviđeni datumi obrane:

9. - 13. svibnja 2022.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Damir Dović

Dr.sc. Ivan Horvat

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

|  |      |
|--|------|
| SADRŽAJ .....  | I    |
| POPIS SLIKA .....  | III  |
| POPIS TABLICA.....   | IV   |
| POPIS OZNAKA .....   | V    |
| SAŽETAK.....   | VII  |
| SUMMARY .....  | VIII |
| 1. UVOD.....   | 1    |
| 1.1. Sunčeva energija .....  | 2    |
| 1.2. Solarni toplovodni sustavi.....                                       | 3    |
| 1.2.1. Termosifonski sustavi .....   | 4    |
| 1.2.2. Sustavi za pripremu PTV-a i grijanje sa prisilnom cirkulacijom..... | 4    |
| 2. ZAKONI DINAMIKE FLUIDA .....  | 8    |
| 2.1. Zakon očuvanja mase.....  | 8    |
| 2.2. Zakon očuvanja količine gibanja .....                                 | 8    |
| 2.3. Zakon očuvanja momenta količine gibanja .....                         | 9    |
| 2.4. Zakon očuvanja energije .....   | 9    |
| 2.5. Drugi zakon termodinamike.....  | 9    |
| 3. IZMJENA TOPLINE U KAPLJEVINAMA.....                                     | 10   |
| 3.1. Provođenje kroz kapljevinu .....                                      | 10   |
| 3.2. Konvekcija .....  | 10   |
| 4. TURBULENTNO STRUJANJE .....   | 12   |
| 4.1. Modeli turbulencije .....   | 13   |
| 4.2. Modeliranje turbulentne viskoznosti.....                              | 13   |
| 4.3. k-ε model turbulencije .....  | 13   |
| 4.4. k-ω model turbulencije [9].....                                       | 15   |
| 5. DISKRETIZACIJA OSNOVNIH JEDNADŽBI DINAMIKE FLUIDA.....                  | 16   |
| 6. ALGORITMI RJEŠAVANJA OSNOVNIH JEDNADŽBI DINAMIKE FLUIDA .....           | 18   |
| 6.1. Interpolacijska shema tlaka.....                                      | 19   |
| 6.2. Diskretizacija – interpolacijske sheme.....                           | 19   |
| 6.3. Rubni uvjeti te korišteni modeli u simulaciji .....                   | 19   |
| 6.4. Modeliranje prirodne konvekcije – Boussinesqov model.....             | 19   |
| 6.5. Courantov broj .....  | 20   |
| 7. NORMA HRN EN – 15316-5-2021 .....                                       | 21   |
| 7.1. Metoda A.....   | 22   |
| 7.2. Metoda B.....   | 25   |
| 8. SIMULACIJA U RAČUNALNOM PROGRAMU FLUENT .....                           | 26   |
| 8.1. Geometrija spremnika .....  | 26   |
| 8.2. Mreža .....   | 27   |

|  |    |
|--|----|
| 9. UTJECAJ PROVOĐENJA TOPLINE I SLOBODNE KONVEKCIJE NA TEMPERATURNU RASPODJELU U SPREMNIKU.....                                    | 29 |
| 9.1. Režim rada 1. – rad pomoćnog grijača 15 min .....   | 29 |
| 9.1.1. Rezultati računalne simulacije .....  | 29 |
| 9.2. Režim rada 2. – stanje spremnika bez rada izmjenjivača topline .....  | 32 |
| 9.3. Režim rada 3. – rad grijača solarnog sustava 60 min.....  | 34 |
| 10. USPOREDBA REZULTATA SIMULACIJE S REZULTATIMA PRORAČUNA PREMA NORMI prEN 15316-5:2021 .....                                     | 37 |
| 10.1. Usporedba rezultata simulacije i proračuna prema normi prEN 15316-5:2021 sa spremnikom kao jednim segmentom .....            | 38 |
| 10.2. Usporedba rezultata simulacije i proračuna prema normi prEN 15316-5:2021 sa spremnikom podijeljenim na četiri segmenta ..... | 39 |
| 10.2.1. Vremenski korak $t=15$ min .....   | 40 |
| 10.2.2. Vremenski korak $t=20$ min .....   | 41 |
| 10.2.3. Vremenski korak $t=25$ min .....   | 44 |
| 10.2.4. Vremenski korak $t=30$ min .....   | 46 |
| 10.2.5. Vremenski korak $t=45$ min .....   | 48 |
| 10.2.6. Vremenski korak $t=53$ min .....   | 50 |
| 10.2.7. Vremenski korak $t=55$ min .....   | 52 |
| 10.3. Usporedba rezultata simulacije i proračuna prema normi prEN 15316-5:2021 sa spremnikom podijeljenim na pet volumena.....     | 54 |
| 11. STUPANJ DJELOVANJA KOLEKTORA .....   | 57 |
| 12. ZAKLJUČAK.....   | 59 |
| LITERATURA.....  | 61 |
| PRILOZI.....   | 62 |

**POPIS SLIKA**

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 1.  | Sunčeva energija pretvorena u druge oblike obnovljivih energija [5] .....           | 3  |
| Slika 2.  | Termosifonski sustav [5] .....  | 4  |
| Slika 3.  | Solarni sustav za pripremu PTV-a sa jednim spremnikom [6] .....                     | 5  |
| Slika 4.  | Solarni toplovodni sustav sa dvostrukim spremnikom [6] .....                        | 6  |
| Slika 5.  | Solarni toplovodni sustav sa dva spremnika [6] .....                                | 7  |
| Slika 6   | Dio diskretiziranog područja [10] .....   | 16 |
| Slika 7.  | Energetska bilanca sloja i[12] .....  | 21 |
| Slika 8.  | Grafički prikaz 3. koraka norme[13] .....   | 23 |
| Slika 9.  | Geometrija spremnika .....  | 27 |
| Slika 10. | Mreža kontrolnih volumena .....   | 28 |
| Slika 11. | Granični sloj .....   | 28 |
| Slika 12. | Ulaz u domenu .....   | 28 |
| Slika 13. | Temperaturna raspodjela nakon 15 min rada pomoćnog grijača .....                    | 30 |
| Slika 14. | Temperatura u gornjem dijelu spremnika .....  | 31 |
| Slika 15. | Vektorsko polje strujanja .....   | 31 |
| Slika 16. | Temperaturna raspodjela nakon 75 min rada .....                                     | 32 |
| Slika 17. | Polje strujanja nakon 75 min .....  | 33 |
| Slika 18. | Usporedba temperaturnog polja spremnika .....                                       | 34 |
| Slika 19. | Polje strujanja u 3. režimu rada spremnika .....                                    | 35 |
| Slika 20. | Temperature segmenta iznad solarnog izmjenjivača .....                              | 36 |
| Slika 21. | Grafička usporedba rezultata simulacije i norme spremnika kao jednog volumena ..... | 39 |
| Slika 22. | Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=15 min       | 40 |
| Slika 23. | Polje strujanja za t=15 min .....   | 41 |
| Slika 24. | Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=20 min       | 42 |
| Slika 25. | Polje strujanja za t=20 min .....   | 43 |
| Slika 26. | Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=25 min       | 44 |
| Slika 27. | Polje strujanja za t=25 min .....   | 45 |
| Slika 28. | Polje strujanja na granici 2. i 3. segmenta .....                                   | 45 |
| Slika 29. | Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=30 min       | 46 |
| Slika 30. | Brzine na ulazu/izlazu iz domene .....  | 47 |
| Slika 31. | Slika strujanja u najnižem segmentu spremnika za t=30 min .....                     | 47 |
| Slika 32. | Polje strujanja za t=30 min .....   | 48 |
| Slika 33. | Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=45 min       | 49 |
| Slika 34. | Polje strujanja za t=45 min .....   | 50 |
| Slika 35. | Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=53 min       | 51 |
| Slika 36. | Polje strujanja za t=53 min .....   | 52 |
| Slika 37. | Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=55 min       | 53 |
| Slika 38. | Polje strujanja za t=55 min .....   | 54 |
| Slika 39. | Odstupanje učinkovitosti .....  | 58 |



---

**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Standardne vrijednosti konstanti k-epsilon.....   | 14 |
| Tablica 2. Korišteni modeli računalne simulacije .....   | 18 |
| Tablica 3. Režimi rada spremnika.....  | 29 |
| Tablica 4. Opis etapa simulacije.....  | 37 |
| Tablica 5. Usporedba rezultata simulacije sa spremnikom kao jednim volumenom .....                   | 38 |
| Tablica 6. Podjela spremnika na 4 segmenta .....   | 39 |
| Tablica 7. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=15 min .....                | 40 |
| Tablica 8. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=20 min .....                | 41 |
| Tablica 9. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=25 min .....                | 44 |
| Tablica 10. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=30 min .....               | 46 |
| Tablica 11. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=45 min .....               | 48 |
| Tablica 12. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=53 min .....               | 50 |
| Tablica 13. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=55 min .....               | 52 |
| Tablica 14. Podjela spremnika na 5 segmenata.....  | 54 |
| Tablica 15. Usporedba rezultata simulacije i norme sa spremnikom podijeljenim na 5<br>volumena ..... | 55 |
| Tablica 16. Učinkovitost kolektora .....   | 58 |

**POPIS OZNAKA**

| Oznaka                   | Jedinica                       | Opis   |
|--------------------------|--------------------------------|--|
| $\rho$                   | kg/m <sup>3</sup>              | gustoća  |
| $V$                      | m <sup>3</sup>                 | volumen  |
| $V_{m(t)}$               | m <sup>3</sup>                 | materijalni volumen  |
| $v_j, v_i$               | m/s                            | brzina u smjeru osi $x_j, x_i$                             |
| $t$                      | s                              | vrijeme  |
| $f_i$                    | m/s <sup>2</sup>               | specifična masena sila u smjeru osi $x_i$                  |
| $\sigma_i$               | Pa                             | specifični vektor naprezanja                               |
| $S_{m(t)}$               | m <sup>2</sup>                 | materijalna površina                                       |
| $q_i$                    | W/m <sup>2</sup>               | gustoća toplinskog toka u smjeru osi $x_i$                 |
| $T$                      | K                              | temperatura  |
| $s$                      | J/kgK                          | specifična entropija                                       |
| $u$                      | J/kg                           | specifična unutarnja energija                              |
| $p$                      | Pa                             | tlak   |
| $\lambda$                | W/mK                           | toplinska provodnost                                       |
| $\vartheta$              | °C                             | temperatura  |
| $\Phi$                   | W                              | toplinski tok  |
| $\alpha$                 | W/m <sup>2</sup> K             | koeficijent prijelaza topline                              |
| $\vartheta_s$            | °C                             | temperatura stijenke                                       |
| $\vartheta_\infty$       | °C                             | temperatura fluida podalje od stijenke                     |
| $A$                      | m <sup>2</sup>                 | površina   |
| $f$                      | -                              | vremenski promjenjiva veličina                             |
| $f'$                     | -                              | pulsirajući dio promjenjive veličine                       |
| $\overline{f}$           | -                              | srednja vrijednost promjenjive veličine                    |
| $\overline{v_j}$         | m/s                            | osrednjena vrijednost brzine u smjeru osi $x_j$            |
| $v_j'$                   | m/s                            | pulsirajući dio brzine u smjeru osi $x_j$                  |
| $\mu$                    | Pas                            | dinamička viskoznost                                       |
| $\overline{v_j'}$        | m/s                            | osrednjeni dio brzine u smjeru osi $x_j$                   |
| $\mu_t$                  | Pas                            | turbulentna viskoznost                                     |
| $\overline{k}$           | m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> | kinetička energija turbulencije                            |
| $\delta_{ij}$            | -                              | Kroneckerov delta  |
| $l_i$                    | m                              | duljina puta miješanja čestica                             |
| $v_t$                    | m/s                            | karakteristična brzina turbulentnih pulsacija              |
| $\overline{\varepsilon}$ | m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> | osrednjena vrijednost brzine disipacije kinetičke energije |
| $Re$                     | -                              | Reynoldsov broj  |
| $G$                      | m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> | generacija kinetičke energije                              |
| $\omega$                 | m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> | disipacija turbulentne kinetičke energije ( $k\omega$ )    |
| $\Gamma$                 | -                              | koeficijent difuzije                                       |

---

|                         |                 |   |
|-------------------------|-----------------|---|
| $S_k, S_\omega$         | -               | izvorski član   |
| $\phi$                  | -               | specifična fizikalna veličina   |
| $\tilde{n}$             | -               | bezdimenzijska značajka   |
| $\Delta n$              | m               | udaljenost čvorova  |
| $N_{nb}$                | -               | stranica konačnog volumena  |
| $\varphi$               | -               | čvorna vrijednost   |
| $\beta$                 | K <sup>-1</sup> | koeficijent toplinske širljivosti   |
| $m$                     | kg/s            | maseni protok   |
| $c_p$                   | J/kgK           | specifični toplinski kapacitet  |
| $H_{TR}$                | W/K             | koeficijent izmjene topline kondukcijom                                     |
| $Q_{sto;los}$           | J               | toplinski gubici spremnika  |
| $V_{sto;vol;i}$         | L               | volumen segmenta spremnika  |
| $\vartheta_{sto;vol;i}$ | °C              | temperatura segmenta spremnika  |
| $f_{sto;conn;ls}$       | -               | koeficijent gubitaka zbog spoja cijevi na spremnik                          |
| $H_{sto;add;ls}$        | W/K             | dodatni toplinski gubitak koji u obzir uzima termosifonsku cirkulaciju vode |
| $\vartheta_{sto;amb}$   | °C              | temperatura okoline u kojoj je smješten spremnik                            |
| $\vartheta_{sr,fluent}$ | °C              | srednja temperatura dobivena računalnom simulacijom                         |
| $\vartheta_{sto}$       | °C              | temperatura vode u spremniku  |

**SAŽETAK**

U sklopu diplomskog rada numerički je modelirana izmjena topline i strujanje vode unutar akumulacijskog spremnika solarnog toplovodnog sustava za pripremu potrošne tople vode i grijanje prostora. Dinamičke simulacije samog rada spremnika provedene su za odabrani period dana i režim korištenja u računalnom programu ANSYS Fluent. Zapremnina spremnika iznosila je 283,7 l, a odabrani učini izmjenjivača topline solarnog kruga te pomoćnog izvora prilagođeni su odabranom solarnom sustavu, dnevnoj potrošnji tople vode te potrebnoj energiji za grijanje prostora. Naglasak je dan analizi provođenja topline te slobodnoj konvekciji na temperaturnu raspodjelu u spremniku. Uspoređeni su rezultati simulacija s rezultatima proračuna temperaturne raspodjele u spremniku prema normi prEN 15316-5:2021, prilikom čega je spremnik podijeljen na više volumnih dijelova (segmenata). Zaključno, procijenjen je utjecaj rezultata simulacija i proračuna prema standardiziranoj proceduri na toplinsku učinkovitost solarnog kolektora u promatranom vremenskom periodu.

Ključne riječi: Solarni spremnik, ANSYS Fluent, prEN 15316-5:2021, slobodna konvekcija, provođenje

**SUMMARY**

In this work numerical modelling and analysis of heat transfer and water flow in solar storage tank was performed. Dynamic simulations of the tank in operating and heating mode for selected time of the day, were carried out in computer software ANSYS Fluent. Capacity of storage tank is 283,7 l. Thermal output of heat exchanger for solar water heating and output of auxiliary heat exchanger were adapted to selected solar heating system, daily consumption of domestic hot water and required heating energy for space heating. Special attention was given to analysis of influence of conduction and natural convection on thermal stratification of storage tank. Simulation results were compared to ones acquired by using norm prEN 15316-5:2021. In doing so, storage tank was divided in multiple volume parts. Finally, impact of results of simulations and ones obtained by the norm on thermal efficiency of solar collector in selected time frame was assessed.

Key words: Solar storage tank, ANSYS Fluent, prEN 15316-5:2021, natural convection, conduction

## 1. UVOD

U današnje vrijeme rasta cijena fosilnih goriva, globalnog problema klimatskih promjena te zagađenja okoliša javlja se sve veća potreba za upotrebom obnovljivih izvora energije. Njihovo korištenje uz doprinos zaštiti okoliša dovodi i do razvoja novih tehnologija, otvaranja novih radnih mjesta te smanjenja ovisnosti o uvoznoj energiji. Osnovna im je karakteristika da su neiscrpni, tj. u prirodi se mogu u potpunosti ili djelomično obnoviti. Dijelimo ih na energiju vjetra, sunčevu energiju, biomasu, geotermalnu energiju, potencijalnu energiju vodotoka, potencijalnu energiju plime i oseke te morskih valova, toplinsku energiju mora [1]. U 2020. godini Republika Hrvatska imala je 31,02 posto energije iz obnovljivih izvora u bruto finalnoj potrošnji, od čega je udio električne energije iznosio 53,82 posto, a grijanja i hlađenja 36,9 posto [2]. Obnovljivi izvori jedni su od temeljnih izvora energije u nZEB zgradama. NZEB zgrade su zgrade gotovo nulte energije vrlo visokih energetske svojstava [3]. U odnosu na ostale zgrade imaju neke od sljedećih prednosti [3]:

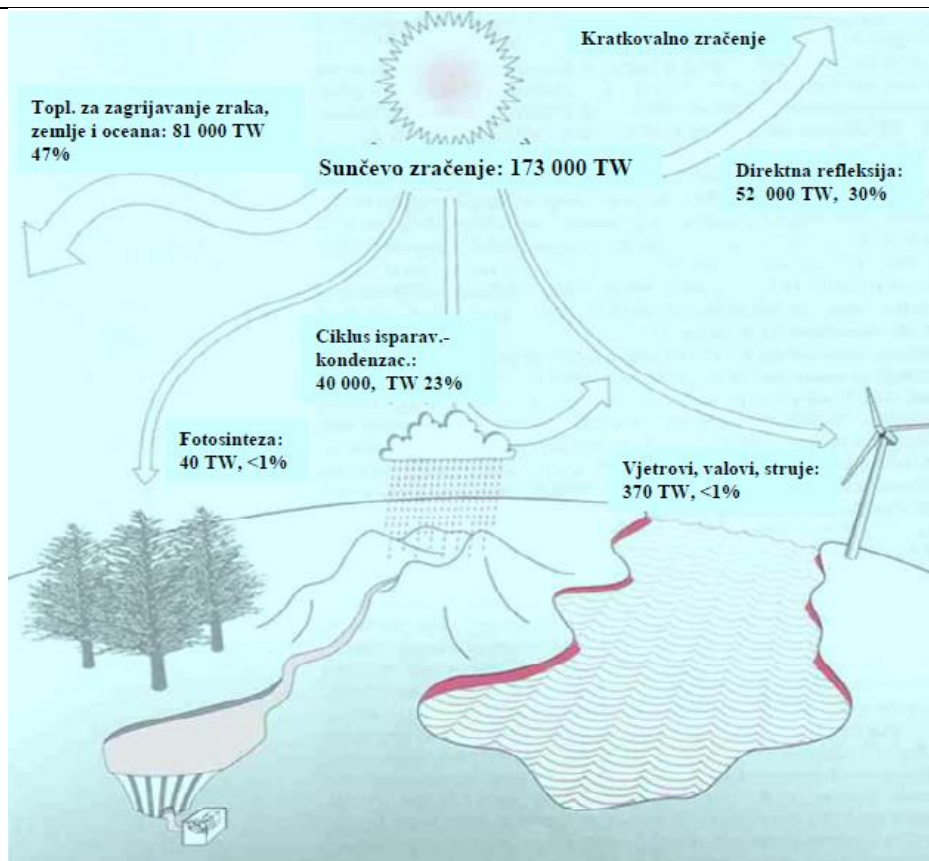
- doprinose očuvanju klime te koriste obnovljive izvore energije
- imaju znatno niže troškove za korištenje energije
- minimalno 30% isporučene energije proizvodi se iz obnovljivih izvora
- sadrže energetske vrlo učinkovite sustave za zagrijavanje/hlađenje svježeg/filtriranog zraka bez vanjskih zagađivača, prašine i alergena, izuzetne ugođe zraka
- koriste pametne tehnologije upravljanja tehničkim sustavima zgrade, dakle automatizacije i upravljanja zgradom, podešavanja i nadzora, za tehničke sustave ili njihove dijelove
- zahtijevaju manje održavanja i imaju duži životni vijek nego ostale, jer su građevni materijali i uređaji pažljivije odabrani i ugrađeni
- potrošnja vode je manja, jer su zgrade opremljene kontrolama protoka vode na izljevnim mjestima, imaju spremnike za kišnicu te imaju neprekidno toplu vodu i dr.

S obzirom da su nZEB zgrade budućnost stanogradnje javlja se potreba za preciznijim proračunom energetske svojstava takvih zgrada. Zbog toga su se razvile EPB (Energy performance of buildings) norme, a u današnje vrijeme sve češće se koriste i dinamičke simulacije u CFD programima za određivanje njihovih energetske zahtjeva. CFD programi s vremenom postaju sve točniji te lakši za upotrebu, a rezultati simulacija su vrlo pouzdani. Jedan od podsustava mnogih nZEB zgrada jest akumulacijski spremnik solarnog sustava.

U ovom je radu jedan od glavnih ciljeva usporediti točnost rezultata proračuna pomoću norme prEN 15316-5:2021 upravo za akumulacijski spremnik s rezultatima koji se dobiju dinamičkom simulacijom. Cilj je i procijeniti koliko pojednostavljenja koja se u normi uvode uzrokuju odstupanja u odnosu na rezultate računalne simulacije. Uz to rad se bavi numeričkim modeliranjem te analizom izmjene topline u samom solarnom akumulacijskom spremniku koji služi za pripremu potrošne tople vode te grijanje prostora. Analiziran je utjecaj provođenja topline te slobodne konvekcije na temperaturnu raspodjelu u spremniku. Dinamičke simulacije rada provele su se u računalnom programu ANSYS Fluent. Dobiveni rezultati temperaturne raspodjele po visini spremnika iskoristile su za proračun učinkovitosti solarnih kolektora.

### 1.1. Sunčeva energija

Sunčeva energija oslobađa se termonuklearnim reakcijama na Suncu, a nastaje pretežno spajanjem četiriju atomskih jezgara vodika u jednu jezgru helija. Emitira se u obliku radiovalova, infracrvenih, vidljivih, ultraljubičastih te rendgenskih valova [4]. Do granice atmosfere dolazi 173 000 TW energije, od čega se u tlu, atmosferi te vodi apsorbira 120 000 TW. Kao jedan od problema njezina iskorištavanja, kao i kod ostalih obnovljivih izvora, javlja se mala gustoća energetske toka koja iznosi  $< 1 \text{ kW/m}^2$ . Sunčevo je zračenje najveći izvor obnovljive energije na Zemlji gdje se pretvara u ostale oblike energije poput energije vjetra (dolazi zbog nejednolikog zagrijavanja Zemlje, mora te zračnih masa) biomasu (stvaranje organske tvari procesom fotosinteze), hidroenergiju, energiju valova i dr. Navedeni oblici energije dobiveni iz energije sunca prikazani su slikom 1. 30 posto sunčevog zračenja odmah se reflektira nazad u svemir (uglavnom od oblaka, te manji dio od Zemljine površine). Od preostalog dijela od 70 posto, veći dio se djelomično apsorbira u atmosferi čime uzrokuje zagrijavanje, dok ostatak nastavlja prema površini u obliku direktnog ili difuznog zračenja. Osim pretvorbe u druge oblike energije, sunčevo zračenje može se iskoristi i direktnim putem, njegovom apsorpcijom u solarnim kolektorima kao dijelovima različitih solarnih sustava. Njihova zadaća najčešće je zagrijavanje potrošne tople vode, grijanje i hlađenje prostora te zagrijavanje pare za proizvodnju električne energije [5].



Slika 1. Sunčeva energija pretvorena u druge oblike obnovljivih energija [5]

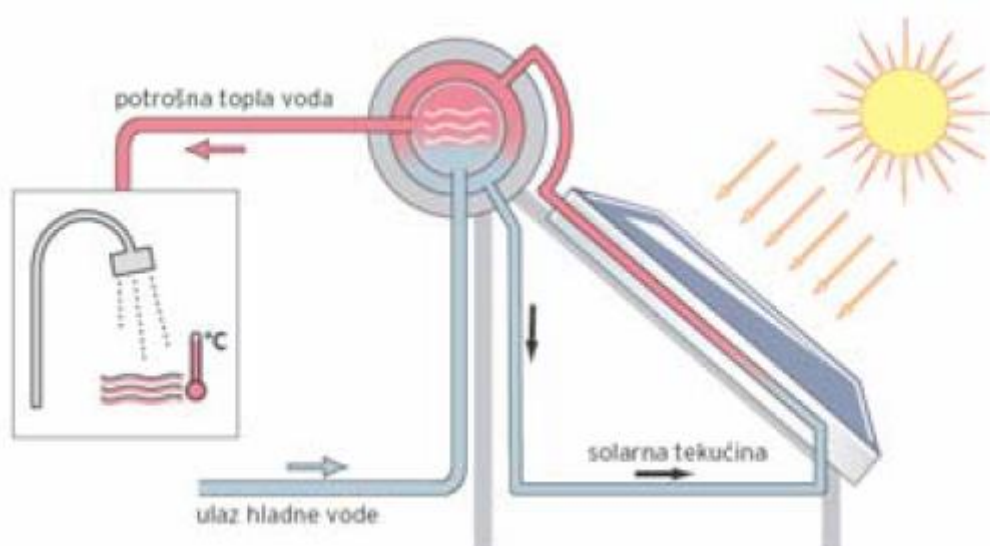
## 1.2. Solarni toplovodni sustavi

Solarni toplovodni sustavi primjenjuju se ponajviše za zagrijavanje PTV-a, a u nekim slučajevima i za zagrijavanje prostora te grijanje bazenske vode. Ovakvi su sustavi uglavnom niskotemperaturni (temperature vode od 40 do 60 °C). Osnovni su elementi sustava akumulacijski spremnik, solarni kolektori, regulacijska automatika te pomoćni izvori topline. Kao najvažniji dio sustava ističu se solarni kolektori čija je zadaća prikupljanje sunčeve energije i njeno prenošenje na radni medij koji struji u zatvorenom krugu između spremnika i samog kolektora. Radni fluid koji teče kolektorskim krugom uglavnom je voda, a u područjima u kojima u zimskim mjesecima može doći do smrzavanja koriste se i mješavine voda/glikol [5]. Strujanje radnog medija najčešće se ostvaruje prisilno cirkulacijskom pumpom, no postoje i termosifonski sustavi koji funkcioniraju na temelju razlike gustoća, tj. razlike temperatura radnog medija u spremniku i cirkulacijskom krugu. Prijenos energije između cirkulacijskog kruga i spremnika topline može se ostvariti pomoću izmjenjivača topline ili direktnim spojem kolektorskog kruga sa spremnikom gdje voda iz kolektora utječe izravno u spremnik.



### 1.2.1. Termosifonski sustavi

Kako je već ranije navedeno, cirkulacija u termosifonskim sustavima odvija se zbog razlike gustoća, tj. temperatura radnog medija u spremniku i cirkulacijskom krugu. Prilikom zagrijavanja vode, njoj se gustoća smanjuje te dolazi do njenog vertikalnog strujanja prouzročeno uzgonskom silom. Primjer termosifonskog sustava prikazan je slikom 2. U ovakvim sustavima potrebno je da se spremnik nalazi iznad kolektora radi uspostavljanja prirodne cirkulacije. Kako je spremnik smješten u okolišu, toplinski gubici bit će značajno veći (pod utjecajem niske temperature, vjetra) u odnosu na smještaj unutar objekta. Temperaturni gradijent unutar spremnika veći je nego u sustavima sa prisilnom cirkulacijom čime se povećava efikasnost kolektora [5]. U ovakvim sustavima nema ni potrošnje električne energije za pogon pumpe, troškovi održavanja su manji te nema regulacijske armature što su neke od prednosti ovakvih sustava u odnosu na sustave sa prisilnom cirkulacijom [5].

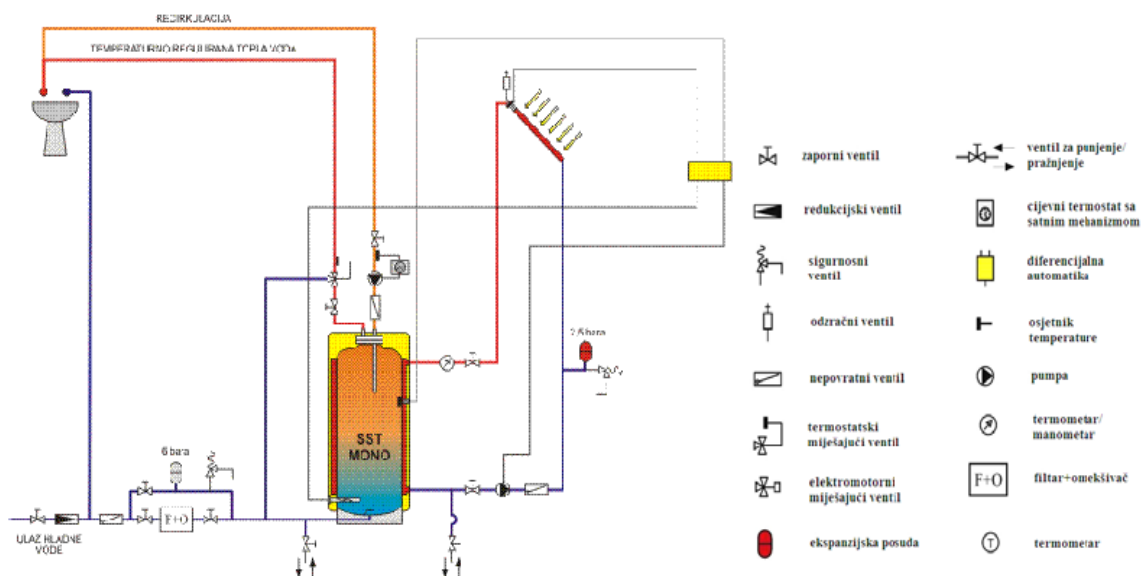


Slika 2. Termosifonski sustav [5]

### 1.2.2. Sustavi za pripremu PTV-a i grijanje sa prisilnom cirkulacijom

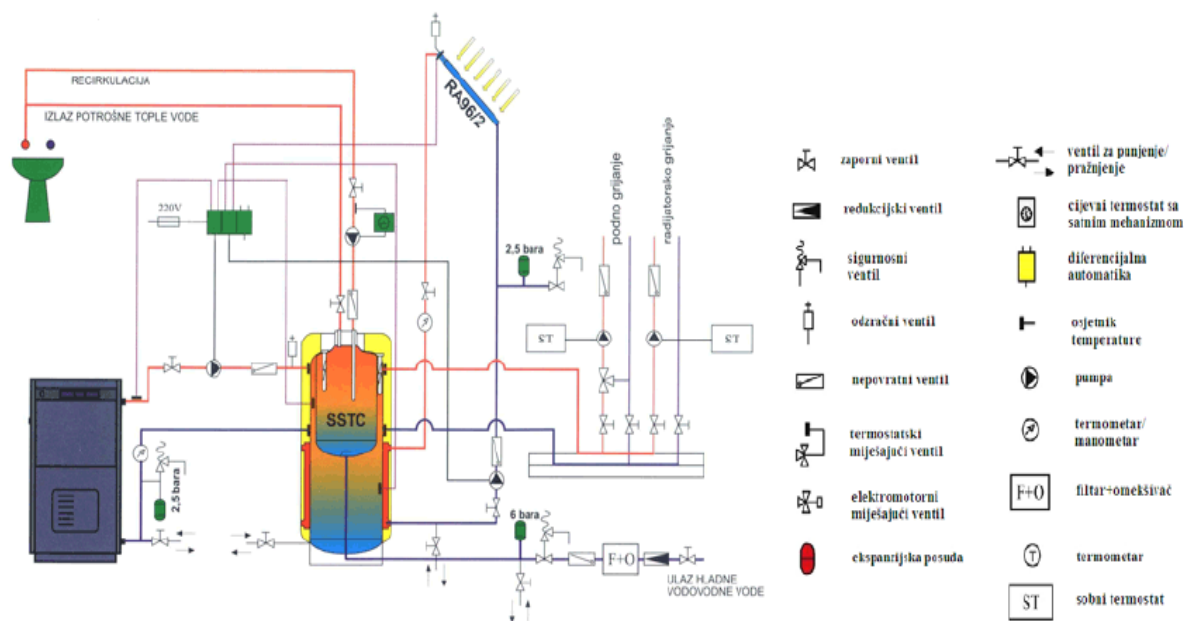
Solarni sustavi za pripremu PTV-a sa prisilnom cirkulacijom javljaju se u različitim izvedbama, od kojih će par njih u ovom radu biti prikazano. Najjednostavniji je primjer sustava sa jednim spremnikom PTV-a u kojem nema spiralnog izmjenjivača topline. Ovakav sustav prikazan je na slici 3. Radni fluid iz solarnog kolektora teče između dvostrukog plašta spremnika te predaje toplinu vodi u samom spremniku. Polaz hladne vode prema kolektoru radi učinkovitosti samog kolektora smješten je na najnižoj točki spremnika [5]. Pri radu sustava potrebno je težiti što

višoj razlici temperatura po visini spremnika što se postiže različitim konstrukcijskim rješenjima. Regulacija se vrši diferencijalnom armaturom na način da kada razlika temperatura radnog medija na izlazu iz kolektora i vode u spremniku postane niža od zadane vrijednosti dolazi do isključivanja rada pumpe.



**Slika 3. Solarni sustav za pripremu PTV-a sa jednim spremnikom [6]**

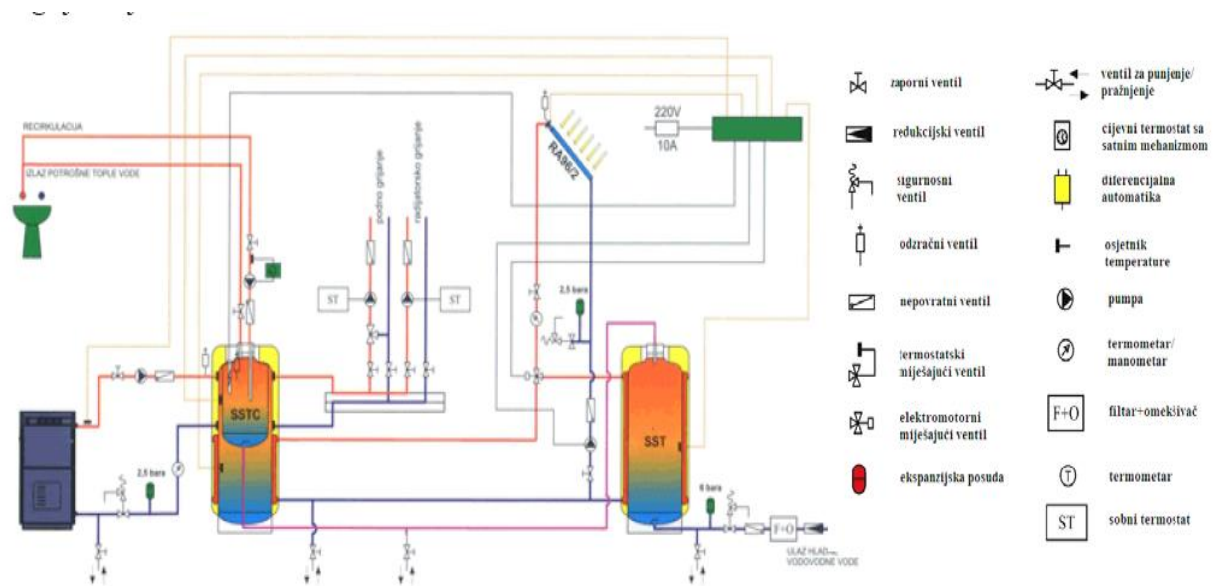
U praksi se često nalazi i sustav prikazan slikom 4. Ovakvi sustavi služe za zagrijavanje potrošne tople vode, ali i za grijanje prostora. Unutar većeg spremnika nalazi se jedan manji u kojem se nalazi PTV spremna za uporabu. Voda u tom manjem spremniku izmjenjuje toplinu sa vodom iz većeg spremnika koji se pak zagrijava solarnim kolektorima pomoću izmjenjivača koji je smješten u donjem dijelu spremnika [5]. U trenutcima kada je to potrebno pali se i pomoćni izmjenjivač topline (pogonjen najčešće toplovodnim kotlom) smješten u gornjem dijelu spremnika. U ovakvim sustavima nema narušavanja temperaturne raspodjele vode jer se hladna voda dovodi direktno u manji spremnik [5]. Time je osigurana poželjna temperaturna stratifikacija gdje je najhladnija voda u najnižem dijelu spremnika dok je najtoplija u najvišem, što pospješuje efikasnost kolektora i cijelog solarnog sustava.



Slika 4. Solarni toplovodni sustav sa dvostrukim spremnikom [6]

Za grijanje potrošne tople vode često se umjesto akumulacijskog spremnika koristi sustav sa protočnim zagrijačem vode. Prednost ovakvog sustava je ta što se njime izbjegava miješanje hladne te tople vode u spremniku. Temperatura vode u spremniku stoga može biti niža od 55 °C jer ne postoji opasnost razvijanja bakterije legionelle [5].

U slučajevima u kojima je volumen spremnika koji je potrebno ugraditi veći od 500 l, često se primjenjuje sustav sa dva manja spremnika kako je prikazano slikom 5. U ovakvim sustavima radni medij iz kolektorskog kruga prvotno zagrijava jedan spremnik dok se ne postigne tražena temperatura, a zatim se regulacijskim sustavom putem troputnog ventila tok medija usmjerava prema drugom spremniku. U drugom se spremniku odvija predgrijavanje svježije vode koja ulazi u sustav [5]. Prednost ovakvog sustava je u tome što se prvi spremnik brže zagrijava na traženu vrijednost, dok se grijanjem drugog spremnika niže temperature pospješuje efikasnost cijelog sustava. Zimi, u periodima manjeg sunčevog zračenja zagrijava se prvi spremnik, dok se drugi spremnik može isključiti iz pogona.



Slika 5. Solarni toplovodni sustav sa dva spremnika [6]

Sustavi koji osim zagrijavanja PTV-a služi i za grijanje prostora (kao sustavi prikazani slikom 5 te slikom 4) najčešće se koriste za kada je sustav grijanja izveden kao niskotemperaturni. Takvi se sustavi proračunavaju na način da se zadovolji 10-15 % energetske potrebe zimi, a razlog tomu je manja ozračenost zimi te veliki investicijski troškovi [5].

## 2. ZAKONI DINAMIKE FLUIDA

Dinamika fluida zasniva se na osnovnim zakonima klasične fizike u koje se ubrajaju [7]:

1. Zakon očuvanja mase
2. Zakon očuvanja količine gibanja
3. Zakon očuvanja momenta količine gibanja
4. Zakon očuvanja energije
5. Drugi zakon termodinamike

Zakon očuvanja količine gibanja te zakon očuvanja momenta količine gibanja definirani su u klasičnoj mehanici dok su zakon očuvanja energije te drugi zakon termodinamike definirani u termodinamici. Definirani zakoni vrijede za sustav materijalnih točaka odnosno za zatvoreni termodinamički sustav, a u dinamici fluida vrijedit će za materijalni volumen koji u općem slučaju mijenja svoj položaj, veličinu te oblik, ali uvijek se sastoji od istih čestica fluida.

### 2.1. Zakon očuvanja mase

Zakon očuvanja mase za materijalni volumen govori kako je brzina promjene materijalnog volumena jednaka nuli. Matematički izraz zakona slijedi kako je prikazano jednadžbom :

$$\frac{D}{Dt} \int_{V_M(t)} \rho dV = 0 \quad (1)$$

Gornji se izraz može napisati u konzervativnom obliku kako slijedi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

### 2.2. Zakon očuvanja količine gibanja

Zakon očuvanja količine gibanja za materijalni volumen glasi: brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka je sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen. Matematički zapis navedenog zakona glasi:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V_M(t)} \rho v_i dV = \int_{V_M(t)} \rho f_i dV + \int_{S_M(t)} \sigma_i dS = \int_{V_M(t)} \rho f_i dV + \int_{S_M(t)} n_j \sigma_{ji} dS \quad (3)$$

Konzervativni oblika zakona opisuje jednadžba:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (4)$$

### 2.3. Zakon očuvanja momenta količine gibanja

Zakon očuvanja momenta količine gibanja za materijalni volumen definira se na slijedeći način: brzina promjene momenta količine gibanja materijalnog volumena, s obzirom na izabrani pol, jednaka je sumi momenata vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen, u odnosu na taj izabrani pol. Navedeni izraz predstavlja jednadžba:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V_M(t)} \varepsilon_{kji} x_j \rho v_i dV = \int_{V_M(t)} \varepsilon_{kji} x_j \rho f_i dV + \int_{V_M(t)} \varepsilon_{kji} x_j n_r \sigma_{ri} dV \quad (5)$$

### 2.4. Zakon očuvanja energije

Zakon očuvanja energije govori kako je brzina promjene zbroja kinetičke i unutarnje energije materijalnog volumena jednaka snazi vanjskih masenih te površinskih sila koje djeluju na taj materijalni volumen, te brzini izmjene topline materijalnog volumena s okolišem. Matematički zapis iskazanog zakona prikazuje slijedeći izraz:

$$\int_{V_M(t)} \rho \frac{De}{Dt} dV = \int_{V_M(t)} \rho f_i v_i dV + \int_{V_M(t)} \frac{\partial(\sigma_{ji} v_i)}{\partial x_j} dV - \int_{V_M(t)} \frac{\partial q_i}{\partial x_j} dV \quad (6)$$

U konzervativnom obliku zakon glasi:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j e)}{\partial x_j} = \rho f_i v_i + \frac{\partial(\sigma_{ji} v_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

### 2.5. Drugi zakon termodinamike

Drugi zakon termodinamike govori kako entropija izoliranog sustava raste ili u idealnom slučaju ostaje ista, tj. produkcija entropije u otvorenom termodinamičkom sustavu mora biti ili jednaka nuli ili pozitivna. Sam zakon se može prikazati na idući način:

$$\rho T \frac{Ds}{Dt} = \rho \frac{Du}{Dt} + p \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \quad (8)$$

### 3. IZMJENA TOPLINE U KAPLJEVINAMA

S obzirom da je jedan od ciljeva rada analiza utjecaja provođenja topline te slobodne konvekcije na temperaturnu raspodjelu u spremniku u ovom poglavlju se daje teorijski uvid u načine izmjene topline u kapljevinama.

Toplina se u tvarima prenosi na tri osnovna načina:

- provođenjem ili kondukcijom kroz krutine, kapljevine i plinove
- konvekcijom (komešanjem) kapljevutih i plinovutih čestica
- zračenjem (radijacijom) koje se odvija bez materijalnog posrednika

#### 3.1. Provođenje kroz kapljevinu

Provođenje topline kroz kapljevinu odvija se kada ona miruje ili se giba bez miješanja čestica između strujnica tekućine kao što je slučaj pri laminarnom strujanju tekućine [8]. Izmjena topline zahtijeva nejednoliku temperaturnu distribuciju tekućine, tj. u različitim točkama temperaturni gradijent mora biti veći od nule. Gustoća toplinskog toka pri provođenju definira se Fourireovim zakonom kojeg opisuje slijedeća jednadžba:

$$q = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \quad (9)$$

Veličina  $\lambda$  označava toplinsku provodnost, a ovisi o tlaku, temperaturi te prirodi promatrane tvari.

#### 3.2. Konvekcija

Označava prijenos topline radi strujanja fluida do kojeg dolazi uslijed kretanja čestica više temperature od vanjske stijenke (ako je ona toplija od tekućine) u jezgru struje gdje se one hlade miješajući se s česticama niže temperature. Hladnije čestice potom dolaze na stijenku te se sam proces ponavlja. Prijenos se topline stoga uz međumolekularni način, odvija i komešanjem različito temperiranih čestica tekućine. Izmjena je topline određena brojem međusobnih dodira čestica različite temperature. Ako je broj tih dodira veći, proces izmjene topline bit će intenzivniji. Gibanje tekućine može biti pobuđeno na dva načina:

- prirodnom ili slobodnom konvekcijom
- prisilnom ili prinudom konvekcijom

Kod prirodne konvekcije čestice se fluida koje su bliže stijenci više temperature zagriju te postanu lakše. Zbog toga dolazi do njihova podizanja te one pobuđuju strujanje koje je

uvjetovano prijenosom topline. Strujanje je tekućine uslijed slobodne konvekcije uvjetovano heterogenošću masenih sila nad promatranim volumenom tekućine. Sama je heterogenost uvjetovana nejednolikom temperaturnom distribucijom fluida, tj. nejednolikom distribucijom gustoće fluida unutar graničnog sloja [8].

Prisilna konvekcija označava strujanje fluida izazvano vanjskim utjecajem poput vjetra ili ventilatora, bez obzira na prijenos topline. Strujanje je dakle uvjetovano vanjskom nametnutom razlikom tlakova.

Konvektivni se prijenos topline može opisati kao superpozicija kondukcijskog energetskog udjela zbog postojanja temperaturnog gradijenta unutar fluida te prijenosa energije uvjetovanog gibanjem tekućine [8]. Matematički izraz kojim se konvekcija opisuje zasniva se na Newtonovom iskustvenom stavku koji glasi:

$$\delta\Phi = \alpha(\vartheta_s - \vartheta_\infty)dA \quad (10)$$

gdje  $\delta\Phi$  predstavlja diferencijalnu vrijednost toplinskog toka koja se izmjeni konvekcijom s elementa vanjske površine  $dA$  temperature  $\vartheta_s$ , s okolišnim fluidom temperature  $\vartheta_\infty$ . Naznačena razlika temperatura predstavlja pad temperature u graničnom sloju fluida koji se formira uz stijenku.



#### 4. TURBULENTNO STRUJANJE

Turbulentno je strujanje najčešći oblik strujanja fluida u prirodi, a javlja se pri visokim vrijednostima Reynoldsovog broja. Takvo je strujanje kaotično, a u njemu sve promjenjive veličine pokazuju slučajne promjene po vremenskoj i prostornim koordinatama. Osnovne su karakteristike takvih strujanja nestacionarnost, difuzijski karakter te povećanje disipacije energije [7].

Turbulentno se strujanje zbog svojeg stohastičkog karaktera ne može analitički opisati. Pri razvijenom turbulentnom strujanju sve fizikalne veličine pokazuju slučajne pulsacije u spektru valnih duljina te u frekvencijskom spektru. Prilikom rješavanja Navier-Stokesovih jednadžbi razvijenog turbulentnog strujanja geometrijska mreža treba biti dovoljno mala kako bi se obuhvatile najmanje pulsacije. Vremenski bi pak korak također trebao biti takve veličine da obuhvati najviše frekvencije turbulentnih pulsacija, što sa današnjeg stajališta snage računala te brzine računanja nije isplativo. Stoga se turbulentno strujanje rješava na način da se fizikalne veličine u danim jednadžbama uprosječe čime se dobivaju prosječne vrijednosti te amplitude pulsacija nekih integralnih veličina poput tlaka ili temperature [7].

Vremenski promjenjive se veličine na taj način mogu prikazati kao zbroj osrednjene vrijednosti i pulsirajućeg dijela prema jednadžbi:

$$f = \bar{f} + f' \quad (11)$$

Jednadžba kontinuiteta za osrednjeno strujanje glasi:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (12)$$

Oduzimanjem jednadžbe kontinuiteta za osrednjeno strujanje od jednadžbe za ukupno strujanje dobiva se jednadžba za pulsirajuće strujanje:

$$\frac{\partial v'_j}{\partial x_j} = 0 \quad (13)$$

Vremenskim osrednjavanjem zakona očuvanja količine gibanja dobiva se:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j \bar{v}_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{v'_i v'_j} \right] \quad (14)$$

Ovaj skup jednadžbi naziva se Reynoldsovim jednadžbama. Zadnji član jednadžbe količine gibanja predstavlja turbulentnu difuziju količine gibanja, a naziva se Reynoldsovim naprežanjem. Tenzor tog naprežanja sadrži šest nepoznatih veličina pa sustav Reynoldsovih

jednadžbi nema jednoznačno rješenje [7]. Stoga se uvode modeli turbulencije kako bi se uskladilo broj jednadžbi te broj nepoznatih polja na određenoj korelaciji.

#### 4.1. Modeli turbulencije

Modeli se turbulencije dijele na modele prvog, drugog te trećeg reda, a s obzirom na red korelacije brzina za koju se rješava transportna jednadžba [7]. U modelima prvog reda modelira se tenzor Reynoldsovih naprežanja prema Boussinesqovoj hipotezi prema:

$$-\rho \overline{v'_i v'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij} \quad (15)$$

Član  $\mu_t$  označava turbulentu viskoznost koja je funkcija strujanja. Boussinesqovom hipotezom tenzor Reynoldsovih naprežanja koji se sastoji od šest komponenti, modeliran je jednim poljem turbulentne viskoznosti.

U modelima drugog reda rješava se jednadžba za  $\overline{v'_i v'_j}$ , u kojima se pojavljuje trojna korelacija  $\overline{v'_i v'_j v'_k}$ , dok se u modelima trećeg reda rješava jednadžba za trojnu korelaciju  $\overline{v'_i v'_j v'_k}$ .

#### 4.2. Modeliranje turbulentne viskoznosti

Prema Boussinesqu turbulentna naprežanja, koja su posljedica turbulentnog miješanja čestica, modeliraju se kao viskozna naprežanja koja su pak posljedica kaotičnog gibanja molekula unutar čestica fluida [7]. Njegova ideja vodi modelu turbulentne viskoznosti prema Prandtlu koji se temelji na analogiji s molekularnom viskoznošću. Stoga se turbulentna viskoznost izražava kao:

$$\mu_t = \rho l_t v_t \quad (16)$$

$l_t$  označava duljinu puta miješanja čestica, dok  $v_t$  označava karakterističnu brzinu turbulentnih pulsacija. Turbulentna je viskoznost na taj način određena s karakteristične veličine u turbulentnom strujanju. Navedeni izraz je osnova za određen broj modela koji se razlikuju s obzirom na definiciju te dvije veličine.

#### 4.3. k-ε model turbulencije

Svi diferencijalni modeli turbulencije s dvije jednadžbe, kao što je k-ε model, za karakterističnu brzinu koriste izraz

$$v_t = \sqrt{\bar{k}} \quad (17)$$

a razlikuju se s obzirom na izbor druge karakteristične veličine. U ovom je modelu ta druga veličina  $\bar{\varepsilon}$  koja predstavlja vremenski osrednjenu vrijednost brzine disipacije kinetičke u unutarnju energiju. Kinetička se energija turbulentnog strujanja može podijeliti na energiju glavnog strujanja te energiju pulsacijskog dijela tj. kinetičku energiju turbulencije. Zbog toga što pulsacije velikih razmjera imaju velike amplitude pulsacije brzine, a pulsacije malih razmjera male amplitude, slijedi da je najveći dio kinetičke energije sadržan u pulsacijama velikih razmjera [7]. Pretvorba se pak, kinetičke u unutarnju energiju događa zbog utjecaja viskoznih sila. Njihov utjecaj ocjenjuje se Reynoldsovim brojem kako slijedi:

$$Re_\lambda = \frac{\rho v_\lambda \lambda}{\mu} \quad (18)$$

gdje  $v_\lambda$  predstavlja amplitudu pulsacija brzine, a  $\lambda$  pulsaciju valne duljine. Iz izraza te poznavanja obilježja Reynoldsove značajke, koja predstavlja omjer sile inercije te viskozne sile, može se zaključiti kako je pri velikim vrijednostima Reynoldsovog broja (pulsacije velikih valnih duljina imaju i velike amplitude pulsacija brzina) utjecaj viskoznih sila malen. Suprotno vrijedi za pulsacije malih valnih duljina koje znače velik utjecaj viskoznih sila. Iz svega navedenog slijedi kako je kinetička energija strujanja većinski sadržana u pulsacijama velikih valnih duljina, a disipira se pulsacijama najmanjih valnih duljina.

Skup jednadžbi koji opisuje navedeni model uz jednadžbe kontinuiteta te jednadžbu očuvanja količine gibanja sastoji se od jednadžbe za kinetičku energiju turbulencije:

$$\frac{\partial(\rho \bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{v}_j \bar{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma^k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] + G - \rho \bar{\varepsilon} \quad (19)$$

gdje  $G$  predstavlja generaciju kinetičke energije turbulencije kako slijedi:

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) = 2 \mu_t D_{ij}^2 \quad (20)$$

Jednadžba koja opisuje disipaciju kinetičke energije turbulencije glasi:

$$\frac{\partial(\rho \bar{\varepsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{v}_j \bar{\varepsilon})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma^\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + C_1 G \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}} - C_2 \rho \frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{k}} \quad (21)$$

Za slučaj visokih vrijednosti Reynoldsovog broja vrijednosti konstante dane su u tablici 1.

**Tablica 1 . Standardne vrijednosti konstanti k-epsilon modela**

| $C_\mu$ | $\sigma^k$ | $\sigma^\varepsilon$ | $C_1$ | $C_2$ |
|---------|------------|----------------------|-------|-------|
| 0,09    | 1,0        | 1,3                  | 1,44  | 1,92  |

#### 4.4. k- $\omega$ model turbulencije [9]

U k- $\omega$  modelu turbulencije uz jednadžbe kontinuiteta te jednadžbu očuvanja količine gibanja rješava se dvije dopunske diferencijalne jednadžbe, a to su jednadžba za kinetičku energiju turbulencije:

$$\frac{\partial(\rho\bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{v}_j\bar{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial\bar{k}}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (22)$$

gdje  $G_k$  predstavlja generaciju turbulentne kinetičke energije zbog gradijenta osrednjene brzine.  $\Gamma_k$  predstavlja difuzivnost, dok  $Y_k$  predstavlja disipaciju turbulentne kinetičke energije. Jednadžba koja opisuje vremenski osrednjenu kutnu brzinu rotacije čestice fluida glasi:

$$\frac{\partial(\rho\bar{\omega})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{v}_j\bar{\omega})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial\bar{\omega}}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (23)$$

$G_\omega$  predstavlja generaciju disipacije kinetičke energije.  $\Gamma_\omega$  predstavlja difuzivnost  $\omega$ , dok  $Y_\omega$  predstavlja disipaciju  $\omega$  zbog turbulencije.  $S_k$  i  $S_\omega$  su izvorski članovi koje u računalnim simulacijama definira korisnik.

U ovom radu korišten je k- $\omega$  SST model turbulencije što je varijacija k- $\omega$  modela. Oznaka SST predstavlja "Shear stress transport". Glavne razlike u kojima se model SST razlikuje u odnosu na standardni model su:

- postepena promjena iz standardnog k- $\omega$  modela u unutarnjem području graničnog sloja u verziju k- $\epsilon$  modela s visokim Re brojevima u vanjskom dijelu graničnog sloja
- izmijenjeno formuliranje turbulentne viskoznosti kako bi se u obzir uzeli transportni učinci turbulentnog smičnog naprezanja

Navedeni se model može koristiti kao "Low-Re" model turbulencije što je u ovom slučaju poželjno zbog vrlo malih brzina strujanja u spremniku, a posljedično i malih Reynoldsovih brojeva.

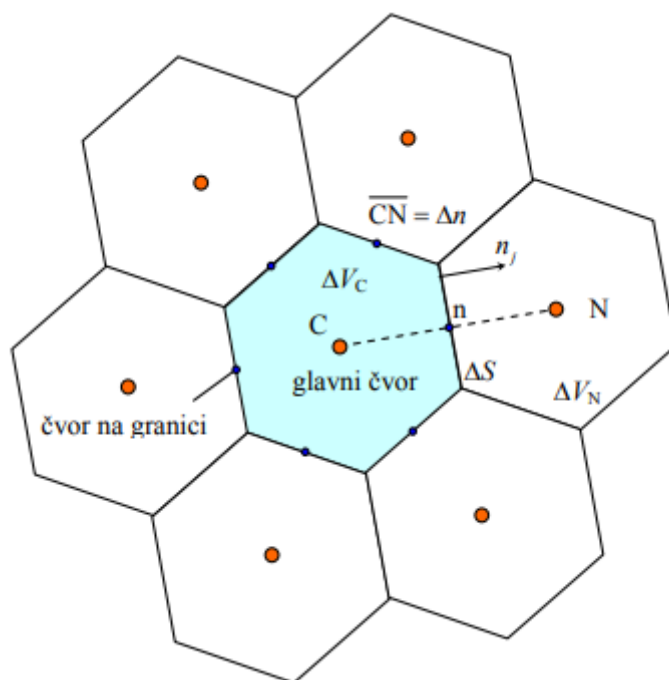
## 5. DISKRETIZACIJA OSNOVNIH JEDNADŽBI DINAMIKE FLUIDA

Računalni program Fluent koji je u ovom radu korišten, zasniva se na rješavanju parcijalnih diferencijalnih jednadžbi metodom konačnih volumena. To je integralna metoda koja se zasniva na integriranju konzervativnog oblika transportnih jednadžbi po konačnim volumenima na koje je područje proračuna podijeljeno [10]. Taj oblik jednadžbe glasi:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j \varphi}{\partial x_j} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_j} = \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right] = S_\varphi \quad (24)$$

U gornjoj jednadžbi prvi član označava član lokalne promjene, drugi je član konvekcijski član dok treći član označava difuzijski član. Integracijom navedene jednadžbe po volumenu prema slici 6 dobiva se:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \varphi dV = - \int_{\Sigma \Delta S} \left( \rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) n_j dS + \int_{\Delta V} S_\varphi dV \quad (25)$$



Slika 6 Dio diskretiziranog područja [10]

Brzina promjene sadržaja fizikalnog svojstva unutar kontrolnog volumena ovisna je o brzini protoka navedenog svojstva kroz granicu volumena te brzini nastajanja ili nestajanja istog tog fizikalnog svojstva unutar samog volumena [10].

Integrali po površini iz jednadžbe 25 predstavljaju protok svojstva kroz površinu volumena zbog konvekcije i difuzije. Zbrojem tih vektora dobiva se ukupni vektor  $J_n$ , čija normalna komponenta utječe na protok fizikalnog svojstva. Prikaz te normalne komponente glasi:

$$\Delta J_n = (\rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}) n_j dS = \int \left( \rho v_n \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dS = \left[ \rho (\overline{v_n \varphi})_n - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_n \right] \Delta S \quad (26)$$

U dijelu jednadžbe koji označava normalnu derivaciju uvodi se bezdimenzijska značajka prema:

$$\tilde{n} = \frac{n}{\Delta n} \quad (27)$$

a srednja vrijednost umnoška  $(\overline{v_n \varphi})_n$  se aproksimira umnoškom srednjih vrijednosti [10] pa gornji izraz prelazi u:

$$\Delta J_n = (\rho \overline{v_n} \Delta S)_n \overline{\varphi}_n - \frac{\Gamma \Delta S}{\Delta n} \frac{\partial \varphi}{\partial \tilde{n}} \Big|_n = F_n \varphi_n - D_n \frac{\partial \varphi}{\partial \tilde{n}} \Big|_n \quad (28)$$

U navedenom izrazu prvi član desne strane označava jačinu konvekcije dok  $D_n$  označava snagu difuzije. Prilikom numeričkog izračuna računaju se te pante (u glavnim čvorovima) samo čvorne vrijednosti  $\phi$ , te je stoga potrebno odrediti vrijednosti na stranicama volumena pomoću vrijednosti u glavnim čvorovima. Ovaj se postupak naziva numeričkom shemom ili shemom diferencije [10].

Diskretizacijom integrala po kontrolnom volumenu s centralnim čvorem C prema Slika 6 dobiva se slijedeći izraz:

$$\left( \frac{\rho \Delta V_C}{\Delta t} + \sum_{nb=1}^{N_{ab}} a_N^{nb} - b \right) \varphi_C = \sum_{nb=1}^{N_{ab}} [a_N \varphi_N]^{nb} + a + \frac{\rho \Delta V_C}{\Delta t} \varphi_C^{old} \quad (29)$$

Taj se postupak ponavlja za sve kontrolne volumene geometrije za koju se računa te se tim dobije sustav linearnih algebarskih jednadžbi u kojima su nepoznanice vrijednosti polja  $\phi$  u čvorovima. Broj jednadžbi jednak je broju kontrolnih volumena.

## 6. ALGORITMI RJEŠAVANJA OSNOVNIH JEDNADŽBI DINAMIKE FLUIDA

Računalni program Fluent nudi dva "solvera" kojim se rješavaju jednadžbe dinamike fluida: to su "pressure based" koji je u ovom radu korišten te "density based" solveri. "Pressure based" solveri uzimaju količinu gibanja te tlak kao primarne varijable. Upotrebljavaju se za različite tipove strujanja od nekompresibilnih strujanja niskim brzinama, što je slučaj u ovom radu, do kompresibilnih strujanja visokim brzinama. Algoritmi koji su dostupni u navedenom rješavaču su: tzv "Segregated solver" u kojem se jednadžbe kontinuiteta, količine gibanja te energetska jednadžba rješavaju sukcesivno te "Coupled solver" koji navedene jednadžbe rješava istovremeno. Nakon toga rješavaju se ostale jednadžbe poput jednadžbi turbulencije ili ostalih transportnih jednadžbi. Prednost coupled solvera koji se u ovom radu koristio u odnosu na segregated je u tome što rješenje brže konvergira. Nedostatak je pak u tome što zahtijeva veću računalnu memoriju pa ga se u nekim slučajevima ne isplati koristiti. Simulacije su bile tranzijentne, a turbulencija se modelirala k- $\omega$  modelom. Ostali modeli koji su u simulacijama korišteni prikazani su tablicom 2.

**Tablica 2. Korišteni modeli računalne simulacije**

|  |  |
|--|--|
| Model turbulencije                                   | k- $\omega$ SST                        |
| Radni fluid  | Voda (Boussinesqov model)              |
| Korekcija tlaka i brzine                             | Coupled                                |
| Interpolacijska shema gradijenta                     | Least square cell based                |
| Interpolacijska shema tlaka                          | Body force weighted                    |
| Interpolacijska shema količine gibanja               | Second order upwind                    |
| Interpolacijska shema turbulentne kinetičke energije | Second order upwind                    |
| Interpolacijska shema disipacije kinetičke energije  | Second order upwind                    |
| Interpolacijska shema energetske jednadžbe           | Second order upwind                    |
| Maksimalan broj iteracija po vremenskom koraku       | 20                                     |
| Vremenski korak                                      | 0.002-0.04 (u ovisnosti o režimu rada) |

### **6.1. Interpolacijska shema tlaka**

Prilikom odabira postavki simulacije Fluent pruža nekoliko interpolacijskih shema tlaka. U ovom je radu odabrana "Body force weighted" interpolacijska shema koja je pogodna pri rješavanju problema s velikim Ra brojem, tj. u situacijama u kojima dolazi do strujanja izazvanog prirodnom konvekcijom. Navedena shema računa tlak na stranicama kontrolnog volumena na način da pretpostavlja kako je gradijent razlike tlaka i masenih sila konstantan.

### **6.2. Diskretizacija – interpolacijske sheme**

U Fluentu, varijable koje se računaju spremaju se u središte ćelije tj. kontrolnog volumena. Kako bi se jednadžbe dinamike fluida mogle riješiti potrebno je poznavati vrijednosti polja na stranicama kontrolnih volumena [11]. Interpolacijska shema koja su se u ovom radu koristila za količinu gibanja, kinetičku energiju turbulencije, energijsku jednadžbu te jednadžbu disipacije kinetičke energije jest "second order-upwind shema". Njome se postiže veća preciznost rješenja u odnosu na ostale sheme, ali rješenje sporije konvergira. Nužno ju je koristiti ako je mreža načinjena od trokutastih ćelija.

### **6.3. Rubni uvjeti te korišteni modeli u simulaciji**

U 2D osnosimetričnoj simulaciji koja se u ovom radu koristila središnja os prema uputama Fluent definiralas rubnim uvjetom tipa "axis". Stijenke spremnika modelirane su tipom "wall", a na njima je pretpostavljena idealna izolacija, tj. toplinski tok kroz stijenke spremnika iznosio je 0. Ulaz i izlaz vode iz spremnika slučaju u kojem nije bilo potrošnje PTV-a također su definirani rubnim uvjetom tipa "wall". U dijelovima simulacije u kojima je bilo potrošnje PTV-a ulaz i izlaz vode definirali su se rubnim uvjetom "mass flow inlet/outlet".

### **6.4. Modeliranje prirodne konvekcije – Boussinesqov model**

Gibanje čestica fluida uslijed prirodne konvekcije nastupa zbog toga što se čestice fluida koje su bliže stijenci koja je više temperature zagriju te postanu lakše. Uslijed toga dolazi do njihova podizanja te one pobuđuju strujanje koje je uvjetovano prijenosom topline.

U Fluentu se navedena pojava modelira Boussinesqovim modelom. Navedeni model omogućava simuliranje strujanja u spremniku uzrokovanog prirodnom konvekcijom.



Pretpostavlja se da je gustoća fluida konstantna u svim jednadžbama osim u dijelu jednadžbe količine gibanja koji se bavi uzgonom, koji glasi:

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0\beta(T - T_0) \quad (30)$$

gdje je  $\rho_0$  gustoća fluida koja je konstantna,  $T_0$  je radna temperatura, dok je  $\beta$  koeficijent toplinske širiljivosti. Navedena se jednadžba rješava spomenutim Boussinesquovim modelom prema:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \quad (31)$$

Ovime se uklanja gustoća iz uzgonskog dijela jednadžbe očuvanja količine gibanja. Ova pretpostavka vrijedi samo u određenom temperaturnom rasponu, a mora zadovoljiti uvjet:

$$\beta(T - T_0) \ll 1 \quad (32)$$

## 6.5. Courantov broj

Courantov broj bezdimenzijska je veličina kojom se procjenjuje potrebna veličina vremenskog koraka u tranzijentnim simulacijama u odnosu na veličinu elemenata mreže i brzine strujanja kako bi se održala stabilnost simulacije. Ako je njegova vrijednost veća od jedinice to znači kako se informacija širi kroz više od jedne ćelije u jednom vremenskom koraku zbog čega rješenje nije točno. Posljedica toga može biti nefizikalnost rješenja simulacije.

## 7. NORMA HRN EN – 15316-5-2021

Uz simulaciju u računalnom programu Fluent, temperature po visini spremnika izračunale su se i pomoću norme prEN 15316-5-2021. Ova norma se bavi metodom proračuna energetske potrebe te efikasnosti sustava za skladištenje toplinske energije koja se iskorištava za grijanje prostora i potrošnu toplu vodu. Norma se prikazuje metode proračuna za:

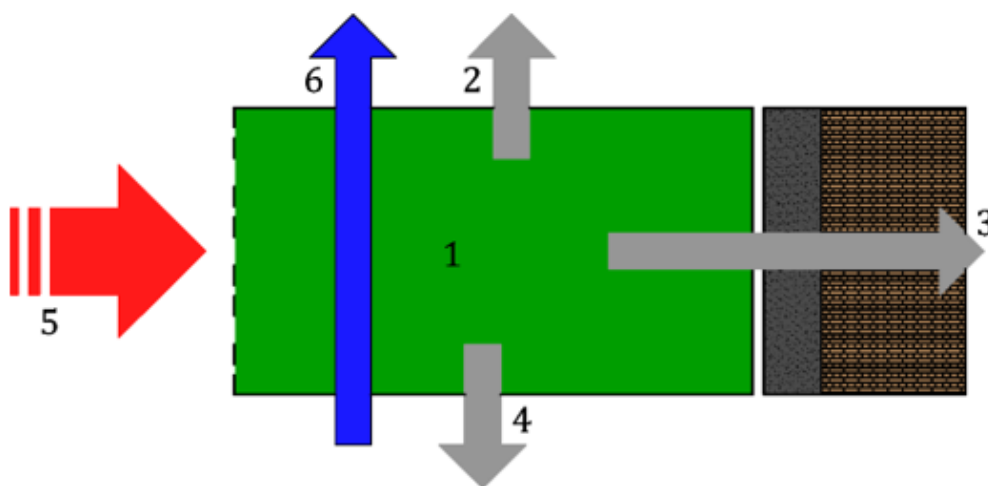
- toplinskih gubitaka kroz ovojnicu spremnika
- uskladištenu energiju u spremniku
- povratne toplinske gubitke
- izlazne temperature vode iz spremnika

Proračun se može provesti putem dvije različite metode. Metoda A koristi se u slučaju kada u spremniku postoji temperaturna stratifikacija, dok se metoda B koristi u slučaju kada je temperatura vode u spremniku homogena. U ovom radu koristile su se obje metode proračuna.

Metoda A zasniva se na slijedećoj jednadžbi:

$$m_i c_p (\vartheta_{t+1,i} - \vartheta_{t,i}) = Q_{t+1,i} + \Delta m_t c_{p,w} (\vartheta_{t,i-1} - \vartheta_i) + H_{TR,i+1} (\vartheta_{t,i+1} - \vartheta_{t,i}) - Q_{sto,ls}(i) - H_{TR,i} (\vartheta_{t,i} - \vartheta_{t,i-1}) \quad (33)$$

Navadenu jednadžbu u grafičkom obliku predstavlja slika 7.



Slika 7. Energetska bilanca sloja i[12]

Oznaka 1 na slici predstavlja razliku entalpija sloja i. Oznaka 5 jest energija koja ulazi u sloj, oznaka 6 izražava promjenu entalpije zbog toka mase sloja koji se nalazi ispod sloja i. Oznake 2 i 4 predstavljaju izmjenu sloja kondukcijom sa slojem ispod te iznad, dok oznaka 3 označava toplinski gubitak sloja prema okolišu. Normom se prolaz topline kondukcijom ne uzima u obzir.

## 7.1. Metoda A

Proračun se provodi u koracima kako slijedi:

- Određivanje potreba za energijom te radnih uvjeta
- Definiranje načina korištenja spremnika, njegovog smještaja, priključka na sustav grijanja, priključka pomoćnog grijača te solarnog izmjenjivača topline
- Određivanje volumena spremnika, dimenzija izmjenjivača topline, "set point" temperature te temperaturnog režima pomoćnog grijača
- 1. korak: Određivanje temperatura slojeva iz prethodnog vremenskog koraka
- 2. i 3. korak: Izračun volumena vode koji napušta spremnik radi potrebe za PTV-om te rezultirajućih temperatura slojeva
- 4. korak: Izračun predane energije radi sustava cirkulacije PTV-a te rezultirajućih temperatura
- 5. korak: Izračun energije predane za grijanje prostora te rezultirajućih temperatura
- 6. korak: Izračun energetske dotoka u spremnik te rezultirajućih temperatura
- 7. korak: Preraspodjela temperatura po segmentima nakon dovoda energije
- 8. korak: Izračun temperaturnih gubitaka spremnika te konačnih temperatura po segmentima
- Izračun srednje temperatura izmjenjivača topline

### 1 korak – Inicijalizacija te definiranje početnih temperatura segmenata

Za početni vremenski trenutak sve temperature slojeva na koje utječe zagrijač jednake su "set point" temperaturi, dok su temperature ostalih slojeva jednake temperaturi hladne vode.

U ostalim vremenskim koracima temperature segmenata spremnika jednake su temperaturama iz prethodnog vremenskog trenutka dobivenih prema koraku 8.

### 2 korak – izračun volumena vode koji napušta spremnik radi potrošnje PTV-a

Proračun volumena koji napušta spremnik temelji se na energiji koju je potrebno isporučiti, a računa se s minimalnom dopuštenom vrijednošću PTV-a. U ovom se radu koristio stalan protok vode od 8 litara u minuti za dva različita vremenska trenutka koji su trajali po 5 minuta.

Energija koja je sadržana u svakom sloju za potrebe PTV-a iskazuje se kako slijedi:

$$Q_{sto;W;vol,i} = \frac{\rho_W c_{p,W} V_{sto;vol,i} (\vartheta_{sto;vol,i} - \vartheta_{W,cold})}{1000000} \quad (34)$$

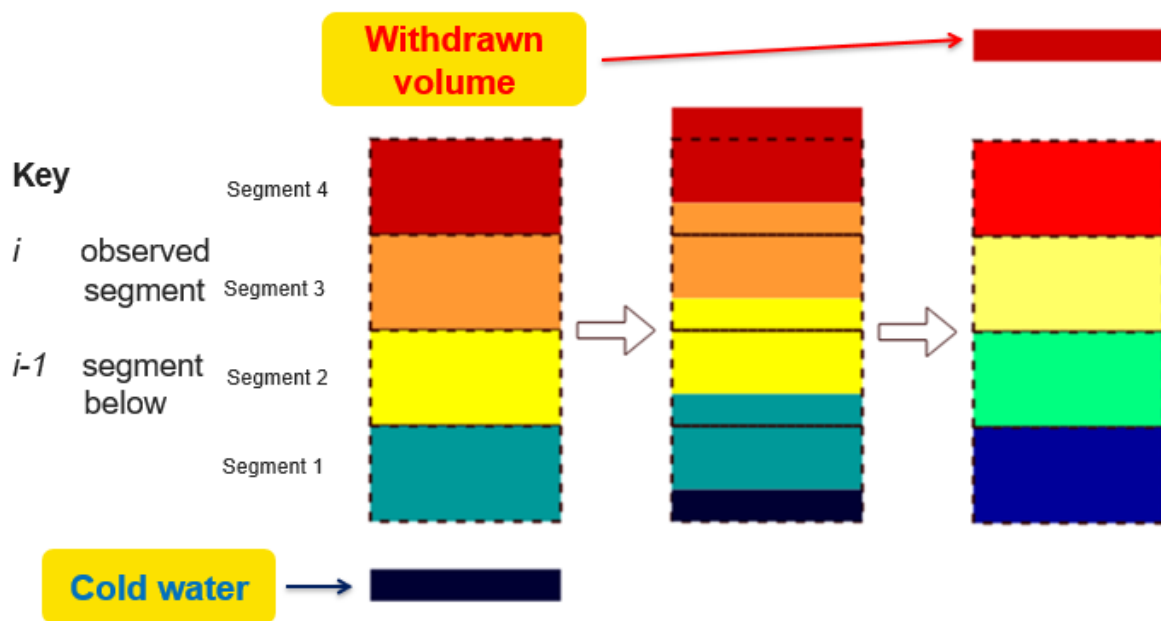
Volumen vode koji napušta spremnik računa se prema:

$$V_{sto;use;W;vol,i} = \frac{Q_{W;sto;out;vol,i} \cdot 1000000}{\rho_W c_{p,W} V_{sto;vol,i} (\vartheta_{sto;vol,i} - \vartheta_{W,cold})} \quad (35)$$

gdje  $Q_{W;sto;out;vol,i}$  predstavlja energiju koja se predaje sustavu distribucije potrošne tople vode.

3 korak – temperature segmenata spremnika nakon isporučenog potrebnog volumena vode

Ukupni volumen vode koji napušta spremnik zamjenjuje se jednakim volumenom hladne vode koji ulazi na dnu spremnika. Voda iz gornjeg segmenta miješa se sa količinom vode iz donjeg segmenta, a koja je jednaka količini vode koja napušta spremnik. Grafički prikaz navedenog predstavlja slika 8.



Slika 8. Grafički prikaz 3. koraka norme[13]

4 korak – temperature segmenata spremnika nakon predane energije radi sustava cirkulacije PTV-a

U ovom se koraku računaju toplinski gubici sustava cirkulacije tople vode. Proračun se temelji na slijedećoj jednadžbi:

$$\Delta\vartheta_{sto;vol,i} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{Q_{W;dis;ncons} \cdot 1000000}{\rho_W \cdot c_{p,w} \cdot V_{sto;vol,i}} & \text{if } i = N_{vol} \\ 0 & \text{if } i \neq N_{vol} \end{array} \right\} \quad (36)$$

### 5. korak –proračun temperatura segmenata nakon odvođenja energije potrebne za zagrijavanje prostora

U ovom radu spremnik je podijeljen na 4 segmenta kako preporučuje i norma. Izmjenjivač topline nalazi se u 3 segmentu. U ovom slučaju nema izmjene mase te se toplinsko stanje spremnika računa direktno. Proračun se temelji na slijedećoj jednadžbi:

$$Q_{sto;H;vol,i} = \max\left(\frac{\rho_w \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto;vol,i} \cdot (\vartheta_{sto;vol,i} - \vartheta_{H;out,min})}{1000000}; 0\right) \quad (37)$$

### 6. korak –proračun temperatura segmenata nakon dovođenja energije spremniku

Izmjenjivač solarnog kruga po normi je smješten u najniži segment spremnika, dok je pomoćni grijač smješten u segment 3. Povećanje temperature uslijed dotoka energije solarnog kruga te pomoćnog grijača računa se na slijedeći način:

$$\Delta\vartheta_{sto;vol,1} = \frac{Q_{H;sto;sol,in;vol,1} \cdot 1000000}{\rho_w \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto;vol,1}} \quad (38)$$

$$\Delta\vartheta_{sto;vol,N_{vol,bu}} = \frac{Q_{H;sto;bu,in;vol,N_{vol,bu}} \cdot 1000000}{\rho_w \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto;vol,N_{vol,bu}}} \quad (39)$$

Prva jednadžba predstavlja povećanje temperature uslijed energije dovedene izmjenjivačem solarnog kruga, dok druga jednadžba iskazuje temperaturnog povećanje uslijed rada pomoćnog izmjenjivača topline.

### 7. korak –preslagivanje temperatura segmenata spremnika nakon dovoda energije

Kada je temperatura segmenta  $i$  veća od temperature segmenta iznad njega, ta se dva volumena spoje. Iterativni se postupak provodi dok temperatura donjeg segmenta ne postane manja ili jednaka temperaturi gornjeg segmenta. Ovaj se korak zasniva na slijedećem izrazu:

$$\vartheta_{sto;vol,i} = \vartheta_{sto;vol,i+1} = \frac{\vartheta_{sto;vol,i} \cdot V_{sto;vol,i} + \vartheta_{sto;vol,i+1} \cdot V_{sto;vol,i+1}}{V_{sto;vol,i} + V_{sto;vol,i+1}} \quad (40)$$

### 8. korak –izračun toplinskih gubitaka i konačnih temperatura

Toplinski gubici računaju se na slijedeći način:

$$Q_{sto;ls;vol,i} = (f_{sto;conn;ls,i} \cdot H_{sto;ls,i} + H_{sto;add;ls,i}) \cdot (\vartheta_{sto;vol,i} - \vartheta_{sto;amb}) \quad (41)$$

gdje  $f_{sto;conn;ls}$  predstavlja koeficijent kojime se izražavaju toplinski gubici zbog spoja cijevi na spremnik, a  $H_{sto;add;ls,i}$  iskazuje dodatni toplinski gubitak koji u obzir uzima termosifonsku cirkulaciju vode.

## 7.2. Metoda B

Metoda B provodi se u 5 koraka koji su opisani u nastavku rada:

### 1 korak – Temperatura spremnika nakon energije utrošene radi potreba PTV-a

Ukupna iskoristiva energija za potrebe PTV-a izražava se:

$$Q_{sto;w;ubl} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\rho_w \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto,tot} \cdot (\vartheta_{sto,t-1} - \vartheta_{W,cold})}{1000000} & \text{if } \vartheta_{sto,t-1} \geq \vartheta_{W,out;min} \\ 0 & \text{if } \vartheta_{sto,t-1} < \vartheta_{W,out;min} \end{array} \right\} \quad (42)$$

Ako je temperatura spremnika manja od najniže dopuštene temperature potrebne za PTV, računa se energija koju je potrebno dovesti kako bi se spremnik doveo na zadanu temperaturu. Potom se određuje energija koja se dostavlja sustavu PTV-a, te konačno pad temperature u spremniku uslijed toga:

$$\vartheta_{sto,tmp1} = \vartheta_{sto,t-1} + \frac{-Q_{W;sto;out} \cdot 1000000}{\rho_w \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto,tot}} \quad (43)$$

### 2. korak – temperature segmenata spremnika nakon predane energije radi sustava cirkulacije PTV-a

Temperatura vode u spremniku u ovom koraku se računa izrazom:

$$\vartheta_{sto,tmp2} = \vartheta_{sto,tmp1} + \frac{-Q_{W;dis;ncons} \cdot 1000000}{\rho_w \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto,tot}} \quad (44)$$

### 3. korak –proračun temperatura segmenata nakon odvođenja energije potrebne za zagrijavanje prostora

Pad temperature u spremniku nakon odvođenja topline potrebne radi sustava grijanja temelji se na slijedećem izrazu:

$$\vartheta_{sto,tmp3} = \vartheta_{sto,tmp2} + \frac{-Q_{H;sto;out} \cdot 1000000}{\rho_w \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto,tot}} \quad (45)$$

gdje  $Q_{H;sto;out}$  predstavlja energiju predanu sustavu grijanja.

### 4. korak –proračun temperatura segmenata nakon dovođenja energije spremniku

Ovaj se korak temelji na slijedećoj jednadžbi:

$$\vartheta_{sto,tmp4} = \vartheta_{sto,tmp3} + \frac{Q_{H;sto;bu;in} \cdot 1000000}{\rho_w \cdot C_{p;w} \cdot V_{sto,tot}} \quad (46)$$

gdje  $Q_{H;sto;bu;in}$  predstavlja energiju dovedenu vodi u spremniku.

### 5. korak –izračun toplinskih gubitaka i konačnih temperatura

U zadnjem koraku računaju se gubici i konačna temperatura prema izrazu kao i u metodi A.

## 8. SIMULACIJA U RAČUNALNOM PROGRAMU FLUENT

U računalnom programu Fluent simulirao se rad solarnog spremnika koji služi za opskrbu sustava potrošnom toplom vodom te potpomaže sustav grijanja. U radu je ponajprije provedena analiza utjecaja provođenja topline i slobodne konvekcije na temperaturnu raspodjelu u spremniku, a potom je spremnik u simulaciji podvrgnut različitim režimima rada čiji su rezultati uspoređeni sa rezultatima proračuna prema normi prEN 15316-5:2021.

### 8.1. Geometrija spremnika

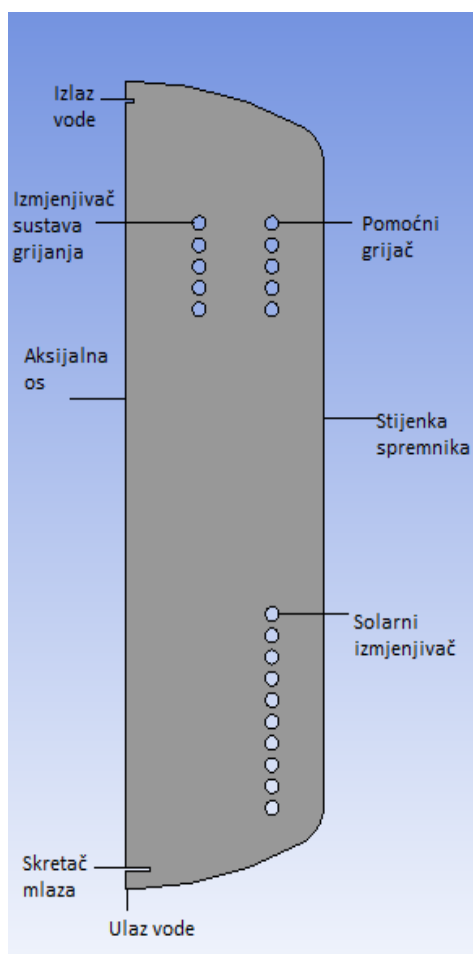
Geometrija spremnika je modelirana u sklopu programa "Design modeler" programskog paketa ANSYS. Kako su se simulacije provodile u studentskoj verziji softwera koja omogućava ograničen broj kontrolnih volumena, u geometriju spremnika uvedena su određena pojednostavljenja. Simulacija se naime provodila u 2D osno simetričnom modelu čime se ostvaruje znatno manji utrošak računalne memorije jer je u takvoj simulaciji potreban broj kontrolnih volumena znatno manji nego što bi to bio slučaj za 3D geometriju. Time se u sam model uvodi određeno ograničenje, jer su spiralni izmjenjivači modelirani prstenovima preko čije se površine dovodi toplinski tok spremniku. Spremnik koji je tema ovog rada volumena je  $283,7 \text{ m}^3$ . Dimenzije izmjenjivačkih površina definirane su kako slijedi:

- Solarni sustav povezan je spiralnim cijevnim izmjenjivačem površine  $0,86 \text{ m}^2$
- Pomoćni grijač također je spiralni izmjenjivač površine  $0,435 \text{ m}^2$
- Izmjenjivač kojim se napaja sustav grijanja dimenzija je  $0,216 \text{ m}^2$

Dovod hladne vode spremniku izveden je s donje strane spremnika, dok se odvod PTV-a ostvaruje s njegove gornje strane. Toplinski tok koji se izmjenjuje s površine izmjenjivača topline ovisan je o mnogo faktora poput temperature medija, temperature vode u spremniku, brzini strujanja medija u izmjenjivačkom krugu, no on se radi pojednostavljenja simulacije definirao na dva načina:

- Pri analizi utjecaja slobodne konvekcije te kondukcije na temperaturnu raspodjelu u spremniku te utjecaja rezultata simulacije na toplinsku učinkovitost spremnika, toplinski se tok modelirao konstantnom temperaturom stijenke izmjenjivača
- Pri usporedni različitih režima rada spremnika sa normom prEN 15316-5:2021, izmjena je topline modelirana konstantnim toplinskim tokom

Sama geometrija spremnika prikazana je slikom 9. Na njoj je u donjem dijelu spremnika vidljiv i skretač mlaza (pregrada na ulazu hladne vode) čija je zadaća sprječavanje prodiranja hladne vode u više dijelove spremnika.

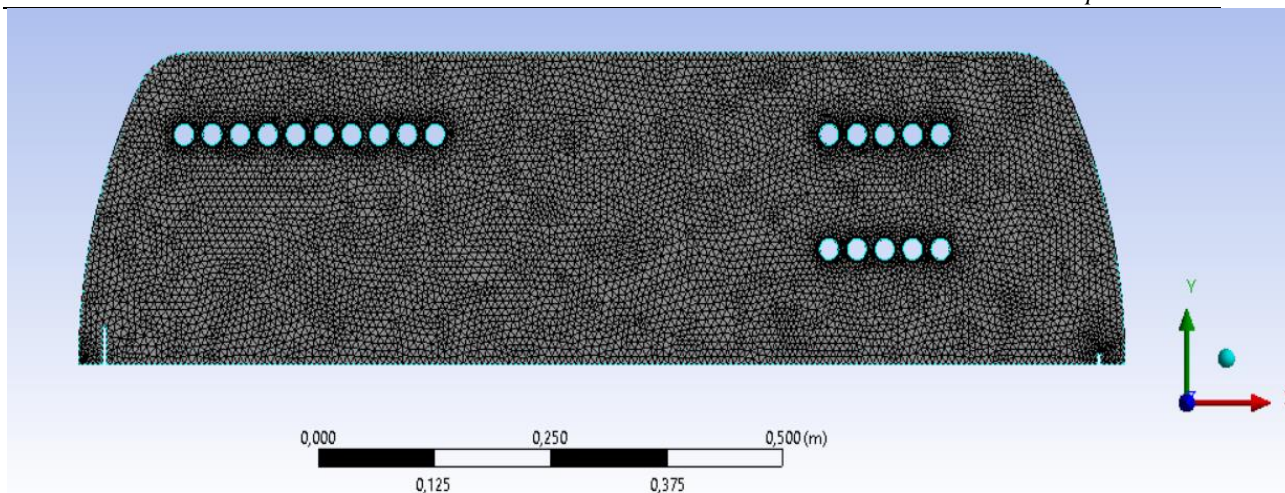


**Slika 9. Geometrija spremnika**

## 8.2. Mreža

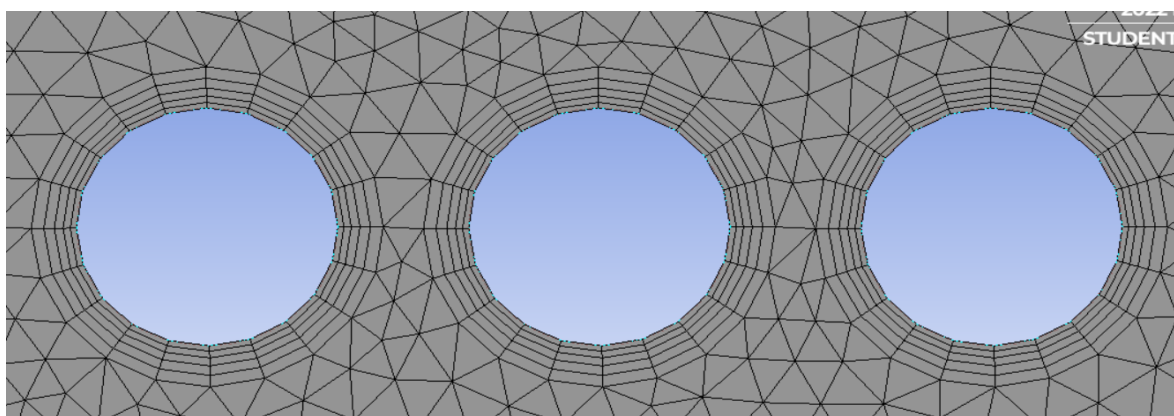
Nakon konstruiranja geometrije spremnika, pristupilo se generiranju mreže kontrolnih volumena za koju se potom provodi računalna simulacija u Fluentu. Mreža se generirala u dijelu programskog paketa ANSYS pod nazivom "Meshing". Prilikom izrade mreže bilo je potrebno paziti na njezinu kvalitetu zbog toga što o kvaliteti mreže ovisi točnost rezultata simulacije. Loša mreža može dovesti do pojave nefizikalnih rješenja ili do rušenja same simulacije. Kontrolne površine koje čine mrežu u obliku su trokuta veličine elementa 7,1 mm. Mreža se sastoji od 16770 elemenata te 9773 čvorova, a prikazana je slikom 10.





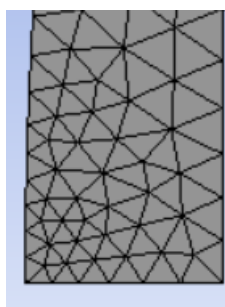
**Slika 10. Mreža kontrolnih volumena**

Oko izmjenjivača topline gdje se pojavljuju najveći temperaturni gradijenti mreža je profinjena opcijom "inflation". Granični sloj koji je definiran na ovaj način prikazan je slikom 11.



**Slika 11. Granični sloj**

Radi točnosti rezultata prilikom simulacije rada spremnika u kojem dolazi do potrošnje PTV-a, mreža je opcijom "edge sizing" profinjena i na mjestima ulaza te izlaza vode iz spremnika što se može vidjeti na slici 12.



**Slika 12. Ulaz u domenu**

## 9. UTJECAJ PROVOĐENJA TOPLINE I SLOBODNE KONVEKCIJE NA TEMPERATURNU RASPODJELU U SPREMNIKU

U ovom dijelu rada analiziran je utjecaj provođenja topline te slobodne konvekcije na temperaturnu raspodjelu u spremniku. U simulacijama, radi pojednostavljenja mreže te smanjenja potrebne računalne memorije, iz geometrije je izostavljen izmjenjivač sustava grijanja. Toplina koja se u spremniku izmjenjuje kada jedan od izmjenjivača radi modelirana je temperaturnim rubnim uvjetom. Režimi rada spremnika prilikom kojih su navedeni utjecaji promatrani prikazani su tablicom 3.

**Tablica 3. Režimi rada spremnika**

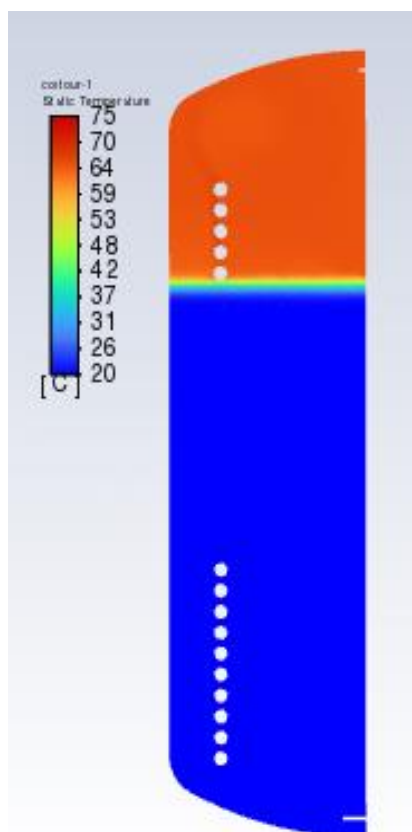
| Redni broj | Režim rada  | Trajanje |
|------------|---|----------|
| 1.         | Rad pomoćnog grijača  | 15 min   |
| 2.         | Sustav prepušten sam sebi ( niti jedan izmjenjivač ne radi) | 75 min   |
| 3.         | Rad grijača solarnog sustava                                | 60 min   |

### 9.1. Režim rada 1. – rad pomoćnog grijača 15 min

Kako je već navedeno, izmjena topline modelirala se konstantnom temperaturom stijenke koja je u slučaju rada pomoćnog grijača iznosila 80 °C. Pomoćni grijač u ovoj fazi simulacije radio je 15 min.

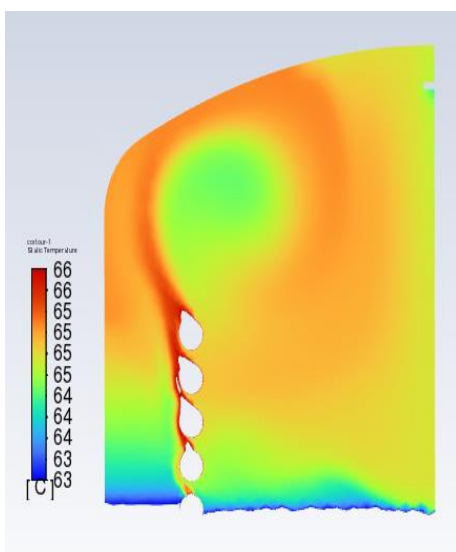
#### 9.1.1. Rezultati računalne simulacije

Prije početka same simulacije bilo je potrebno izvršiti inicijalizaciju polja protoka na cijelom području domene. Prilikom inicijalizacije nametnut je početni uvjet temperature vode od 20 °C. Tijekom izvršenja same simulacije bilo je potrebno pratiti Courantov broj koji niti u jednom elementu mreže ne smije prelaziti vrijednost od 1. Raspodjelu temperature po visini spremnika nakon 15 minuta rada pomoćnog grijača, uz nametnuti temperaturni rubni uvjet od 80 °C na stijenkama izmjenjivača, prikazuje slika 13. Iz same slike vidljivo je kako dolazi do progrijanja gornjeg dijela spremnika u kojem je grijač i smješten, dok donji dio spremnika ostaje iste temperature kao i prije početka rada grijača. Slojevi vode ispod pomoćnog izmjenjivača topline ne zagrijavaju se. Najveći temperaturni gradijent pojavljuje se između 0,75 i 0,8 m visine spremnika, blizu mjesta zadnje spirale izmjenjivača topline.



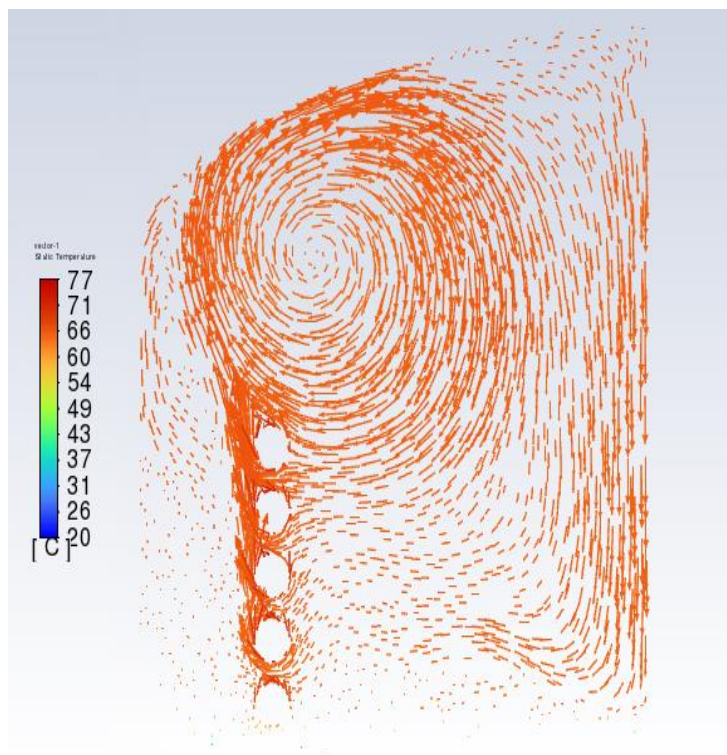
**Slika 13. Temperaturna raspodjela nakon 15 min rada pomoćnog grijača**

Na slici 14. uvećano je prikazana temperaturna raspodjela u gornjem dijelu spremnika. Temperature čestica vode najbliže stijenci su i najviše temperature, a vidljivo je kako se uslijed stvaranja vrtloga u najvišem dijelu spremnika to područje nešto brže zagrijava od ostatka područja prikazanog slikom. Maksimalna razlika temperatura u prikazanom dijelu iznosi 2 °C. Prikazani utjecaji prirodne konvekcije u normi se uzimaju na drugačiji način. Proračun prema normi temelji se isključivo na definiranim ulazima/izlazima energije u spremnik te toplinskim gubicima. Prirodna se konvekcija modelira na način da kada je temperatura promatranog segmenta veća od temperature segmenta iznad njega, ta se dva volumena spoje te rezultirajući segment ima jednoliku temperaturu.



**Slika 14. Temperatura u gornjem dijelu spremnika**

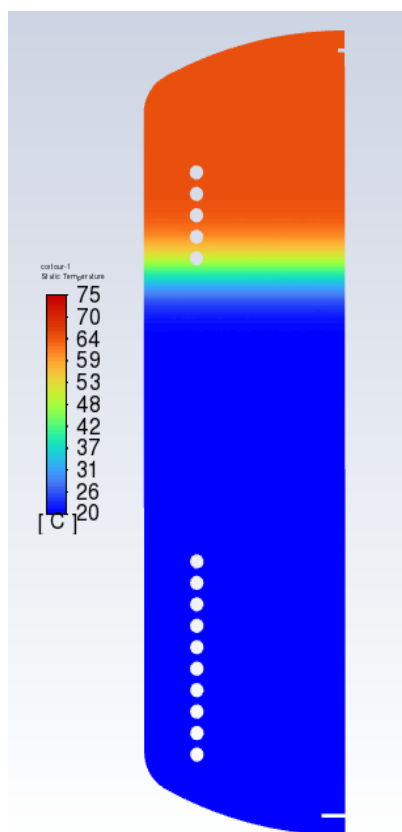
Slikom 15. vektorski je prikazano polje brzina strujanja fluida. Na slici su vektori označeni prema temperaturi fluida koji struji. Čestice se vode koje su bliže stijenci više temperature zagrijevaju te postaju lakše. Zbog toga dolazi do njihova podizanja te pobuđivanja strujanja koje je uvjetovano prijenosom topline. Na slici se jasno može vidjeti stvaranje navedenog vrtloga koji izaziva područje fluida nešto više temperature od ostatka gornjeg dijela spremnika.



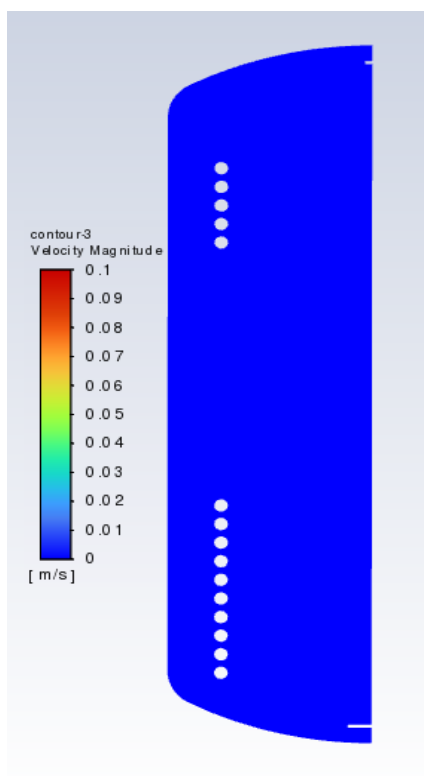
**Slika 15. Vektorsko polje strujanja**

## 9.2. Režim rada 2. – stanje spremnika bez rada izmjenjivača topline

Ovaj režim rada u simulaciji se pratio 75 minuta, a njime se nastojalo analizirati utjecaj provođenja, tj. kondukcije na temperaturnu raspodjelu u spremniku. Rubni uvjeti te korišteni modeli, uz promjenu gustoće toplinskog toka pomoćnog grijača, jednaki su kao i u prethodnoj simulaciji te opisani tablicom 2. Prilikom simulacije ovog načina rada u spremniku nije radio niti jedan izmjenjivač topline. Polje temperature te polje brzine strujanja u posljednjem trenutku ovog režima rada spremnika prikazani su slikom 16 te slikom 17.



Slika 16. Temperaturna raspodjela nakon 75 min rada

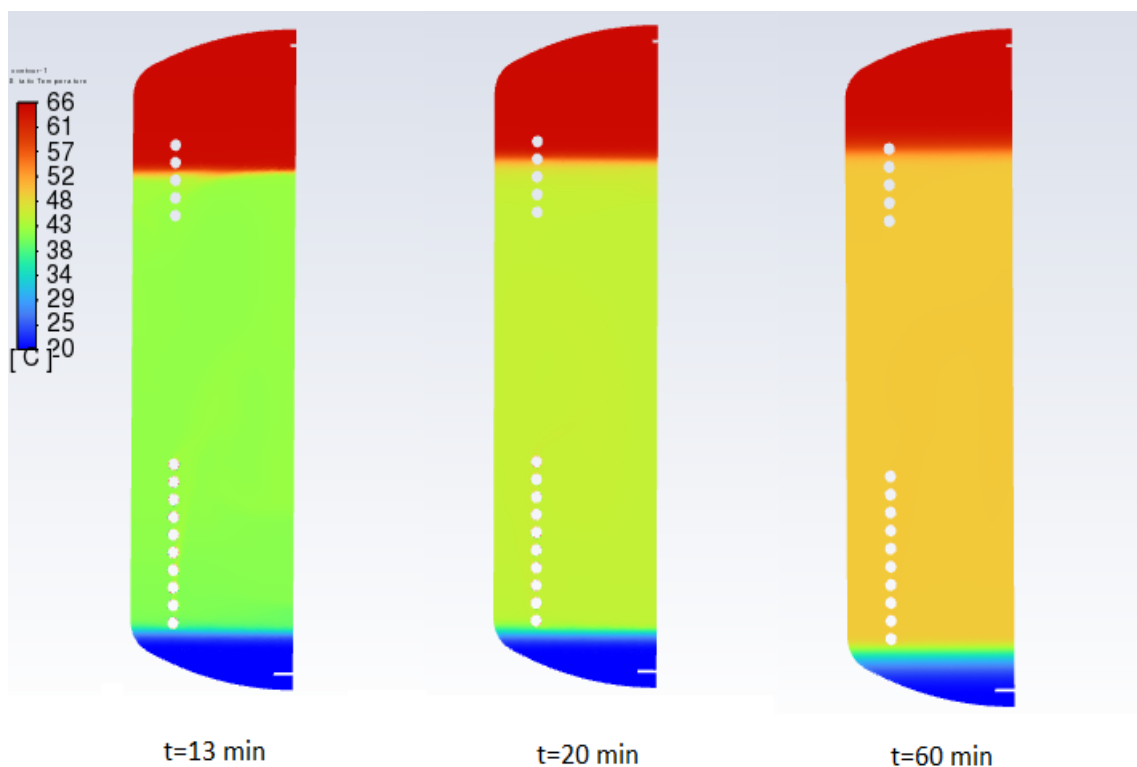


Slika 17. Polje strujanja nakon 75 min

Iz slike polja strujanja vidljivo je kako u spremniku strujanja praktički nema te se time moglo promatrati utjecaj kondukcije na temperaturnu raspodjelu po visini spremnika. Taj je utjecaj vidljiv na granici zagrijanog i hladnog dijela spremnika, no on nije izražen. Spremnik do visine od 0,7 metara ostaje početne temperature od 20 stupnjeva što znači da ne dolazi do njegova progrijanja. Područje temperaturnog gradijenta postaje veće, tj. polje najveće promjene temperature sada se nalazi na visini spremnika između 0,7 i 0,85 metara. Može se zaključiti kako provođenje ima određen utjecaj na raspodjelu temperature po visini spremnika, koji se normom pak ne uzima u obzir. Toplinski tok koji se kondukcijom odvodi od gornjih slojeva ne dovodi do značajnog povećanja temperature nižih dijelova spremnika. To za posljedicu ima malu promjenu temperature gornjih dijelova spremnika. Navedena pojava je poželjna zbog toga što voda pri vrhu spremnika ostaje zagrijana te se kao takva može koristiti u trenucima potrebe za PTV-om.

### 9.3. Režim rada 3. – rad grijača solarnog sustava 60 min

U ovom dijelu simulacije promatrao se utjecaj rada izmjenjivača solarnog sustava koji se modelirao temperaturnim rubnim uvjetom od 50 °C. Slikom 18. prikazana je usporedba temperaturnog polja spremnika nakon 13, 20 te 60 minuta rada solarnog sustava.

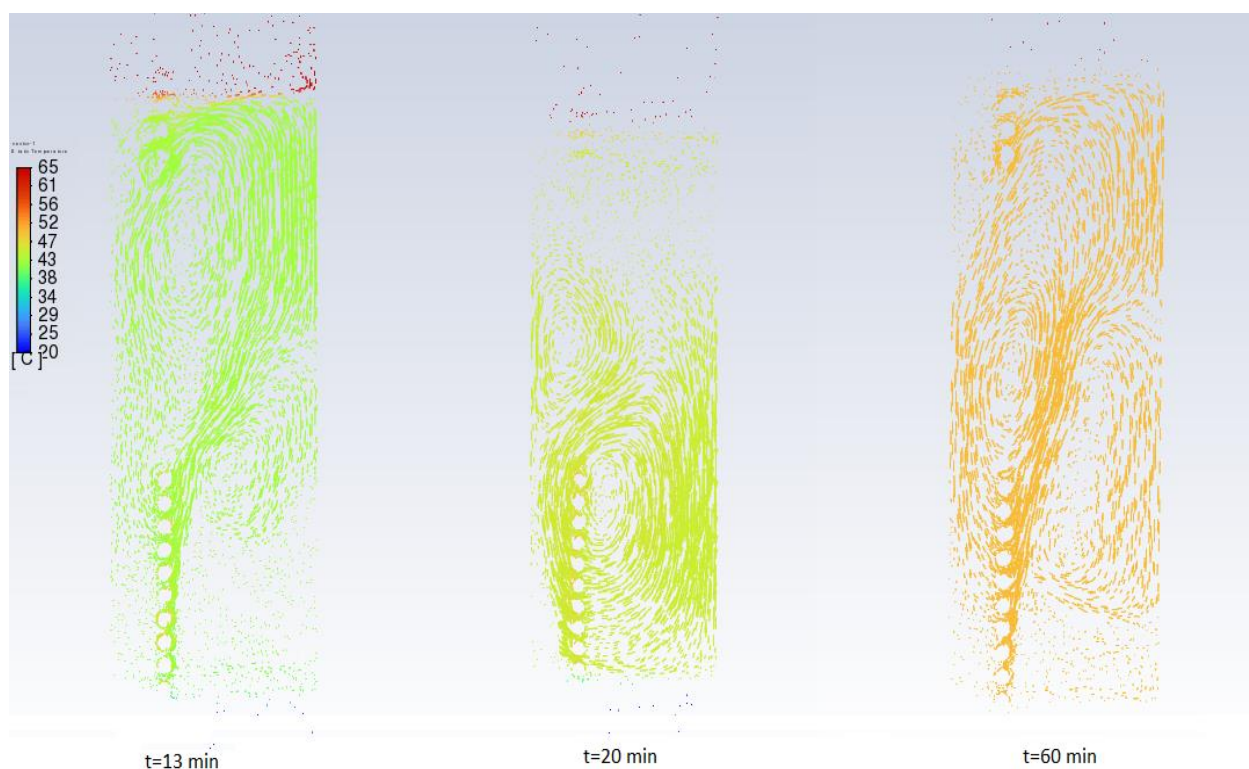


Slika 18. Usporedba temperaturnog polja spremnika

Može se uočiti kako protokom vremena, uslijed prirodne konvekcije dolazi do zagrijavanja slojeva iznad izmjenjivača solarnog sustava, dok područje ispod samog izmjenjivača unatoč određenom utjecaju kondukcije ostaje neprogrijano. Navedeni rezultati nisu u skladu s modelom prema normi u kojem se cijeli segment u kojem je izmjenjivač solarnog sustava smješten jednoliko zagrijava.

Slika 19. prikazuje usporedbu vektorskih polja strujanja vode u spremniku.

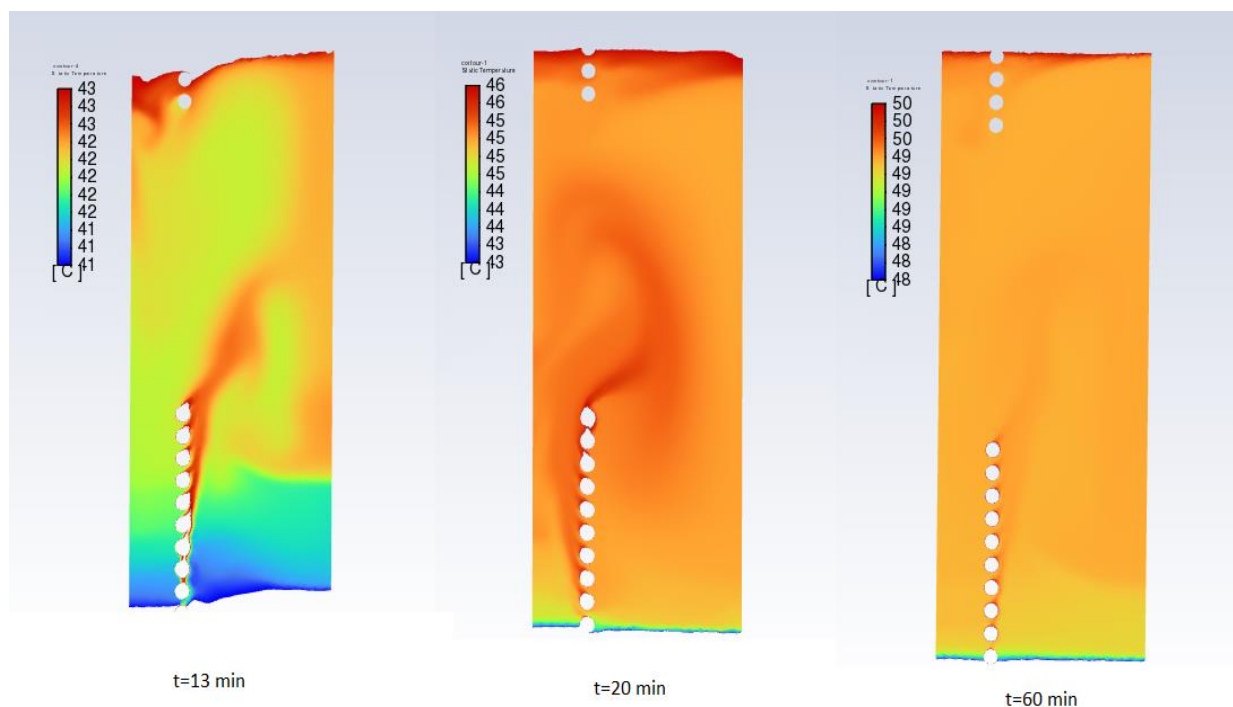




**Slika 19. Polje strujanja u 3. režimu rada spremnika**

Nakon 13. minuta rada izmjenjivača solarnog sustava vidljivo je kako uslijed uzgonskih sila dolazi do strujanja vode prema gornjim slojevima spremnika u kojima dolazi do miješanja s već zagrijanom vodom te stvaranja vrtloga i povratnog strujanja prema donjem dijelu. Iz slike strujnica vidljivo je kako je strujanje slabijeg intenziteta u nižim slojevima. Nakon 20 minuta rada izmjenjivača strujanje se intenzivira u donjem dijelu spremnika što za posljedicu ima bolje zagrijanje vode u tom području. Kao i nakon 13 minuta, i dalje postoji vrtložno strujanje, no ono se u odnosu na prethodni vremenski trenutak pomiče prema nižim slojevima. Nakon 60 minuta rada solarnog izmjenjivača strujanje se vode sve više pomiče prema najvišim slojevima, ali se nastali vrtlog vidljiv u 20. minuti simulacije zadržava pa je područje miješanja bitno veće nego u prethodnim vremenskim trenucima. To za posljedicu ima izraženu pomiješanost gornjih slojeva, koji su u početnim trenucima bili više temperature, sa slojevima vode niže temperature koje je zagrijao izmjenjivač solarnog kruga. Slika 20. prikazuje koliko je temperatura segmenta u kojem se nalazi solarni izmjenjivač jednolika, tj. dolazi li do stvaranja područja jednolike temperature ili postoje razlike temperature vode u navedenom segmentu.





**Slika 20. Temperature segmenta iznad solarnog izmjenjivača**

Može se uočiti kako nakon 13 minuta rada solarnog izmjenjivača postoji heterogenost temperature promatranog segmenta spremnika. U ovom trenutku maksimalna razlika temperatura unutar sloja iznosi 2 °C. Donji dijelovi niže su temperature iz razloga što u tim dijelovima nema izraženog strujanja zagrijane vode, a što se može vidjeti iz slike 19. Nakon 20 minuta rada spremnika polje temperature je ujednačenije, maksimalne razlike temperatura i dalje 2 °C s vidljivim područjima više temperature. Nakon sat vremena rada sustava polje temperature promatranog dijela spremnika je gotovo potpuno ujednačeno što je posljedica prethodno opisanih vrtloženja. Maksimalna razlika temperatura unutar sloja iznosi 1 °C. Treba napomenuti i kako s vremenom dolazi do podizanja linije razdjelnog sloja između vode više te niže temperature uzrokovano strujanjem vode iz nižeg dijela spremnika. Navedeni efekt normom se ne uzima u obzir. Prema normi zagrijavanje iz dijela spremnika u kojem je smješten izmjenjivač solarnog sustava utječe na sloj iznad, ali ne i na više dijelove spremnika što je simulacijom uočeno. Donji se pak dijelovi spremnika, smješteni ispod izmjenjivača ne zagrijevaju zbog čega bi bilo poželjno normom taj dio spremnika obuhvatiti kao zasebni segment.

## 10. USPOREDBA REZULTATA SIMULACIJE S REZULTATIMA PRORAČUNA PREMA NORMI prEN 15316-5:2021

U ovom dijelu rada provela se usporedba rezultata simulacije pomoću računalnog programa Fluent s rezultatima proračuna prema normi prEN 15316-5:2021 pri čemu je spremnik bio podijeljen na jedan te na više volumnih dijelova. U odnosu na simulacije provedene u prethodnom poglavlju, ovdje je u geometriju spremnika dodan izmjenjivač topline kojim se opskrbljuje sustav grijanja. Izmjena topline u ovim se simulacijama modelirala preko konstantnog toplinskog toka kako slijedi:

- Pomoćni grijač modelirao se konstantnim toplinskim tokom od 10,32 kW
- Izmjenjivač solarnog sustava modelirao se toplinskim tokom od 5 kW
- Izmjenjivač sustava grijanja modelirao se negativnim toplinskim tokom od 7 kW

U periodima potrošnje PTV-a ulaz i izlaz domene definirali su se kao "mass flow inlet/outlet", a maseni protok vode u tim periodima iznosio je 0,133 kg/s što odgovara potrošnji od 8 litara u minuti. Opis rada sustava koji se potom uspoređivao sa normom prikazan je tablicom 4.

**Tablica 4. Opis etapa simulacije**

| Redni broj | Režim rada  | Trajanje |
|------------|---|----------|
| 1.         | Rad pomoćnog grijača snage 10,32 kW   | 15 min   |
| 2.         | Rad pomoćnog grijača snage 10,32 kW uz rad izmjenjivača solarnog sustava snage 7 kW                           | 5 min    |
| 3.         | Rad izmjenjivača solarnog sustava snage 7 kW  | 5 min    |
| 4.         | Rad izmjenjivača solarnog sustava snage 7 kW uz potrošnju PTV od 8 l/min                                      | 5 min    |
| 5.         | Rad pomoćnog grijača snage 10,32 kW uz rad izmjenjivača solarnog sustava snage 7 kW                           | 15 min   |
| 6.         | Rad izmjenjivača sustava grijanja snage 7 kW  | 8 min    |
| 7.         | Rad pomoćnog grijača snage 10,32 kW, rad izmjenjivača sustava grijanja snage 7 kW uz potrošnju PTV od 8 l/min | 2 min    |

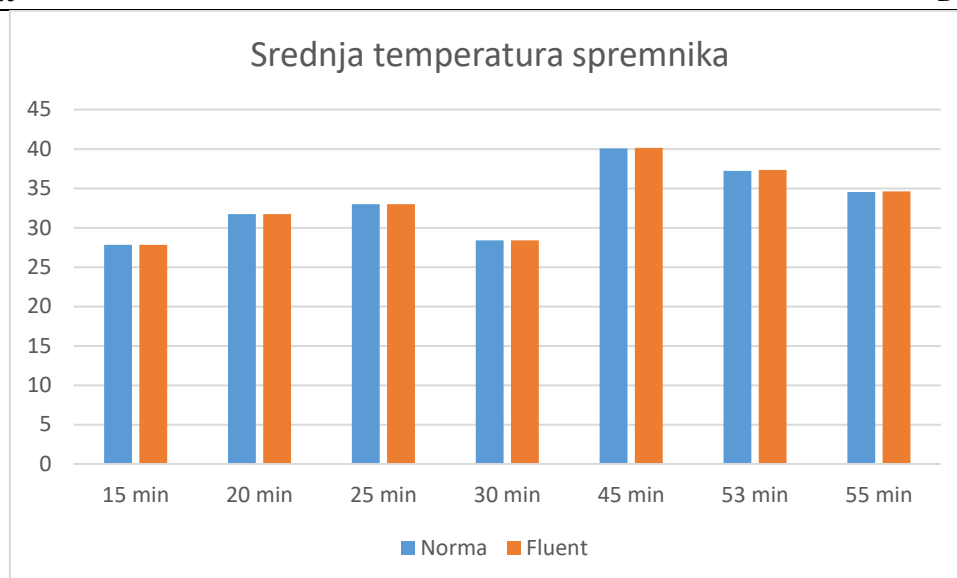
### 10.1. Usporedba rezultata simulacije i proračuna prema normi prEN 15316-5:2021 sa spremnikom kao jednim segmentom

U ovom dijelu rada dana je usporedba rezultata simulacije i proračuna prema normi prEN 15316-5:2021 sa spremnikom kao jednim segmentom. Proračun je napravljen za režime rada u kojima nema potrošnje PTV-a, dok se u tim trenucima temperatura odredila kao srednja vrijednost temperature cijelog spremnika određene metodom A proračuna. Temperatura određena simulacijom u spremniku dobila se kao osrednjena vrijednost temperature vode u cijelom spremniku. Rezultati proračuna te usporedba s rezultatima simulacije dana je u tablici 5.

Tablica 5. Usporedba rezultata simulacije sa spremnikom kao jednim volumenom

| Vremenski trenutak [min] | $\vartheta_{sto}$ | $\vartheta_{sr,fluent}$ | $\Delta\vartheta$ |
|--------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| 15 min                   | 27,86             | 27,85                   | 0,01              |
| 20 min                   | 31,75             | 31,73                   | 0,02              |
| 25 min                   | 33,02             | 32,99                   | 0,03              |
| 30 min                   | 28,38             | 28,38                   | 0                 |
| 45 min                   | 40,06             | 40,14                   | -0,08             |
| 53 min                   | 37,23             | 37,33                   | -0,1              |
| 55 min                   | 34,52             | 34,61                   | -0,09             |

Iz rezultata je uočljivo kako se srednje temperature spremnika u svim vremenskim trenucima gotovo poklapaju. Time se dokazuje usporedivost primijenjenih toplinskih tokova u pojedinim slučajevima različitih proračuna. Grafički prikaz rezultata dan je slikom 21.



Slika 21. Grafička usporedba rezultata simulacije i norme spremnika kao jednog volumena

## 10.2. Usporedba rezultata simulacije i proračuna prema normi prEN 15316-5:2021 sa spremnikom podijeljenim na četiri segmenta

Radi usporedbe rezultata računalne simulacije s rezultatima proračuna prema metodi A ove norme, spremnik se podijelio na četiri segmenta. Izmjenjivač solarnog sustava te ulaz hladne vode nalaze se u prvom, dok su pomoćni izmjenjivač te izmjenjivač sustava grijanja smješteni u trećem segmentu. Izlaz potrošne tople vode smješten je u najvišem segmentu spremnika. Navedena podjela te veličine segmenata prikazane su tablicom 6.

Tablica 6. Podjela spremnika na 4 segmenta

| Segment | Volumen [L] | Udio [%] |
|---------|-------------|----------|
| 1.      | 95,84       | 33,8     |
| 2.      | 110,3       | 38,9     |
| 3.      | 37,32       | 13,1     |
| 4.      | 40,245      | 14,2     |

Iako je norma prvenstveno namijenjena za vremenski korak od jednog sata, ona se može primijeniti i za manje korake što je pri ovom proračunu i učinjeno.

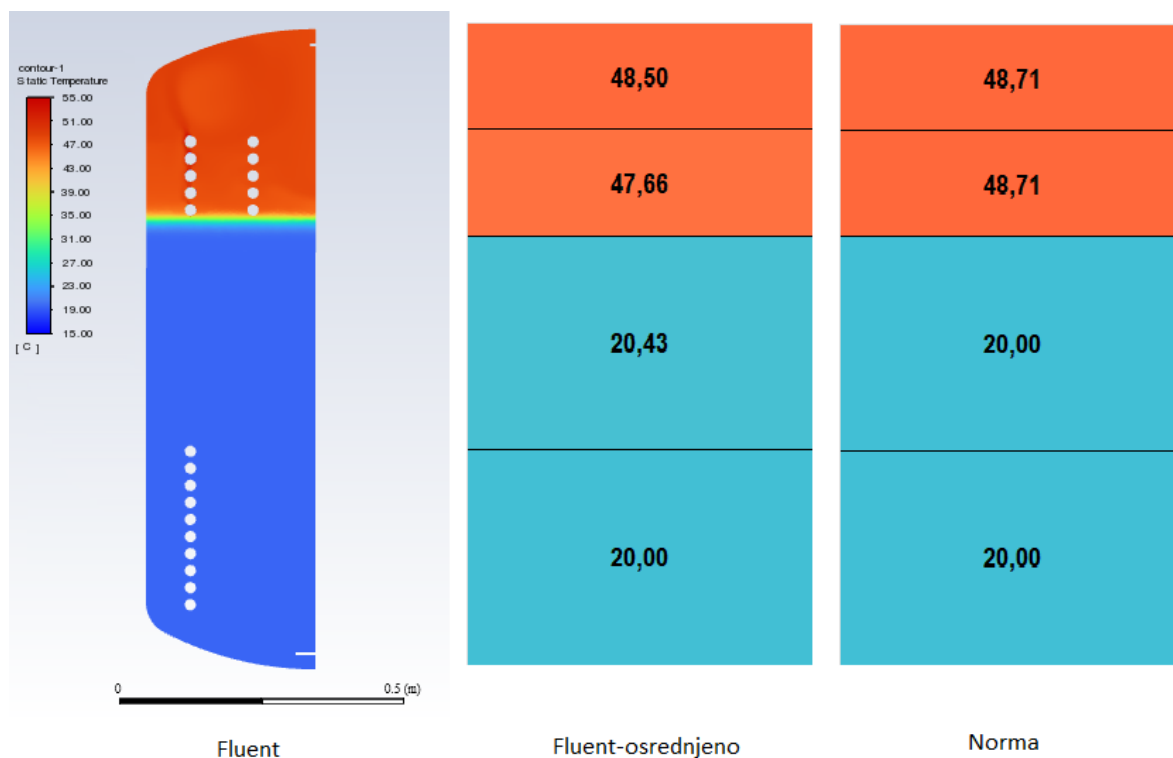
10.2.1. Vremenski korak  $t=15$  min

Prvi vremenski korak koji je simuliran bio je rad pomoćnog grijača snage 10,32 kW u trajanju od 15 minuta. Tablična usporedba rezultata simulacije s rezultatima proračuna prema normi za ovo vremensko razdoblje dana je u nastavku. Temperature iz simulacije dobile su se na način da se domena podijelila u jednake segmente kao i u normi. Zatim se za svaki segment odredila srednja vrijednost temperature po volumenu.

Tablica 7. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=15$  min

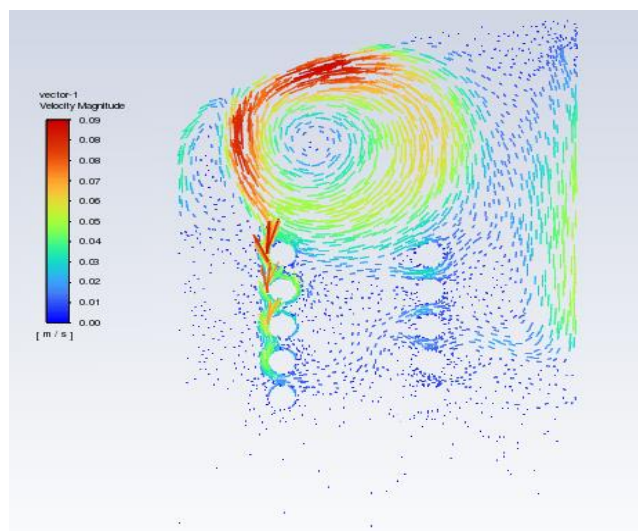
| Segment | $\vartheta_{sto;vol;i}$ | $\vartheta_{sr,fluent;i}$ | $\Delta\vartheta$ |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1.      | 20                      | 20                        | 0                 |
| 2.      | 20                      | 20,427                    | -0,427            |
| 3.      | 48,712                  | 47,658                    | 1,054             |
| 4.      | 48,712                  | 48,5                      | 0,212             |

Slikom 22. prikazana je grafička usporedba rezultata simulacije i norme. Lijevi dio slike predstavlja raspodjelu temperature po visini spremnika dobivenu računalnom simulacijom. Srednji dio slike su osrednjene temperature segmenata također dobivene simulacijom, dok desni dio predstavlja temperature segmenata određene normom.



Slika 22. Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=15$  min

Uočljivo je kako u ovom vremenskom trenutku dolazi do odstupanja u drugom te trećem segmentu spremnika kao posljedice kondukcije topline na granici tih dvaju segmenata. Zbog toga je temperatura prema računalnoj simulaciji u trećem volumenu nešto niža od temperature istog volumena prema normi koja utjecaj kondukcije ne uzima u obzir. Važno je naglasiti kako je sama kondukcija prisutna u uskom području na granici navedenih segmenata zbog čega se način modeliranja iz norme može smatrati zadovoljavajućim. Polje strujanja u vektorskom obliku prikazano je slikom 23.



**Slika 23. Polje strujanja za t=15 min**

Uslijed zagrijavanja čestica vode na stijenci izmjenjivača one postaju lakše te dolazi do njihova gibanja prema vrhu spremnika. Tu dolazi do njihova skretanja, stvaranja vrtloga te gibanja prema nižem dijelu zadnjeg segmenta.

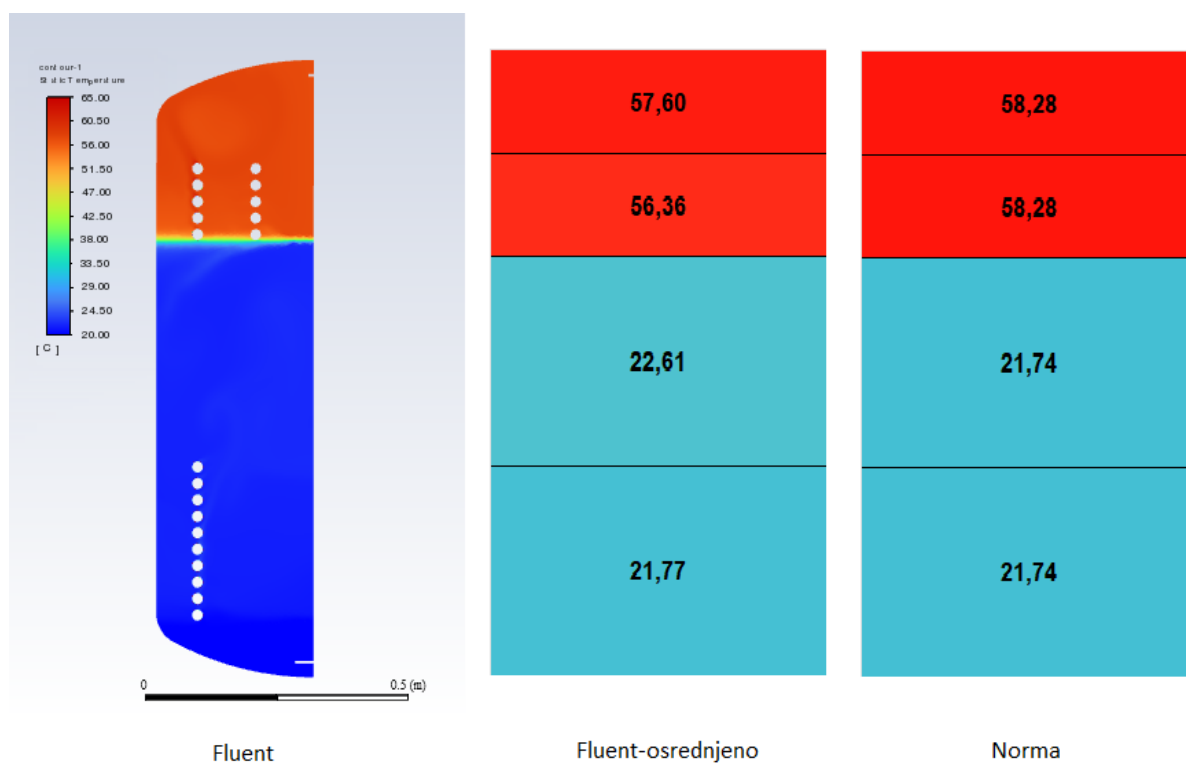
#### 10.2.2. Vremenski korak t=20 min

Nakon 15 minuta rada pomoćnog grijača pali se izmjenjivač solarnog sustava koji je modeliran konstantnim toplinskim tokom od 5 kW. U ovom dijelu simulacije i dalje je radio pomoćni grijač u trajanju od 5 minuta. Usporedba rezultata simulacije i norme za ovaj vremenski trenutak dana je tablicom 8.

**Tablica 8. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=20 min**

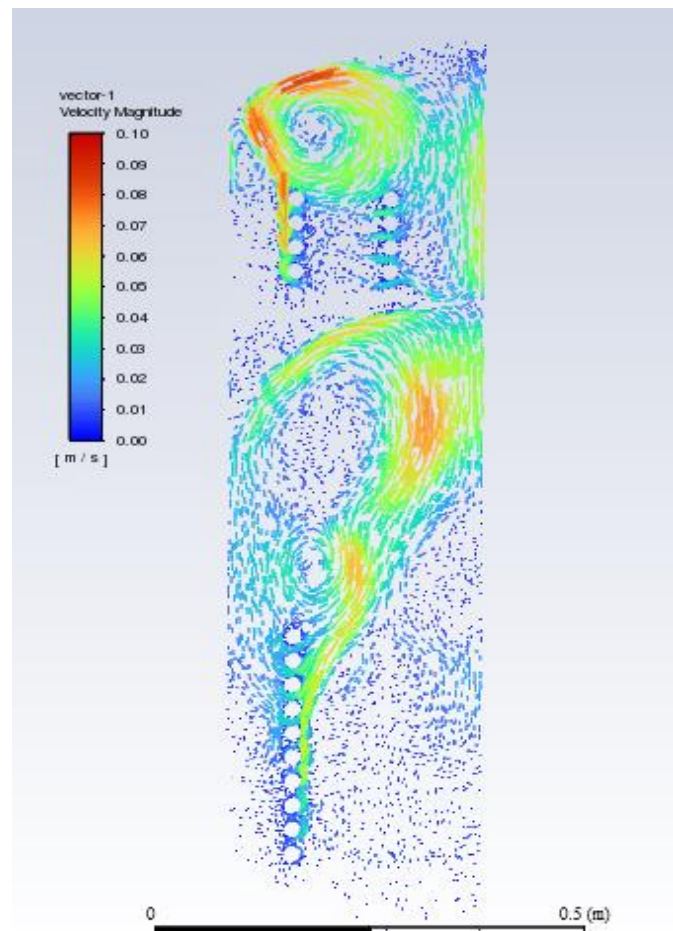
| Segment | $\vartheta_{sto;vol;i}$ | $\vartheta_{sr,fluent;i}$ | $\Delta\vartheta$ |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1.      | 21,74                   | 21,77                     | -0,03             |
| 2.      | 21,74                   | 22,61                     | -0,87             |
| 3.      | 58,28                   | 56,36                     | 1,92              |
| 4.      | 58,28                   | 57,6                      | 0,68              |

Grafički prikaz rezultata dan je slikom 24.



**Slika 24. Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=20$  min**

U ovom vremenskom trenutku najveća odstupanja također se događaju u drugom te trećem segmentu. Glavni razlog tomu i dalje je kondukcija koja uzrokuje hlađenje trećeg, odnosno zagrijavanje drugog segmenta. Polje strujanja vektorski je prikazano slikom 25.



**Slika 25. Polje strujanja za  $t=20$  min**

Polje strujanja u gornjem dijelu spremnika nije se značajnije promijenilo u odnosu na vremenski trenutak  $t=15$  min. U donjem dijelu spremnika zbog rada izmjenjivača solarnog sustava dolazi do prirodne konvekcije te gibanja vode prema višim slojevima. Na granici slojeva različite temperature dolazi do skretanja čestica te stvaranja vrtložnog strujanja prema nižim dijelovima spremnika.



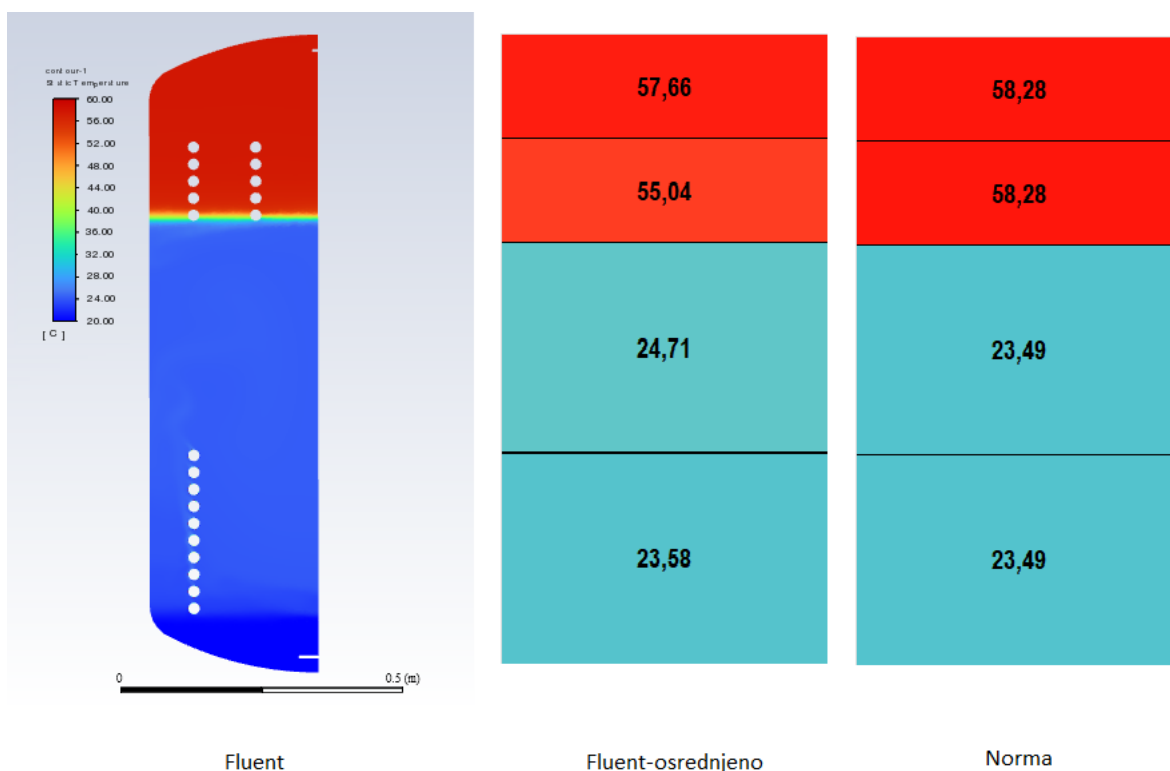
10.2.3. Vremenski korak  $t=25$  min

U 20. minuti gasi se pomoćni grijač, dok izmjenjivač solarnog sustava i dalje radi. Usporedba rezultata simulacije i norme za ovaj vremenski trenutak dana je tablicom 9.

**Tablica 9. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=25$  min**

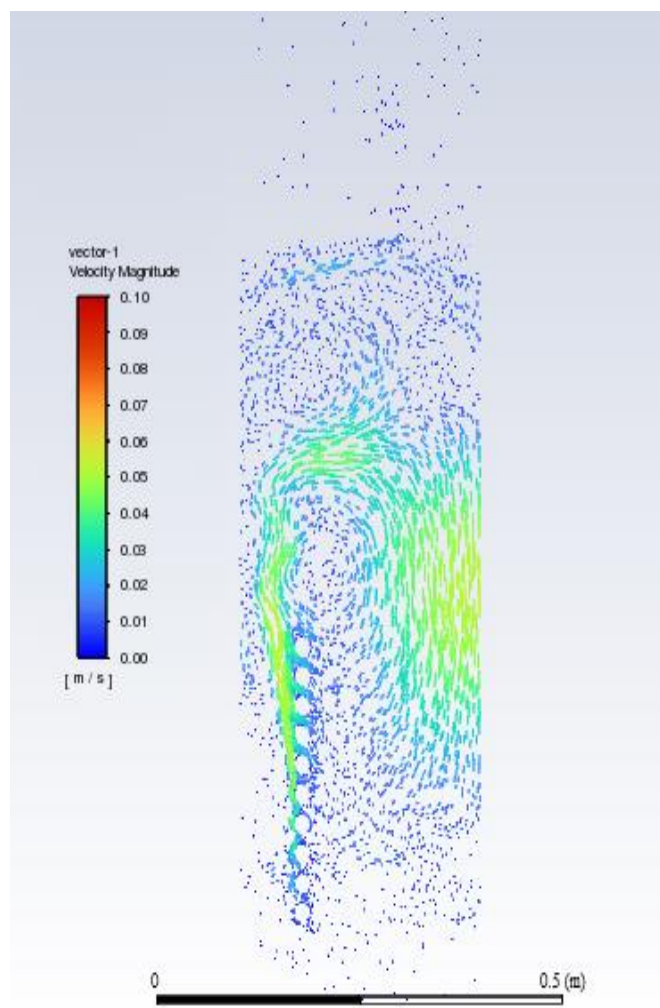
| Segment | $\vartheta_{sto,vol;i}$ | $\vartheta_{sr,fluent;i}$ | $\Delta\vartheta$ |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1.      | 23,486                  | 23,582                    | -0,096            |
| 2.      | 23,486                  | 24,71                     | -1,224            |
| 3.      | 58,283                  | 55,04                     | 3,243             |
| 4.      | 58,283                  | 57,66                     | 0,614             |

Grafički prikaz rezultata dan je slikom 26.



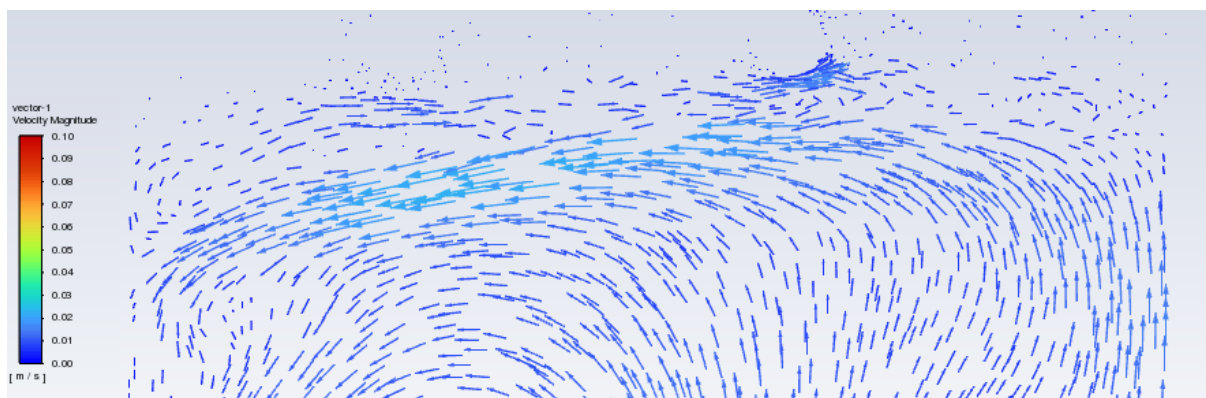
**Slika 26. Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=25$  min**  
 Najveće odstupanje temperatura zabilježeno je u trećem segmentu, a razlog tomu jest izmjena topline slobodnom konvekcijom, odnosno miješanja vode iz segmenata 1 i 2 sa segmentom 3. Zbog tog razloga su temperature segmenata 1 i 2 te 3 niže od onih izračunatih pomoću norme. Navedeno miješanje može se opaziti i u prethodnim simulacijama kao na slici 18. Taj se efekt miješanja ne uzima u obzir pri proračunu opisanom u normi. U najnižem dijelu spremnika u

kojem je smješten izmjenjivač topline solarnog sustava uočava se područje niže temperature ispod samog izmjenjivača. Polje strujanja vektorski je prikazano slikom 27.



**Slika 27. Polje strujanja za  $t=25$  min**

Iz slike polja strujanja vidljivo je nastajanje vrtložnog strujanja koje se u odnosu na prethodni vremenski trenutak pomiče prema nižim slojevima spremnika. Strujanje u donjim segmentima postaje izraženije čime se ti dijelovi spremnika zagrijavaju.



**Slika 28. Polje strujanja na granici 2. i 3. segmenta**

Slikom 28. uvećano je prikazano polje strujanja na granici 2. i 3. segmenta. Vidljivo je kako voda iz nižih slojeva niže temperature struji do granice koja ju razdvaja od vode više temperature gornjih slojeva. U ovom području dolazi do skretanja strujanja te jedan dio vode struji prema nižim dijelovima dok drugi dio stvara vrtlog na granici dvaju slojeva čime dolazi do njihova mješanja i posljedično prijenosa topline.

**10.2.4. Vremenski korak  $t=30$  min**

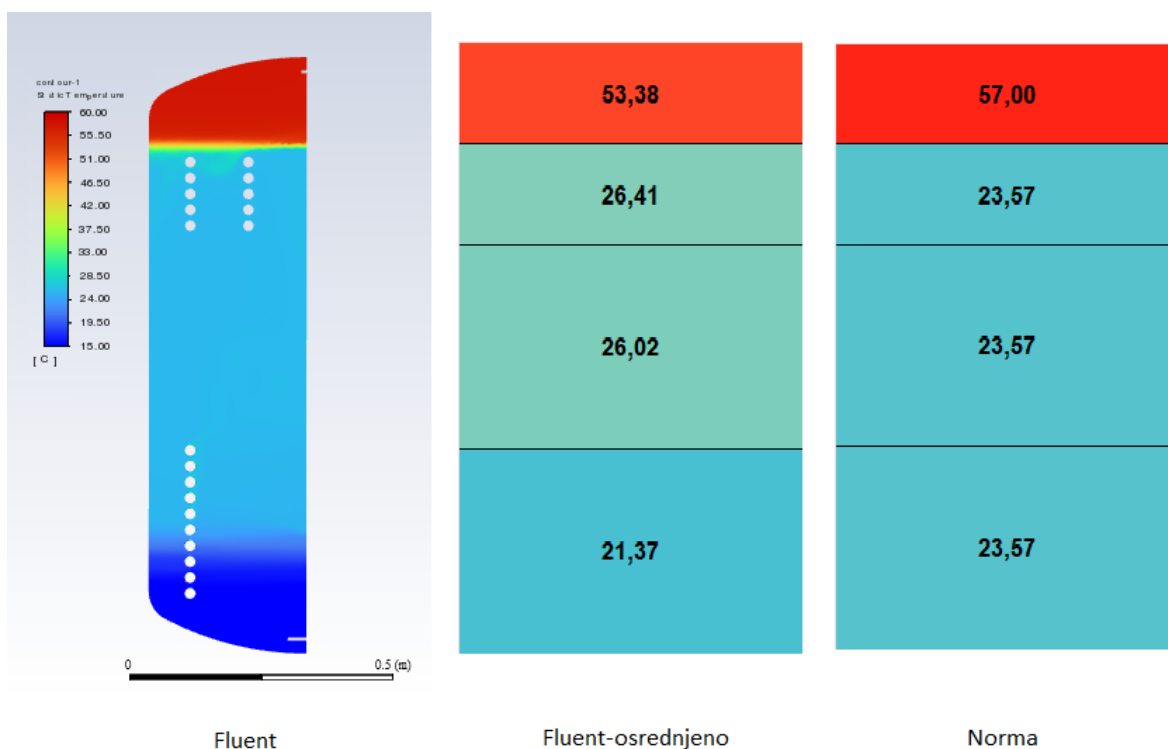
U 25. minuti počinje simulacija potrošnje PTV-a protokom od 8 l/min (0.133 kg/s) u trajanju od 5 minuta. U ovom vremenskom koraku i dalje u radu ostaje izmjenjivač solarnog sustava.

Usporedbu rezultata simulacije i norme za ovaj vremenski trenutak daje Tablica 10.

**Tablica 10. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=30$  min**

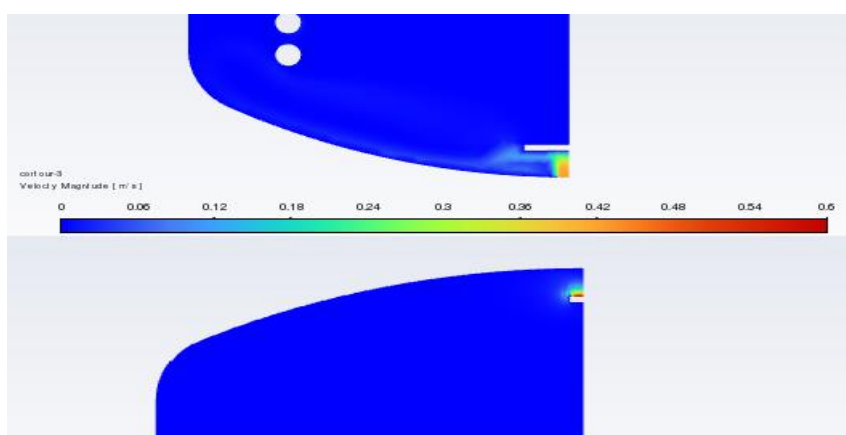
| Segment | $\vartheta_{sto;vol;i}$ | $\vartheta_{sr,fluent;i}$ | $\Delta\vartheta$ |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1.      | 23,565                  | 21,374                    | 2,191             |
| 2.      | 23,565                  | 26,02                     | -2,455            |
| 3.      | 23,565                  | 26,41                     | -2,845            |
| 4.      | 57,003                  | 53,38                     | 3,623             |

Grafički prikaz rezultata dan je slikom 29.



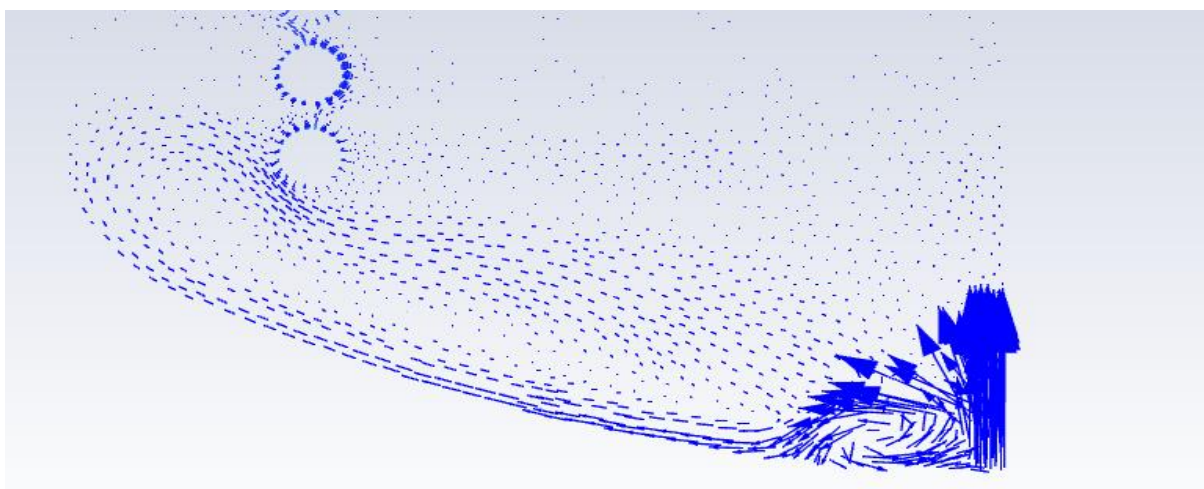
**Slika 29. Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=30$  min**

Analizom rezultata uočljivo je kako u sva četiri segmenta spremnika dolazi do odstupanja rezultata proračuna prema normi s rezultatima računalne simulacije. Proračunom prema normi prva tri segmenta postaju jednake temperature što nije u skladu sa simulacijom gdje se ispod solarnog izmjenjivača, a zbog utjecanja svježije hladne vode uočava hladnije područje. Ovi rezultati ukazuju na moguću potrebu podijele spremnika na 5 segmenata pri proračunu normom gdje bi 5 segment bio upravo taj ispod solarnog izmjenjivača u kojem ne dolazi do zagrijanja vode. Kako je gradijent brzine na ulazu i izlazu spremnika velik konture tih brzina prikazane su detaljima prema slici 30.



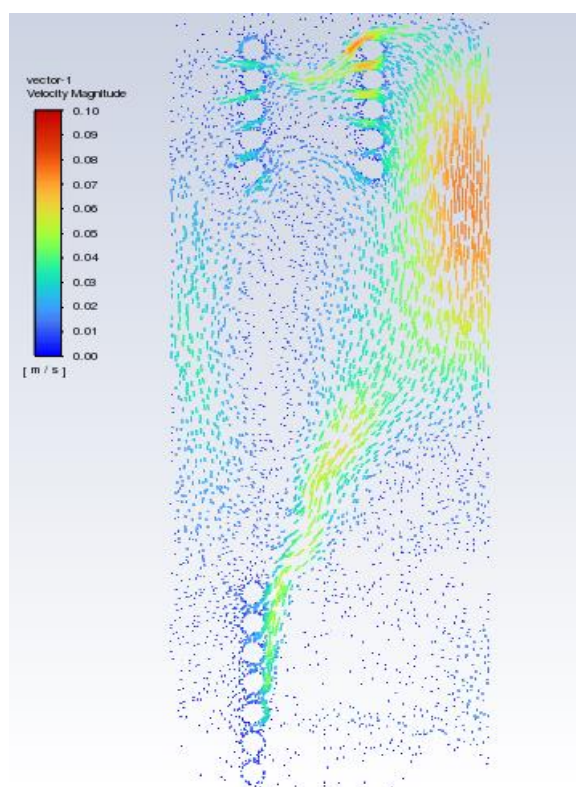
**Slika 30. Brzine na ulazu/izlazu iz domene**

Vektorski prikaz polja strujanja u najnižem segmentu spremnika prikazan je slikom 31. Iz nje se vidi kako svježja voda zbog skretača mlaza ne prodire u više dijelove spremnika. Nakon skretanja dolazi do strujanja uz stijenku spremnika do sloja vode koji je više temperature. U tom području dolazi do novog zakretanja mlaza te povratnog strujanja prema središnjoj osi spremnika.



**Slika 31. Slika strujanja u najnižem segmentu spremnika za  $t=30$  min**

Polje strujanja u gornjim dijelovima spremnika prikazuje Slika 32.



**Slika 32. Polje strujanja za t=30 min**

U 30 minuti simulacije strujanje vode i dalje je pobuđeno uzgonskim silama uslijed zagrijavanja čestica vode na solarnom izmjenjivaču. Voda struji prema višim slojevima spremnika, prolazi između pomoćnog grijača te izmjenjivača sustava grijanja te potom skreće i struji prema nižim slojevima.

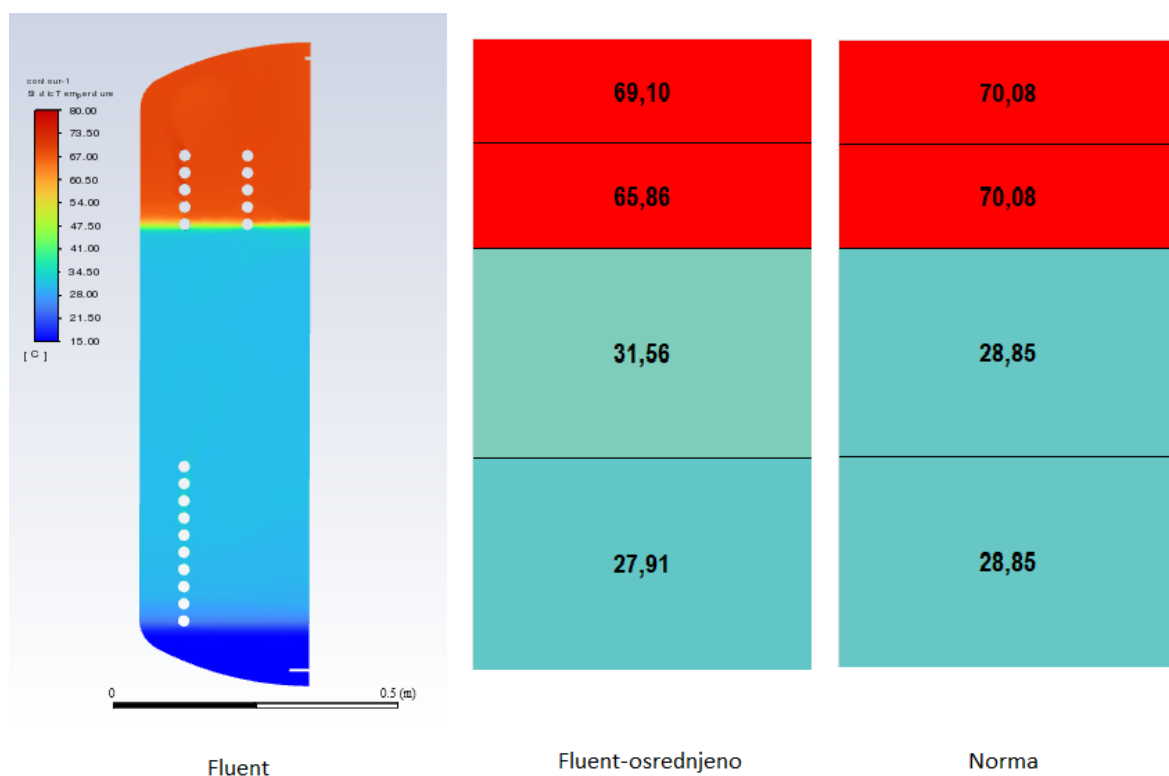
#### 10.2.5. Vremenski korak t=45 min

U 30. minuti prestaje potrošnja tople vode te se pali pomoćni grijač uz kojeg i dalje radi izmjenjivač solarnog sustava. Ovakav režim rada spremnika simulirao se 15 minuta. Tablična usporedba rezultata dana je u nastavku.

**Tablica 11. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=45 min**

| Segment | $\vartheta_{sto;vol;i}$ | $\vartheta_{sr,fluent;i}$ | $\Delta\vartheta$ |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1.      | 28,85                   | 27,91                     | 0,94              |
| 2.      | 28,85                   | 31,56                     | -2,71             |
| 3.      | 70,08                   | 65,86                     | 4,22              |
| 4.      | 70,08                   | 69,1                      | 0,98              |

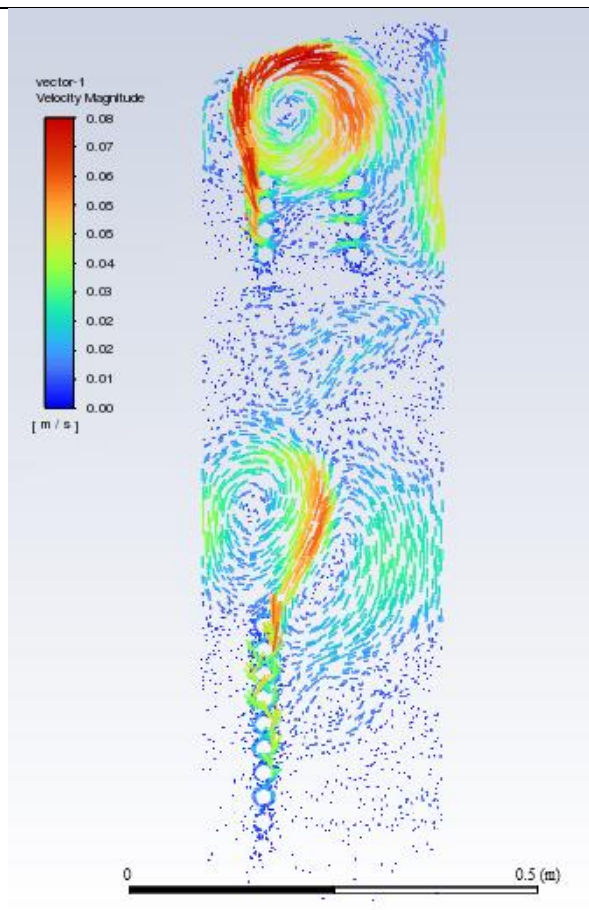
Grafički prikaz rezultata dan je slikom 33.



**Slika 33. Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=45 min**

U ovom vremenskom trenutku najveće odstupanje događa se u trećem segmentu spremnika. Razlog tomu je konvekcija sloja 2 sa slojem 3, čime sloj 2 ima višu temperaturu od one proračunate normom dok sloj 3 ima nižu. Polje strujanja prikazano je slikom 34. Iz njega se vidi kako je u gornjem dijelu spremnika obilježeno stvaranjem vrtloga uslijed rada pomoćnog grijača kao što je to bio slučaj i u prethodnim vremenskim trenucima kada je grijač radio. U nižim dijelovima spremnika ponovo se vidi utjecaj prirodne konvekcije na strujanje vode pri čemu dolazi strujanja prema višim slojevima, vrtloženja te povratnog strujanja prema nižim dijelovima spremnika.



Slika 34. Polje strujanja za  $t=45$  min

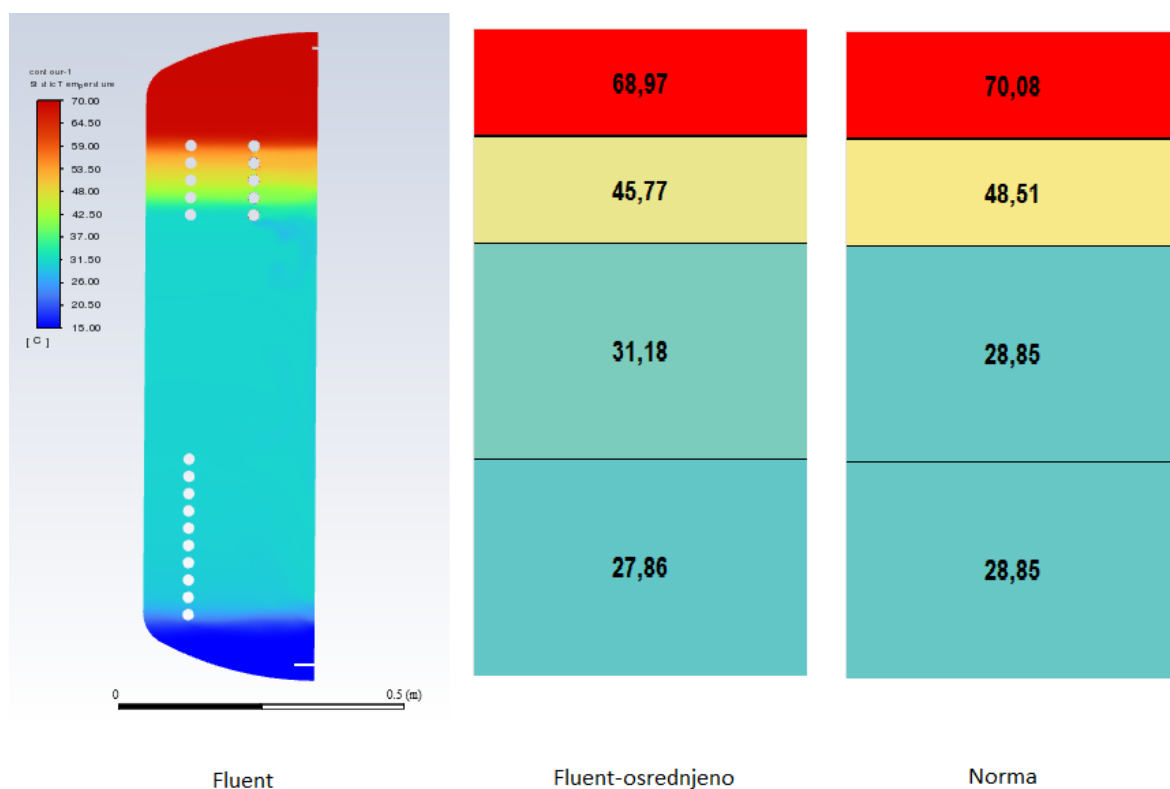
#### 10.2.6. Vremenski korak $t=53$ min

U 45. minuti gase se pomoćni grijač te izmjenjivač topline solarnog sustava, a pali se izmjenjivač koji služi za grijanje prostora. On je modeliran konstantnim toplinskim tokom od 7 kW koji se od spremnika odvodi, a smješten je u trećem segmentu spremnika. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi u ovom vremenskom koraku prikazana je tablicom 12.

Tablica 12. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=53$  min

| Segment | $\vartheta_{sto;vol;i}$ | $\vartheta_{sr.fluent;i}$ | $\Delta\vartheta$ |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1.      | 28,85                   | 27,86                     | 0,99              |
| 2.      | 28,85                   | 31,18                     | -2,33             |
| 3.      | 48,51                   | 45,76                     | 2,75              |
| 4.      | 70,08                   | 68,97                     | 1,11              |

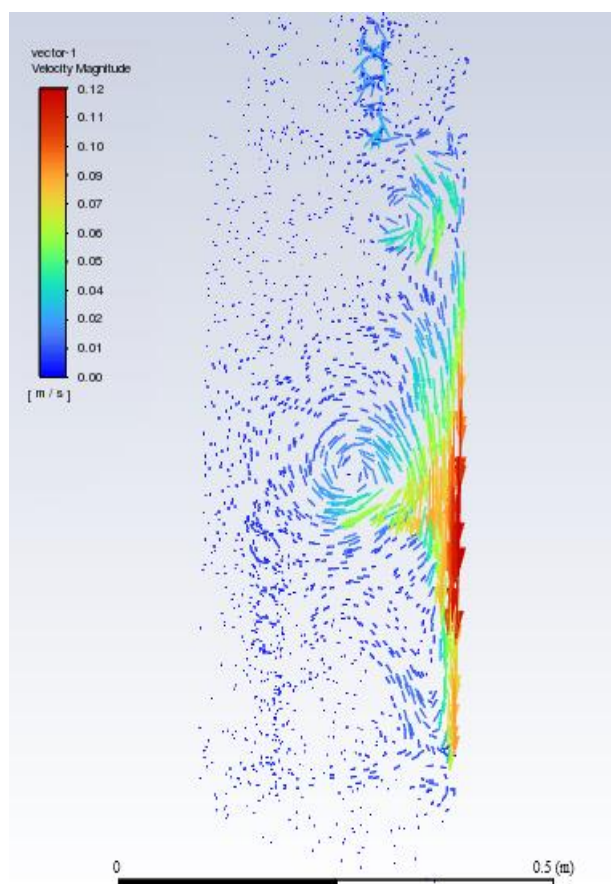
Grafički prikaz rezultata dan je slikom 35.



Slika 35. Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=53$  min

U ovom režimu rada spremnika najveća odstupanja javljaju se u drugom te trećem segmentu, dok se manja odstupanja bilježe u najnižem i najvišem dijelu spremnika. Polje strujanja vektorski je prikazano slikom 36. Iz nje je vidljivo kako odvođenjem toplinskog toka na izmjenjivaču sustava grijanja dolazi do hlađenja vode u najnižem dijelu tog segmenta. Posljedično uspostavlja se strujanje vode prema nižim slojevima spremnika u kojima potom dolazi do stvaranja vrtloga.





Slika 36. Polje strujanja za t=53 min

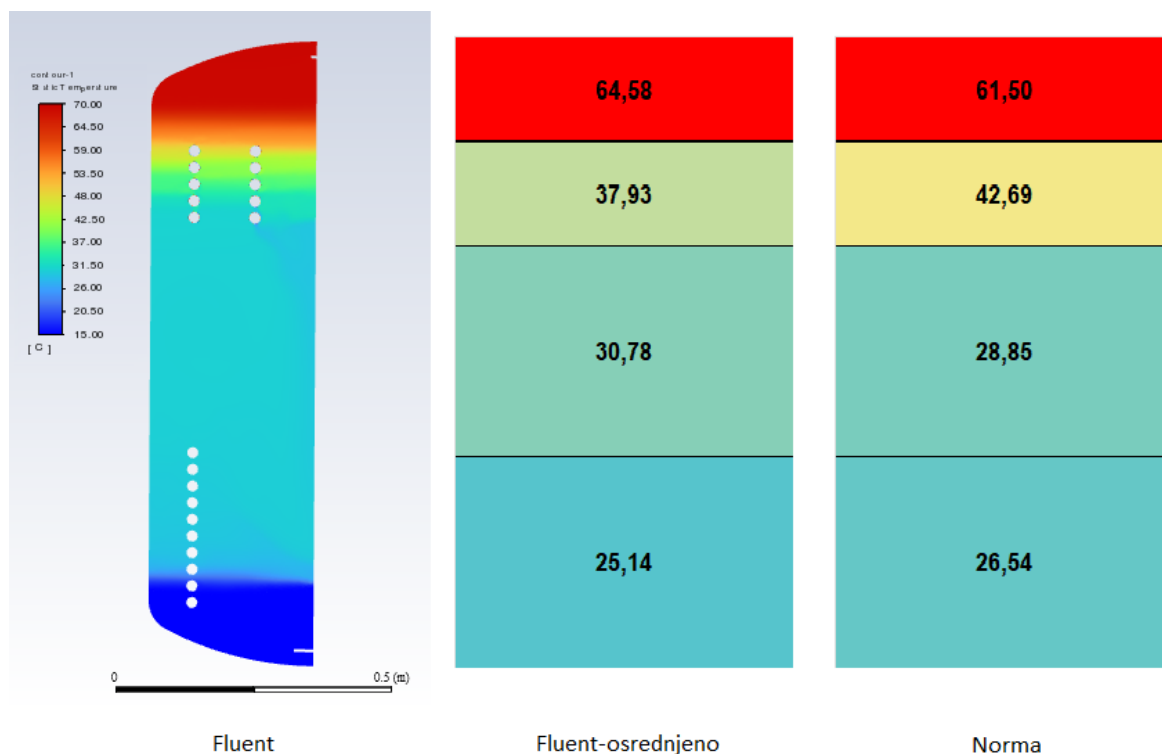
### 10.2.7. Vremenski korak t=55 min

U 53. minuti simulacije radi pada temperature vode u dijelu spremnika u kojem je smješten izmjenjivač sustava grijanja pali se pomoćni grijač. Uz to simulira simulirana se i potrošnja tople vode protokom od 8 l/min. Trajanje ovog dijela simulacije iznosilo je 2 minute. Usporedba rezultata simulacije te norme prikazana je tablicom 13.

Tablica 13. Usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za t=55 min

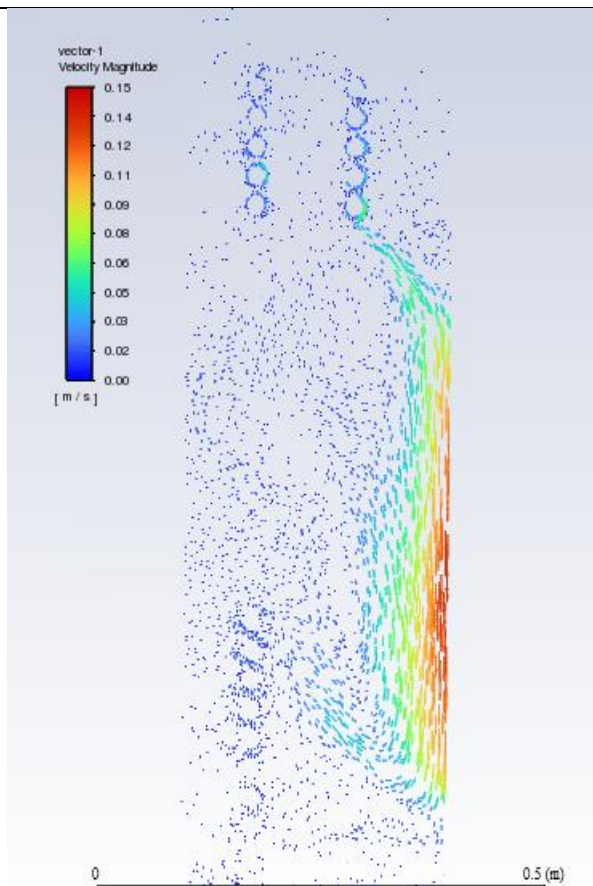
| Segment | $\vartheta_{sto;vol;i}$ | $\vartheta_{sr,fluent;i}$ | $\Delta\vartheta$ |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1.      | 26,54                   | 25,14                     | 1,4               |
| 2.      | 28,85                   | 30,78                     | -1,93             |
| 3.      | 42,69                   | 37,93                     | 4,76              |
| 4.      | 61,51                   | 64,58                     | -3,07             |

Grafički prikaz rezultata predočava slika 37.



**Slika 37. Grafička usporedba rezultata simulacije s rezultatima prema normi za  $t=55$  min**

Polje strujanja za ovaj režim rada sustava prikazuje slika 38. Uočava se kako se u najnižem dijelu trećeg segmenta unatoč radu pomoćnog grijača i dalje odvija hlađenje vode. Čestice vode postaju niže temperature od čestica u sloju ispod zbog čega se odvija njihovo strujanje prema nižim slojevima spremnika. Slika strujanja na ulazu u domenu približno je jednaka strujanju prikazanom slikom 31.

Slika 38. Polje strujanja za  $t=55$  min

### 10.3. Usporedba rezultata simulacije i proračuna prema normi prEN 15316-5:2021 sa spremnikom podijeljenim na pet volumena

Zbog toga što se voda ispod solarnog izmjenjivača značajno ne zagrijava, provedena je dodatna usporedba rezultata simulacije s rezultatima proračuna prema normi u kojem je spremnik podijeljen 5 volumena. Time se nastojalo ispitati dobiva li se veće podudaranje s rezultatima simulacije u odnosu na slučaj s četiri volumena. Peti je volumen smješten ispod samog izmjenjivača solarnog sustava. Navedena podjela te veličine segmenata prikazane su tablicom 14.

Tablica 14. Podjela spremnika na 5 segmenata

| Segment | Volumen [L] | Udio [%] |
|---------|-------------|----------|
| 1.      | 17,219      | 6,07     |
| 2.      | 78,62       | 27,71    |
| 3.      | 110,3       | 38,88    |
| 4.      | 37,32       | 13,15    |
| 5.      | 40,245      | 14,19    |

Rezultati te usporedba proračuna te simulacije prikazani su tablicom 15.

**Tablica 15. Usporedba rezultata simulacije i norme sa spremnikom podijeljenim na 5 volumena**

|         | t=15 min                |                           |                   |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| Segment | $\vartheta_{sto,vol;i}$ | $\vartheta_{sr,fluent;i}$ | $\Delta\vartheta$ |
| 1.      | 20                      | 20                        | 0                 |
| 2.      | 20                      | 20                        | 0                 |
| 3.      | 20                      | 20,43                     | -0,43             |
| 4.      | 48,71                   | 47,66                     | 1,05              |
| 5.      | 48,71                   | 48,5                      | 0,21              |
|         | t=20 min                |                           |                   |
| 1.      | 20                      | 20,17                     | -0,17             |
| 2.      | 21,9                    | 22,12                     | -0,22             |
| 3.      | 21,9                    | 22,61                     | -0,71             |
| 4.      | 58,28                   | 56,36                     | 1,92              |
| 5.      | 58,28                   | 57,6                      | 0,68              |
|         | t=25 min                |                           |                   |
| 1.      | 20                      | 20,36                     | -0,36             |
| 2.      | 23,8                    | 24,29                     | -0,49             |
| 3.      | 23,8                    | 24,71                     | -0,91             |
| 4.      | 58,28                   | 55,04                     | 3,24              |
| 5.      | 58,28                   | 57,67                     | 0,61              |
|         | t=30 min                |                           |                   |
| 1.      | 15                      | 15,17                     | -0,17             |
| 2.      | 24,22                   | 22,73                     | 1,49              |
| 3.      | 24,22                   | 26,02                     | -1,8              |
| 4.      | 24,22                   | 26,41                     | -2,19             |

|           |          |       |       |
|-----------|----------|-------|-------|
| <b>5.</b> | 57,01    | 53,38 | 3,63  |
|           | t=45 min |       |       |
| <b>1.</b> | 15       | 16,02 | -1,02 |
| <b>2.</b> | 29,98    | 30,52 | -0,54 |
| <b>3.</b> | 29,98    | 31,56 | -1,58 |
| <b>4.</b> | 70,4     | 65,86 | 4,54  |
| <b>5.</b> | 70,4     | 69,1  | 0,7   |
|           | t=53 min |       |       |
| <b>1.</b> | 15       | 16,61 | -1,61 |
| <b>2.</b> | 29,98    | 30,32 | -0,34 |
| <b>3.</b> | 29,98    | 31,18 | -1,2  |
| <b>4.</b> | 48,83    | 45,77 | 3,06  |
| <b>5.</b> | 70,4     | 68,99 | 1,41  |
|           | t=55 min |       |       |
| <b>1.</b> | 15       | 15,17 | -0,17 |
| <b>2.</b> | 26,93    | 27,33 | -0,4  |
| <b>3.</b> | 29,98    | 30,78 | -0,8  |
| <b>4.</b> | 43,36    | 37,93 | 5,43  |
| <b>5.</b> | 61,82    | 64,58 | -2,76 |

U odnosu na spremnik podijeljen na četiri dijela, rezultati prema normi bliži su simulacijama u nižim segmentima, dok je ta razlika u višim segmentima u pojedinim vremenskim trenucima izraženija.

## 11. STUPANJ DJELOVANJA KOLEKTORA

Glavni cilj ovog istraživanja je ocijeniti utjecaj rezultata simulacija i proračuna na toplinsku učinkovitost solarnog kolektora u promatranom vremenskom periodu. U ovom su dijelu izračunate učinkovitosti kolektora pomoću vrijednosti temperature segmenta u kojem je smješten izmjenjivač solarnog sustava pri čemu je spremnik bio podijeljen na četiri te pet dijelova. Te su vrijednosti potom uspoređene s vrijednošću učinkovitosti kolektora dobivenih koristeći temperaturu promatranog segmenta dobivenu računalnom simulacijom. Vremenski period za koji je učinkovitost izračunata obuhvaća razdoblje od 15. do 45. minute prema tablici 4. u kojem je radio solarni izmjenjivač. Ulazna temperatura u solarni krug računala se prema slijedećem izrazu:

$$\vartheta_{sol;loop;in} = \max\left(\vartheta_{sol;mn} - \frac{Q_{H;sto;sol;in;vol,1}}{\dot{m}_{sol} \cdot c_w}; \vartheta_{sto;vol,1}\right) \quad (47)$$

gdje  $Q_{H;sto;sol;in;vol,1}$  predstavlja toplinski tok doveden solarnim kolektorom u spremnik, dok  $\vartheta_{sol;mn}$  predstavlja srednju temperaturu radne tvari u izmjenjivaču. Ona se računa na slijedeći način:

$$\vartheta_{sol;mn} = \vartheta_{sto;vol,1} + \Delta\vartheta_{exh} \quad (48)$$

Prva vrijednost desne strane jednadžbe jest temperatura vode u promatranom segmentu, a druga vrijednost je pad temperature radnog medija kroz izmjenjivač koji se određuje kako slijedi:

$$\Delta\vartheta_{exh} = \frac{Q_{H;sto;sol;in;vol,1} \cdot 1000}{H_{exh;sol} \cdot t_{ci}} \quad (49)$$

Koeficijent prijelaza topline  $H_{exh;sol}$  pretpostavljen je te iznosi 1000 W/K. Učinkovitost kolektora računala se prema izrazu:

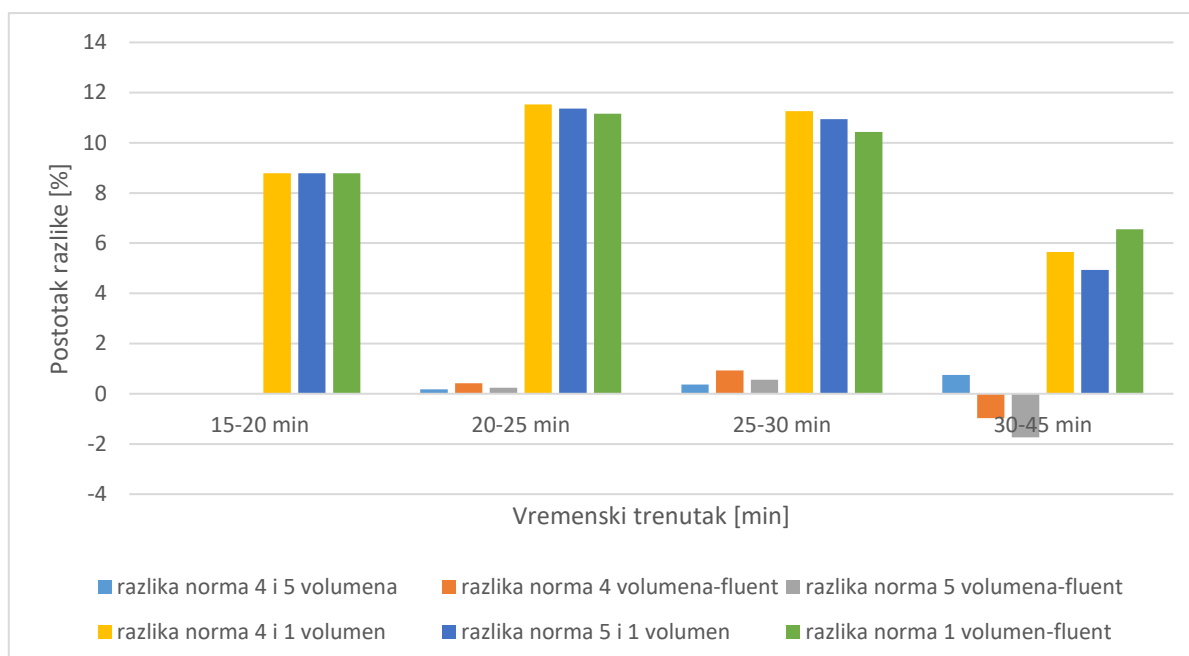
$$\eta_{kol} = 0,795 - 3,675 \frac{\vartheta_{sol,mn} - \vartheta_z}{I_{sun}} - 0,007 \frac{(\vartheta_{sol,mn} - \vartheta_z)^2}{I_{sun}} \quad (50)$$

Srednja temperatura zraka  $\vartheta_z$  u proračunu je uzeta kao 16 °C, dok je upadno sunčevo zračenje na nagnutu plohu iznosilo 476 W/m<sup>2</sup>. U tablici 16. prikazane su usporedbe učinkovitosti kolektora izračunate pomoću norme i simulacije na opisani način.

Tablica 16. Učinkovitost kolektora

| Vremenski trenutak | Norma – 1 Segment | Norma – 4 Segmenta | Norma – 5 Segmenta | Fluent |
|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------|
| 15-20 min          | 0,6607            | 0,7243             | 0,7243             | 0,7243 |
| 20-25 min          | 0,6285            | 0,7104             | 0,7091             | 0,7074 |
| 25-30 min          | 0,6179            | 0,6963             | 0,6937             | 0,6898 |
| 30-45 min          | 0,6564            | 0,6957             | 0,6904             | 0,7024 |

Prikaz odstupanja učinkovitosti u postotcima izračunatih na opisani način grafički prikazuje Slika 39.



Slika 39. Odstupanje učinkovitosti

Najveće odstupanje izračunatih učinkovitosti iznosi 11,53 % u vremenskom periodu između 20 i 25. minute. Ono se odnosi na vrijednost izračunatu pomoću norme u kojoj je spremnik bio promatran kao jedan segment te vrijednost određenu normom u kojoj je spremnik podijeljen na 4 segmenta. Može se uočiti kako učinkovitost izračunata normom u kojoj je spremnik promatran kao jedan segment znatno odudara od ostalih izračunatih učinkovitosti. Time de dolazi do zaključka kako taj način određivanja učinkovitosti nije ispravan. Rezultati dobiveni na ostale prikazane način uglavnom se poklapaju. Treba napomenuti kako bi izračunata odstupanja bila veća za veće vrijednosti kvocijenta razlike srednje temperature fluida u kolektoru i temperature okoline s vrijednošću upadnog sunčevog zračenja.

## 12. ZAKLJUČAK

U ovom radu modelirana je izmjena topline u solarnom spremniku. Dinamičke simulacije provele su se u računalnom programu ANSYS Fluent. Definirana je geometrija spremnika, izrađena mreža kontrolnih volumena te provedena simulacija nakon što su se definirali svi modeli potrebni za njeno odvijanje.

Rezultati računalne simulacije iskorišteni su za analizu utjecaja provođenja topline i slobodne konvekcije na temperaturnu raspodjelu u spremniku. Način rada spremnika pri kojima su se ovi utjecaji analizirali definiran je tablicom 3. Iz rezultata simulacije vidljivo je kako pri radu pomoćnog grijača, uslijed odvijanja prirodne konvekcije dolazi do progrijavanja gornjeg dijela spremnika u kojem je grijač smješten. Nakon 15 minuta takvog rada temperatura u gornjem dijelu spremnika dostiže maksimalnu temperaturu od 66 °C, a maksimalna razlika temperatura iznosi 2 °C. Utjecaj kondukcije analizirao se režimom rada u kojem u spremniku nije radio niti jedan izmjenjivač topline. Ovakvo stanje simuliralo se 75 minuta. Iz rezultata simulacije uočava se kako je utjecaj kondukcije vidljiv na granici zagrijanog i hladnog dijela spremnika, no on nije izražen. Toplinski tok koji se kondukcijom odvodi od gornjih slojeva ne uzrokuje značajno povećanje temperature nižih dijelova spremnika. Utjecaj prirodne konvekcije u nižim dijelovima spremnika analizirao se simuliranjem rada solarnog izmjenjivača topline u trajanju od 60 min. Dijelovi spremnika u razini i iznad izmjenjivača pod njenim utjecajem se zagrijavaju dok se dio spremnika ispod izmjenjivača značajno ne zagrijava. Analizom rezultata uočava se kako dolazi do mješanja zagrijane vode iz nižih dijelova s vodom više temperature iz gornjih dijelova spremnika te stvaranja područja jednolike temperature.

U drugom je dijelu rada provedena simulacija s drugačijim režimima rada kako to prikazuje tablica 4. Ovi su rezultati potom uspoređeni s rezultatima proračuna temperaturne raspodjele u spremniku prema normi prEN 15316-5:2021 pri čemu je spremnik bio podijeljen na jedan, četiri te pet segmenata. U slučaju u kojem je spremnik bio promatran kao jedan segment, temperature određene normom te simulacijom gotovo se poklapaju. Pri proračunu spremnika podijeljenog na četiri segmenta uočavaju se razlike temperatura koje su najznačajnije u drugom te trećem segmentu spremnika. Razlozi ovakvih odstupanja su što norma ne uzima u obzir kondukciju te to što prirodna konvekcija iz dijela spremnika u kojem je smješten solarni izmjenjivač često utječe ne samo na volumen direktno iznad već i na više dijelove spremnika. Proračun proveden s podjelom spremnika na pet segmenata daje bolje poklapanje rezultata u nižim dijelovima spremnika, ali u višim dijelovima se u nekim trenucima događaju veće razlike nego u spremniku podijeljenom na četiri segmenta.



U zadnjem je dijelu rada ocijenjen utjecaj rezultata simulacija i proračuna na toplinsku učinkovitost solarnog kolektora u vremenskom razdoblju od 30 minuta. Iz rezultata je vidljivo kako izračunate učinkovitosti vrijednostima temperature određenih normom u kojima je spremnik promatran kao jedan segment znatno odudaraju od ostalih određenih rezultata. Najveće odstupanje iznosi 11,53 %, a odnosi se na učinkovitosti izračunate pomoću norme sa spremnicima podijeljenim na 1 te 4 segmenata u vremenskom trenutku između 20 i 25 minute.

---

**LITERATURA**

- [1] <https://www.fzoeu.hr/hr/obnovljivi-izvori-energije/7573> (pristupljeno 22.3.2022.)
- [2] <https://www.eizg.hr/userdocsimages/publikacije/serijske-publikacije/sektorske-analize/SA-Energetika-2021.pdf?vel=1946369> (pristupljeno 22.3.2022.)
- [3] <https://mpgi.gov.hr/o-ministarstvu/djelokrug/energetska-ucinkovitost-u-zgradarstvu/zgrade-gotovo-nulte-energije-nzeb/10504>
- [4] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=58784> (pristupljeno 22.3.2022.)
- [5] Dović, D.: Obnovljivi izvori energije, Uporaba sunčeve energije u termotehničkim sustavima, Zagreb, 2012.
- [6] Katalozi proizvođača : Horvatić, Buderus, Viesmann, Wolf, GreenOneTec, Centrometal, Vaillant: 1997-2009.
- [7] Virag Z., Šavar M., Džijan I.; Mehanika fluida 2: predavanja, FSB, Zagreb 2017.
- [8] Galović A.; Termodinamika 2, FSB,Zagreb 2014.
- [9] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node66.htm> (pristupljeno 5.4.2022)
- [10] Džijan I. : Računalna dinamika fluida – predavanja, FSB, Zagreb, 2010.
- [11] [https://imechanica.org/files/fluent\\_13.0\\_lecture05-solver-settings.pdf](https://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture05-solver-settings.pdf)
- [12] Norma pr-EN 15316-5:2021
- [13] CEN-CE, EN 15316-5

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc