

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Mateo Kirinčić

**EKSPERIMENTALNA I NUMERIČKA  
ANALIZA POVEĆANJA UČINKOVITOSTI  
LATENTNOG SPREMNIKA TOPLINE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2021.



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Mateo Kirinčić

**EKSPERIMENTALNA I NUMERIČKA  
ANALIZA POVEĆANJA UČINKOVITOSTI  
LATENTNOG SPREMNIKA TOPLINE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentorica: Prof. dr. sc. Anica Trp

Rijeka, 2021.

UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF ENGINEERING

Mateo Kirinčić

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL  
ANALYSIS OF THE LATENT THERMAL  
ENERGY STORAGE PERFORMANCE  
ENHANCEMENT**

DOCTORAL DISSERTATION

Rijeka, 2021.

Mentorica rada: Prof. dr. sc. Anica Trp

Doktorska disertacija obranjena je dana \_\_\_\_\_ na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Kristian Lenić, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
2. Doc. dr. sc. Paolo Blecich, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
3. Izv. prof. dr. sc. Uroš Stritih, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



## SAŽETAK

U doktorskoj disertaciji provedena je eksperimentalna i numerička analiza izmjene topline pri spremanju i korištenju topline iz latentnog spremnika topline u svrhu povećanja njegove učinkovitosti. Razmatrani latentni spremnik topline izmjenjivač je topline konfiguracije snopa cijevi u plaštu s uzdužnim lamelama na vanjskoj strani svake cijevi, koji kao akumulator topline koristi parafin RT 25, smješten oko cijevi, a kao fluid prijenosnik topline vodu, koja struji kroz cijevi. U svrhu provođenja eksperimentalnog istraživanja, konstruiran je eksperimentalni latentni spremnik topline te je uspostavljena ispitna linija. Proveden je niz eksperimentalnih mjerenja vremenskih promjena temperatura parafina unutar spremnika te temperatura vode na ulazu i izlazu iz spremnika prilikom procesa spremanja i korištenja topline za različite pogonske uvjete. Za fizikalni problem izmjene topline unutar latentnog spremnika topline, definirana je domena numeričkog proračuna za koju je postavljen odgovarajući matematički model. Opisan je jednačinama očuvanja mase, količine gibanja i energije te odgovarajućim početnim i rubnim uvjetima, matematički model opisuje nestacionarni problem strujanja i izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja prema entalpijskoj metodi. Rješavanje postavljenog matematičkog modela izvršeno je numeričkim putem, korištenjem metode kontrolnih volumena i računalnog programa za numeričko rješavanje Ansys Fluent. Postojeći numerički postupak nadograđen je nizom napisanih korisničkih funkcija kako bi se omogućio numerički proračun izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline s malom toplinskom vodljivošću. U svrhu provjere valjanosti matematičkog modela i numeričkog postupka, provedena je usporedba numeričkih rezultata s rezultatima eksperimentalnih istraživanja te je utvrđeno dobro poklapanje. Istražen je utjecaj slobodne konvekcije unutar kapljevite faze akumulatora topline na izmjenu topline prilikom taljenja, odnosno skrućivanja akumulatora topline. Daljnjim numeričkim analizama procesa spremanja i korištenja toplinske energije iz latentnog spremnika topline istražen je utjecaj različitih geometrijskih parametara na izmjenu topline, a optimizacijom su dobivene njihove optimalne vrijednosti s obzirom na različite funkcije cilja usmjerene na povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline.

**Ključne riječi:** latentni spremnik topline, povećanje učinkovitosti, eksperimentalna analiza, numerička analiza, optimizacija.

## ABSTRACT

In the doctoral dissertation, experimental and numerical analysis of heat transfer during charging and discharging in the latent thermal energy storage (LTES) has been investigated in order to enhance its thermal performance. The investigated LTES is a shell-and-tube type heat exchanger with longitudinal fins on the outer side of each tube, using paraffin RT 25 as the phase change material (PCM), which is placed around the tubes, and water as the heat transfer fluid (HTF), which flows through the tubes. For the purpose of experimental investigations, experimental test LTES has been designed and experimental apparatus has been set up. Series of experimental measurements of transient temperature variations of paraffin inside the LTES, as well as transient temperature variations of water at the inlet and outlet positions, have been performed during charging and discharging processes for various operating conditions. For the physical problem of heat transfer inside the LTES, computational domain and mathematical model have been defined. Mathematical model, consisting of conservation equations of mass, momentum and energy, as well as corresponding initial and boundary conditions, describes the transient problem of fluid flow and heat transfer with phase change, which is included in the model through the enthalpy formulation. The mathematical model has been solved numerically, using the finite volume method and numerical solver Ansys Fluent. The existing numerical procedure has been upgraded with a series of self-written user-defined functions so phase change heat transfer of the low thermal conductivity PCM could be modeled. In order to validate the mathematical model and numerical procedure, comparison of numerical results with experimental data has been performed and good agreement has been observed. The influence of natural convection in the PCM liquid phase on heat transfer during melting and solidification of the PCM has been investigated. Further numerical analyses of LTES charging and discharging processes have been performed in order to investigate the influence of various geometry parameters on heat transfer, and their optimum values have been obtained through optimization, with respect to different objective functions aimed at enhancing the latent thermal energy storage performance.

**Keywords:** latent thermal energy storage, performance enhancement, experimental analysis, numerical analysis, optimization.



# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
1.1. Akumulatori topline.....	2
1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja iz područja povećanja učinkovitosti latentnih spremnika topline .....	3
1.2.1. Utjecaj geometrijskih karakteristika latentnog spremnika topline i pogonskih uvjeta na izmjenu topline.....	4
1.2.2. Povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline ugradnjom lamela.....	7
1.2.3. Povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline povećanjem toplinske vodljivosti akumulatora topline .....	11
1.2.4. Povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline korištenjem više različitih akumulatora topline .....	12
1.2.5. Optimizacija latentnih spremnika topline .....	13
1.3. Cilj i hipoteza istraživanja .....	16
1.4. Znanstveni doprinos .....	16
1.5. Metodologija istraživanja i struktura doktorske disertacije.....	16
<b>2. FIZIKALNI PROBLEM</b> .....	18
<b>3. POSTAVLJANJE I IZVOĐENJE EKSPERIMENTALNOG DIJELA ISTRAŽIVANJA</b> .....	19
3.1. Opis eksperimentalne naprave i ispitne linije.....	19
3.2. Mjerna oprema.....	21
3.2.1. Osjetnici temperature .....	21
3.2.2. Sustav za automatsko prikupljanje i pohranu podataka .....	21
3.2.3. Korisnička aplikacija za prikupljanje i obradu podataka .....	22
3.3. Analiza greške mjerenja .....	23
3.3.1. Umjeravanje osjetnika topline .....	24
3.3.2. Određivanje mjerne nesigurnosti izračunatih toplina i toplinskih učina .....	27

3.4. Opis izvršenog mjerenja .....	28
3.4.1. Taljenje akumulatora topline .....	31
3.4.2. Skrućivanje akumulatora topline .....	34
<b>4. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ANALIZA .....</b>	<b>37</b>
4.1. Analiza utjecaja ulazne temperature fluida prijenosnika topline na proces spremanja topline .....	38
4.2. Analiza utjecaja ulazne temperature fluida prijenosnika topline na proces korištenja topline .....	42
4.3. Analiza utjecaja masenog protoka fluida prijenosnika topline na proces spremanja topline .....	47
4.4. Analiza utjecaja masenog protoka fluida prijenosnika topline na proces korištenja topline .....	51
<b>5. MATEMATIČKI MODEL OPISANOG FIZIKALNOG PROBLEMA.....</b>	<b>56</b>
5.1. Domena.....	56
5.2. Jednadžbe očuvanja .....	58
5.3. Početni i rubni uvjeti.....	65
<b>6. NUMERIČKO RJEŠAVANJE MATEMATIČKOG MODELA.....</b>	<b>68</b>
6.1. Opis numeričkog rješavanja .....	68
6.1.1. Diskretizacija .....	70
6.1.2. Algoritam za proračun polja brzina i tlakova .....	74
6.2. Umrežavanje domene numeričkog proračuna .....	77
6.3. Korištena računalna i programska oprema .....	78
6.4. Prilagodba postojećeg numeričkog postupka za modeliranje prijelaza topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline .....	79
6.5. Provjera utjecaja gustoće mreže i veličine vremenskog koraka na rješenje .....	80
<b>7. PROVJERA VALJANOSTI MATEMATIČKOG MODELA I NUMERIČKOG POSTUPKA.....</b>	<b>83</b>
7.1. Usporedba rezultata numeričkog i eksperimentalnog istraživanja .....	83

7.2. Analiza utjecaja slobodne konvekcije na izmjenu topline.....	87
7.2.1. Taljenje (spremanje topline) .....	88
7.2.2. Skrućivanje (korištenje topline).....	92
<b>8. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA .....</b>	<b>97</b>
8.1. Analiza utjecaja broja lamela na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline ...	98
8.2. Analiza utjecaja omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline .....	105
8.3. Analiza utjecaja debljine lamela na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline .....	112
<b>9. OPTIMIZACIJA LATENTNOG SPREMNIKA TOPLINE S CILJEM POVEĆANJA NJEGOVE UČINKOVITOSTI .....</b>	<b>120</b>
9.1. Odabir razina analiziranih parametara i definiranje funkcija cilja .....	120
9.2. Optimizacija latentnog spremnika topline s obzirom na definirane funkcija cilja .....	123
9.2.1. Optimizacija latentnog spremnika topline s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka.....	123
9.2.2. Optimizacija latentnog spremnika topline s ciljem povećanja iskoristivosti topline .....	126
9.2.3. Optimizacija latentnog spremnika topline s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz istovremeno povećanje iskoristivosti topline .....	128
9.3. Usporedba kriterija ocjene učinkovitosti optimalne konfiguracije i latentnog spremnika topline na kojem su provedena eksperimentalna istraživanja .....	130
<b>10. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>132</b>
Literatura .....	134
Popis oznaka.....	140
Popis slika .....	144
Popis tablica .....	150



## 1. UVOD

Zbog rastuće potrebe za energijom te činjenice da fosilna goriva onečišćuju okoliš i dostupna su samo u ograničenim količinama, velika se pažnja posvećuje razvoju obnovljivih izvora energije, gdje značajnu ulogu ima sunčeva energija. Budući da su potreba za energijom i dozračena sunčeva energija često u vremenskom raskoraku, nužan element sustava za korištenje obnovljivih izvora energije je toplinski spremnik, koji se može smatrati posebnim tipom izmjenjivača topline [1]. Ugradnja prikladnog spremnika za pohranu energije u energetske sustave može znatno poboljšati gospodarenje energijom i pomoći pri prevladavanju razmimoilaženja vremena opskrbe i potražnje. Prema načinu pohrane energije, ti se spremnici mogu svrstati u tri kategorije: spremnici osjetne topline, spremnici latentne topline te spremnici u kojima se toplina pohranjuje i oslobađa povrativim fizikalno-kemijskim reakcijama [2]. Široku primjenu imaju latentni spremnici topline kod kojih se toplina akumulira, odnosno predaje pri promjeni agregatnog stanja radne tvari (kruto-kapljevito). Relativno mali volumen, uski temperaturni interval promjene agregatnog stanja (faze) i mogućnost odabira akumulatora topline s velikim latentnim toplinama osnovne su prednosti latentnih spremnika topline. Tvar koja se koristi za spremanje topline u latentnim spremnicima topline naziva se akumulator topline (eng. *phase change material*, PCM). Izmjena topline između akumulatora topline i toplinskog izvora/ponora odvija se putem medija koji se naziva fluid prijenosnik topline (eng. *heat transfer fluid*, HTF), pri čemu toplinski izvor/ponor izmijenjuje toplinu s fluidom prijenosnikom topline, a on ju izmijenjuje s akumulatorom topline u razdobljima spremanja topline, pri čemu se akumulator topline tali, odnosno korištenja topline, pri čemu dolazi do skrućivanja akumulatora topline. Zbog praktičnosti, dostupnosti i povoljnih toplinskih svojstava, tvar koja se koristi kao fluid prijenosnik topline najčešće je voda.

Proces izmjene topline unutar akumulatora topline ne odvija se jednoliko. Prilikom taljenja, toplina se najprije izmjenjuje provođenjem, a potom i slobodnom konvekcijom. Kako fronta taljenja napreduje, kruta se zona smanjuje i odmiče od površine izmjene topline, a povećava se debljina kapljevito sloja [3]. Na daljnji proces taljenja sve više utječe slobodna konvekcija, uzrokovana razlikom gustoća između čestica kapljevito akumulatora topline. Za razliku od taljenja, procesom skrućivanja dominira provođenje topline. Slobodna konvekcija prisutna je na početku procesa, a daljnjim skrućivanjem smanjuje se količina kapljevite faze, a s njom i utjecaj slobodne konvekcije [4]. Zbog ovih osobitosti, modeliranje taljenja i skrućivanja predstavlja značajan izazov. U tu svrhu, razvijene su brojne metode za matematičko i

numeričko modeliranje prijelaza topline pri promjeni agregatnog stanja, čiji su pregled, kao i primjenu u latentnim spremnicima topline različitih geometrija, dali Dutil i sur. [5]. Često korištena metoda za numeričko modeliranje procesa taljenja i skrućivanja je entalpijska metoda, koju su razvili Voller i sur. [6]. Ona u jednadžbi očuvanja energije kao varijablu umjesto temperature koristi entalpiju, a položaj granice faza nije potrebno pratiti. Metodu su unaprijedili Voller i Prakash [7], pri čemu je omogućeno modeliranje taljenja unutar temperaturnog intervala. Entalpijska metoda u širokoj je primjeni zbog niza prednosti; jednadžbe očuvanja slične su jednofaznom problemu, nije potrebno zadovoljiti eksplicitni uvjet na granici faza i moguće je odrediti rješenje unutar temperaturnog raspona promjene faze. Neki istraživači razvili su vlastite računalne programe za modeliranje izmjene topline unutar latentnih spremnika topline temeljene na ovoj metodi [8, 9]. Korištenjem vlastitog računalnog programa napisanog u programskom jeziku Fortran, Trp [10] i Trp i sur. [11] analizirali su nestacionarni problem taljenja i skrućivanja parafina u latentnom spremniku topline cijevne konfiguracije primjenom entalpijske metode. U novije se vrijeme za numeričke proračune pretežito koriste komercijalni programski paketi (Ansys Fluent, Ansys CFX, COMSOL) s ugrađenim modelima za rješavanje problema izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja.

### **1.1. Akumulatori topline**

Odabir akumulatora topline za primjenu u niskotemperaturnim sustavima s latentnim spremnicima topline ovisi o poželjnim toplinskim, fizikalnim i kemijskim svojstvima, kao i o ekonomskim pokazateljima, odnosno njihovoj cijeni i dostupnosti [12]. Neovisno o području primjene, materijal akumulatora topline trebao bi imati sljedeća svojstva:

- toplinska: temperatura promjene faze u zahtijevanom rasponu radnih temperatura, velika latentna toplina, veliki specifični toplinski kapacitet, velika toplinska vodljivost,
- fizikalna: velika gustoća, mala promjena volumena prilikom promjene faze, nesklonost pothlađivanju,
- kemijska: stabilnost, nekorozivnost, velika brzina kristalizacije, netoksičnost, nezapaljivost, neeksplozivnost.

Akumulatori topline mogu se podijeliti u tri osnovne skupine: organski, u koje se ubrajaju parafini i masne kiseline; anorganski, koji se dodatno dijele na metale, soli i hidrate soli; te eutektici, koji mogu biti organsko-organski, anorgansko-organski te anorgansko-anorganski. Svaka od navedenih skupina akumulatora topline posjeduje niz prednosti, ali i nedostataka.

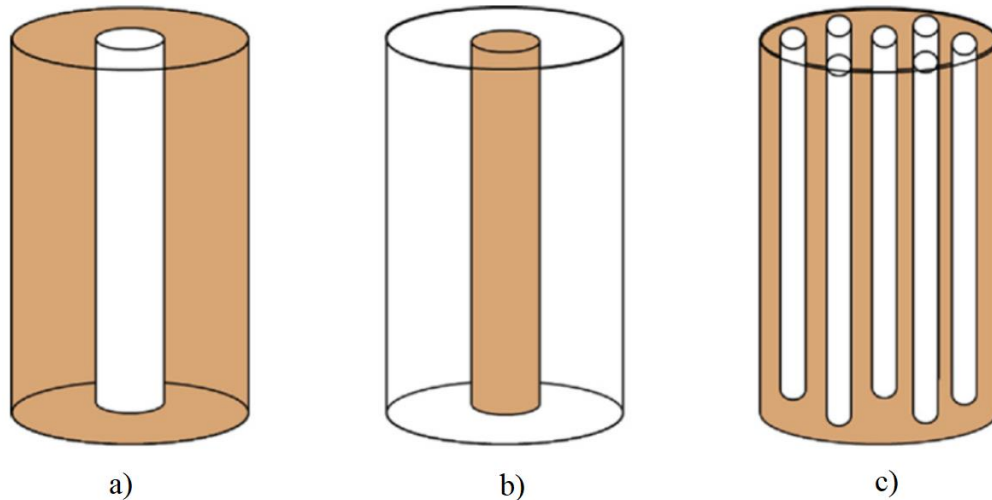
Prednosti organskih tvari su sposobnost kongruentnog taljenja, nekorozivnost i kompatibilnost s konvencionalnim konstrukcijskim materijalima [13].

Parafini pripadaju zasićenim ugljikovodicima (alkanima) i sastoje se od ravnog lanca atoma ugljika i vodika. Temperatura taljenja parafina ovisi o broju ugljikovih atoma u lancu, pri čemu alkani između 14 i 40 ugljikovih atoma imaju tališta između 6 i 80 °C [14]. Zbog širokog raspona temperatura taljenja i skrućivanja te zbog relativno velike latentne topline taljenja, tehnički parafini u velikoj se mjeri koriste kao akumulatori topline. Imaju malu promjenu volumena tijekom procesa promjena faza i kod njih ne dolazi do efekta pothlađivanja tijekom skrućivanja. Kemijski su stabilni, netoksični i nekorozivni tijekom duljeg razdoblja spremanja i korištenja toplinske energije. Najčešće neparafinske tvari korištene kao akumulatori topline su masne kiseline poput laurinske, miristinske, palmitinske i stearinske kiseline. Glavne prednosti anorganskih tvari su velike latentne topline, često dvostruko veće nego kod organskih tvari, te velika toplinska vodljivost. Međutim, njihov je nedostatak nekongruentno taljenje, tj. njihovim taljenjem nastaje zasićena otopina i krutina koja je hidrat nižeg reda iste soli. Te se dvije komponente ne spajaju ponovno tijekom procesa skrućivanja bez uvođenja posebnih mjera, kao što je dodavanje tvari za potpomaganje procesa nukleacije. Također, imaju loša nukleacijska svojstva, što rezultira pojavom pothlađivanja kapljevite faze, te mogu korozivno djelovati na mnoge metale što dovodi do nekompatibilnosti s mnogim materijalima od kojih se izrađuju spremnici. Iako su u upotrebi i eutektički sastavi višekomponentnih smjesa organskih i anorganskih spojeva, o njihovim termodinamičkim i fizikalnim svojstvima nedostaje dovoljno rezultata [15]. Glavni nedostatak organskih akumulatora topline njihova je mala toplinska vodljivost [16]. Kako bi se premostio ovaj nedostatak, razvijen je niz metoda poboljšanja izmjene topline u latentnim spremnicima topline.

## **1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja iz područja povećanja učinkovitosti latentnih spremnika topline**

Na izmjenu topline unutar latentnog spremnika topline znantno utječe njegova konfiguracija i geometrijski parametri. Vyshak i Jilani [17] usporedili su utjecaj geometrije latentnog spremnika topline na brzinu taljenja akumulatora topline usporedbom latentnih spremnika topline pravokutne i cijevne konfiguracije. Zaključili su da je, za isti volumen spremnika i površinu izmjene topline, brzina taljenja najveća u cijevnom latentnom spremniku topline. Agyenim i sur. u svojem su pregledu [18] također opazili da je cijevna konfiguracija latentnog

spremnika topline povoljnija s obzirom na izmjenu topline od ostalih konfiguracija. Posljedično, Al-Abidi i sur. [19] pregledom dostupne literature zaključuju da cijevna konfiguracija čini 70% proučavanih konfiguracija latentnih spremnika topline. Najčešće cijevne konfiguracije latentnih spremnika topline prikazane su na slici 1.1.



*Slika 1.1. Cijevne konfiguracije latentnih spremnika topline, a) akumulator topline oko cijevi, b) akumulator topline u cijevi, c) snop cijevi u plaštu s akumulatorom topline oko cijevi [20]*

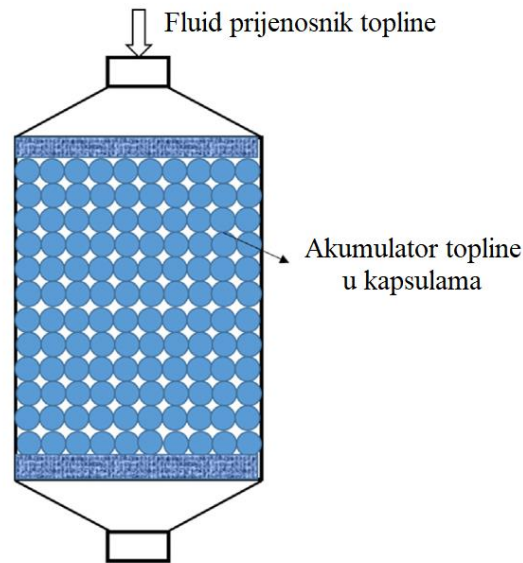
### 1.2.1. Utjecaj geometrijskih karakteristika latentnog spremnika topline i pogonskih uvjeta na izmjenu topline

Akumulator topline može ispunjavati unutarnje cijevi ili prostor oko njih, a neka istraživanja uključuju usporedbu dviju opcija [19]. Primjerice, Esen i sur. [21] proučavali su obje konfiguracije uspoređujući različite toplinske i geometrijske parametre prilikom spremanja topline; promjere unutarnje i vanjske cijevi, ukupnu količinu akumulatora topline, masene protoke te ulazne temperature fluida prijenosnika topline i zaključili da je vrijeme taljenja kraće u izvedbi u kojoj je akumulator topline oko cijevi. Utjecaj omjera promjera vanjske i unutarnje cijevi istraživali su Ismail i Melo [22], zaključivši da smanjenje omjera rezultira kraćim vremenom taljenja akumulatora topline, no smanjenjem omjera smanjuje se i količina akumulatora topline. Trp i sur. [11] eksperimentalno su i numerički analizirali utjecaj omjera vanjske cijevi i visine spremnika na procese spremanja i korištenja topline. Uočili su povećanje akumulirane i predane topline s porastom vanjskog promjera i duljine cijevi, zbog povećanja količine akumulatora topline, no smanjenje u gustoći spremljene i predane topline. Seddegh i sur. [23] eksperimentalno su analizirali omjer promjera vanjske i unutarnje cijevi s obzirom na



vrijeme taljenja i akumuliranu toplinu te zaključili da se vrijeme taljenja znatno produžuje nakon vrijednosti omjera 5,4, a povećanje u akumuliranoj toplini je zanemarivo. Seddegh i sur. [24] ispitali su i utjecaj orijentacije latentnog spremnika topline eksperimentalno istražujući izmjenu topline u njegovoj horizontalnoj i vertikalnoj izvedbi. U horizontalnoj izvedbi, nakon početka taljenja, uočen je jak intenzitet slobodne konvekcije u rastaljenom akumulatoru topline duž cijevi, što je povoljno djelovalo na izmjenu topline. Međutim, intenzitet prijelaza topline smanjuje se nakon što se akumulator topline potpuno rastali u gornjem dijelu spremnika. U vertikalnoj konfiguraciji, slobodna konvekcija uzrokovala je gibanje u radijalnom smjeru, no slabije nego u horizontalnoj izvedbi. Budući da je tijekom skrućivanja provođenje topline glavni mehanizam izmjene topline, uočili su da orijentacija latentnog spremnika topline nema značajan utjecaj na izmjenu topline. Kousha i sur. [25] eksperimentalno su analizirali utjecaj nagiba spremnika na brzinu taljenja i skrućivanja u latentnom spremniku topline. Razmatrali su četiri kuta nagiba; 0°, 30°, 60° i 90°. Također su zaključili da je horizontalna orijentacija povoljnija za izmjenu topline pri procesu spremanja topline. U razmatranjima procesa korištenja topline, veći toplinski tokovi postignuti su u latentnom spremniku topline vertikalne orijentacije.

Osim s jedne ili druge strane cijevi, akumulator topline može se nalaziti u obliku kuglica ili kapsula koje ispunjavaju latentni spremnik topline (eng. *encapsulation*), čime se povećava površina izmjene topline te također smanjuje debljina sloja akumulatora topline, a time i toplinski otpor provođenju topline. Akumulator topline nalazi se unutar čvrste, često metalne stijenke, i izmijenjuje toplinu s fluidom prijenosnikom topline koji prolazi kroz spremnik (slika 1.2). Zbog dimenzija kuglica (milimetarske, odnosno mikrometarske veličine), utjecaj slobodne konvekcije na izmjenu topline znatno je smanjen. Velik broj istraživanja posvećen je ovakvom obliku pohrane energije, a usmjeren je na proučavanje geometrije i konfiguracije latentnog spremnika topline, istraživanje materijala akumulatora topline te poboljšanje izmjene topline. Pregled značajnijih radova u ovom području dali su Regin [26] te Abokersh i sur. [27].



*Slika 1.2. Latentni spremnik topline s akumulatorom topline u kapsulama [28]*

Izmjena topline između fluida prijenosnika topline i akumulatora topline može se poboljšati promjenom pogonskih uvjeta fluida. Trp i sur. [11] analizirali su utjecaj ulazne temperature i protoka fluida prijenosnika topline na izmjenu topline prilikom taljenja i skrućivanja parafina u vertikalnom cijevnom latentnom spremniku topline. Zaključili su da povećanje razlike temperatura između fluida i akumulatora topline znatnije utječe na izmjenu topline od protoka fluida budući da se povećanjem protoka velik dio topline odnosi uzvodno i ne uspijeva se prenijeti na akumulator topline. Akgün i sur. [29] eksperimentalno su ocijenili procese spremanja i korištenja topline u vertikalnom cijevnom latentnom spremniku topline koristeći parafin kao akumulator topline i opazili velik utjecaj ulazne temperature fluida prijenosnika topline na vremena taljenja i skrućivanja. Predložili su korištenje manjih vrijednosti protoka fluida budući da povećanje protoka nije rezultiralo značajnijim poboljšanjem izmjene topline. Do sličnog su zaključka došli Rathod i Banerjee [30], eksperimentalno ispitavši taljenje u cijevnom latentnom spremniku topline s parafinom kao akumulatorom topline, te Korti i Tlemsani [31], koji su eksperimentalno analizirali taljenje i skrućivanje triju vrsta parafina u cijevnom latentnom spremniku topline sa zavojitom cijevi. Agarwal i Sarviya [32] konstruirali su i eksperimentalno istražili taljenje i skrućivanje parafina u cijevnom latentnom spremniku topline za solarno sušenje sa zrakom kao fluidom prijenosnikom topline. Proveli su niz eksperimentalnih mjerenja za različite protoke i temperature fluida prijenosnika topline te opazili značajan utjecaj promjene temperature i protoka na brzinu taljenja i skrućivanja.

Vidljivo je da se povećanjem razlike ulazne temperature fluida prijenosnika topline i akumulatora topline te povećanjem protoka fluida može utjecati na izmjenu topline u latentnom spremniku topline, no to je poboljšanje ograničeno tehničkim mogućnostima sustava, većim troškom takvih pogonskih uvjeta, a u nekim sustavima i zahtijevanim vrijednostima radnih parametara, primjerice izlaznom temperaturom fluida prijenosnika topline.

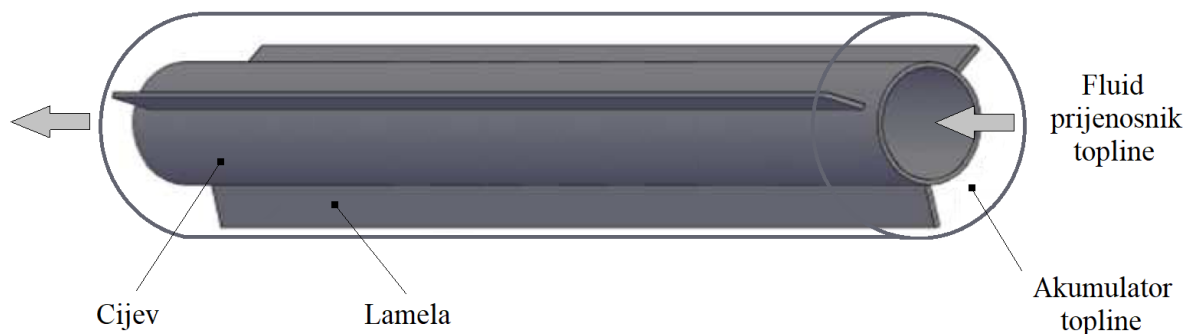
Metode poboljšanja izmjene topline u postojećim konfiguracijama latentnih spremnika topline u svrhu suzbijanja negativnog utjecaja male toplinske vodljivosti akumulatora topline najčešće se svode na povećanje površine izmjene topline, povećanje toplinske vodljivosti akumulatora topline te korištenje više različitih akumulatora topline. Povećanje površine izmjene topline izvodi se ugradnjom lamela na strani akumulatora topline. Povećanje toplinske vodljivosti akumulatora topline može se postići dodavanjem dobro provodljivih čestica, poroznih pjena ili matrica u sam akumulator topline što doprinosi povećanju efektivnog koeficijenta toplinske vodljivosti akumulatora topline. Korištenje više različitih akumulatora topline u latentnom spremniku topline doprinosi povećanju homogenosti procesa, odnosno održavanju približno konstantnog toplinskog toka pri procesima spremanja, odnosno korištenja topline.

#### 1.2.2. Povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline ugradnjom lamela

Česta metoda poboljšanja izmjene topline unutar latentnog spremnika topline ugradnja je lamela (eng. *fins, extended surfaces*) na strani akumulatora topline, zbog jednostavnosti njihove konstrukcije, jednostavne proizvodnje te malih troškova [33]. Lamele različitih oblika, poput uzdužnih, radijalnih i spiralnih, predmet su eksperimentalnih i numeričkih istraživanja, a ugrađuju se u pravokutne spremnike, spremnike s dvostrukom (eng. *double pipe*) te trostrukom koncentričnom cijevi (eng. *triplex tube*) i latentne spremnike topline konfiguracije snopa cijevi u plaštu (eng. *shell-and-tube*).

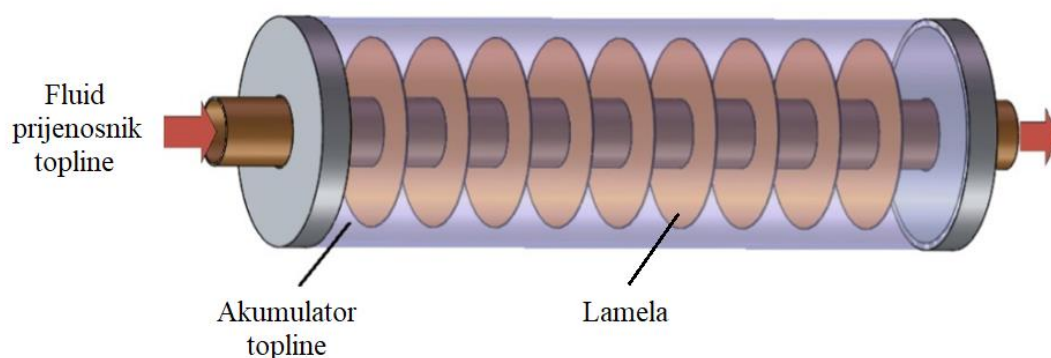
Četiri različite izvedbe cijevnih latentnih spremnika topline koji koriste parafin kao akumulator topline eksperimentalno su ocijenili Gasia i sur. [34]. Zaključili su da izvedbe s lamelama rezultiraju većim izmijenjenim toplinskim tokom i akumuliranom toplinom zbog veće površine izmjene topline. Rathod i Banerjee [35] eksperimentalno su istražili poboljšanje izmjene topline pri taljenju i skrućivanju stearinske kiseline u cijevnom latentnom spremniku topline uz vodu kao fluid prijenosnik topline. Ugradnja triju lamela (prikazano na slici 1.3) skratila je vrijeme taljenja za do 25%, a vrijeme skrućivanja za do 44%, u usporedbi s izvedbom bez lamela. Z. Khan and Z.A. Khan [36] eksperimentalno su istražili proces spremanja topline u cijevnom

latentnom spremniku topline s novim tipom uzdužnih lamela. Utvrdili su da ugradnja lamela rezultira ubrzavanjem procesa taljenja i povećanjem srednjeg toplinskog učina spremnika za do 70% u odnosu na konfiguraciju bez lamela. Mahdi i sur. [37] eksperimentalno su i numerički istražili proces taljenja parafina u vertikalnom latentnom spremniku topline cijevne konfiguracije za različite konfiguracije i orijentacije spremnika. Opazili su da je ugradnjom pet uzdužnih lamela vrijeme taljenja skraćeno za 50%. Ispitujući orijentaciju spremnika, zaključili su da se akumulator topline u konfiguraciji bez lamela prije rastali u horizontalno orijentiranom spremniku, a u konfiguraciji s lamelama, orijentacija spremnika ima manji utjecaj na brzinu taljenja. Al-Abidi i sur. [38] numerički su analizirali proces skrućivanja u latentnom spremniku topline konfiguracije trostruke koncentrične cijevi s uzdužnim lamelama. Voda kao fluid prijenosnik topline strujala je kroz unutarnju i vanjsku cijev, a središnja cijev bila je ispunjena akumulatorom topline, parafinom RT 82. Ispitivali su utjecaj konfiguracije, broja i debljine uzdužnih lamela te opazili značajan utjecaj ispitivanih parametara na vrijeme skrućivanja. Solomon i Velraj [39] eksperimentalno su ispitali skrućivanje parafina RT 21 u dvostrukoj koncentričnoj cijevi s osam međusobno jednako udaljenih lamela. Zrak kao fluid prijenosnik topline strujao je kroz unutarnju cijev, a akumulator topline ispunjavao je prostor između cijevi. Uočili su da je vrijeme skrućivanja kraće zbog poboljšane izmjene topline lamelama te procijenili da je za postizanje maksimalnog poboljšanja dovoljno da visina lamele iznosi 60% prostora između cijevi. Opazili su i negativan utjecaj lamela u kapljevitoj fazi, zbog oslabljenog utjecaja slobodne konvekcije. Ismail i sur. [40] eksperimentalno su i numerički razmatrali proces skrućivanja u dvostrukoj koncentričnoj cijevi s uzdužnim lamelama u kojoj je unutarnjom cijevi strujao fluid prijenosnik topline, a u vanjskoj cijevi nalazio se akumulator topline. Opazili su velik utjecaj broja i širine te manji utjecaj debljine lamela na vrijeme skrućivanja. Također, zaključili su da omjer duljine i promjera cijevi znatno utječe na izmjenu topline, kao i razlika temperatura između fluida i akumulatora topline. Velraj i sur. [41] eksperimentalno su i numerički istraživali skrućivanje parafina RT 60 u vertikalnoj koncentričnoj cijevi pri čemu se akumulator topline nalazio u unutarnjoj cijevi, unutar koje su postavljene četiri uzdužne lamele. Ugradnjom lamela jednoliko je smanjen toplinski otpor u odnosu na izvedbu bez lamela. Također, zbog broja lamela povećao se i toplinski tok, približno  $1/n$  puta u odnosu na slučaj bez lamela, gdje  $n$  označava broj lamela. Na povećanje toplinskog toka utjecalo je i smanjenje polumjera unutarnje cijevi budući da je time smanjen i toplinski otpor parafina.



*Slika 1.3. Cijevni latentni spremnik topline s uzdužnim lamelama oko cijevi [35]*

Erek i sur. eksperimentalno su i numerički [42] istražili utjecaj razmaka između radijalnih lamela te njihov promjer, kao i pogonske uvjete u latentnom spremniku topline cijevne konfiguracije prilikom skrućivanja akumulatora topline. Zaključili su da se toplina brže predaje pri većem promjeru lamele i s manjim razmakom između lamela. Utjecaj radijalnih lamela (prikazanih na slici 1.4) na izmjenu topline analizirali su i Yang i sur. [43], numerički istraživši taljenje u cijevnom latentnom spremniku topline koristeći tehnički parafin kao akumulator topline i vodu kao fluid prijenosnik topline. Ispitali su utjecaj broja lamela te njihovu debljinu i razmak na izmjenu topline te postigli poboljšanje u smanjenju vremena taljenja za do 65%. Zaključili su da povećanje broja i debljine lamela iznad određene vrijednosti ima nepovoljan utjecaj na izmjenu topline i kapacitet spremnika za akumuliranje/predaju topline budući da se smanjuje utjecaj slobodne konvekcije, odnosno količina akumulatora topline.



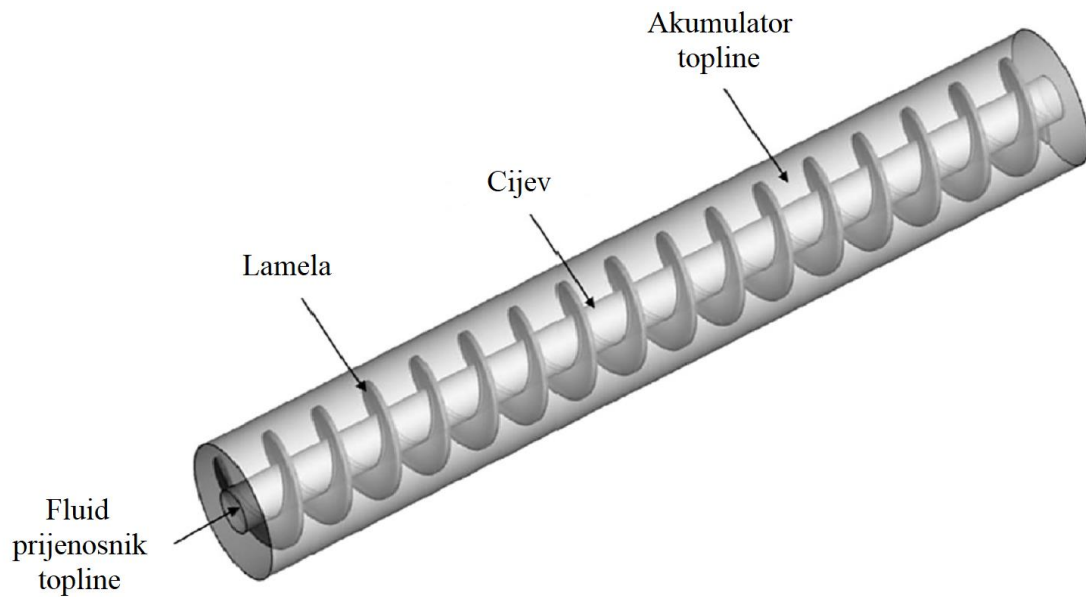
*Slika 1.4. Cijevni latentni spremnik topline s radijalnim lamelama oko cijevi [43]*

Stritih [44] je usporedio taljenje i skrućivanje parafina u pravokutnom latentnom spremniku topline s pločastim lamelama. Zaključio je da lamele neznatno poboljšavaju izmjenu topline

prilikom taljenja te uočio smanjenje utjecaja slobodne konvekcije prilikom taljenja zbog prisutnosti lamela. Lamele su pokazale značajnije poboljšanje izmjene topline pri skrućivanju, kojim dominira provođenje topline; u slučaju s lamelama vrijeme trajanje procesa skraćeno je za 40% u odnosu na slučaj bez lamela.

Agyenim i sur. [45] eksperimentalno su proučavali poboljšanje izmjene topline pri taljenju i skrućivanju eritritola u dvostrukoj koncentričnoj cijevi usporedbom utjecaja radijalnih i uzdužnih lamela. Rezultati su pokazali da se uzdužnim lamelama ostvaruje znatno poboljšanje izmjene topline, dok radijalne lamele nisu znatno utjecale na izmjenu topline. Caron-Soupart i sur. [46] eksperimentalno su istražili taljenje parafina RT 35 HC u tri različita modula latentnog spremnika topline cijevne konfiguracije; bez lamela, s radijalnim lamelama i s uzdužnim lamelama, kako bi usporedili brzinu taljenja, toplinski tok i gustoću spremljene topline. Opazili su da je brzina taljenja za konfiguraciju s uzdužnim i radijalnim lamelama znatno veća nego u konfiguraciji bez lamela.

Liu i sur. [47] eksperimentalno su istražili povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline sa spiralnim lamelama. Utvrdili su da oblik lamele, poglavito debljina, znatno utječe na provođenje topline i slobodnu konvekciju unutar spremnika. Primijetili su da su tanje lamele učinkovitije od debljih za istu količinu utrošenog materijala. Mehta i sur. [48] eksperimentalno su i numerički ispitali utjecaj spiralnih lamela (prikazanih na slici 1.5) na procese spremanja i korištenja topline u vertikalnom cijevnom latentnom spremniku topline koristeći stearinsku kiselinu kao akumulator topline i vodu kao fluid prijenosnik topline. Zaključili su da lamele poboljšavaju izmjenu topline u oba procesa, pogotovo u donjim dijelovima spremnika. Ugradnjom spiralnih lamela, trajanje procesa spremanja topline skraćeno je za 41%, a procesa korištenja topline za 22%.



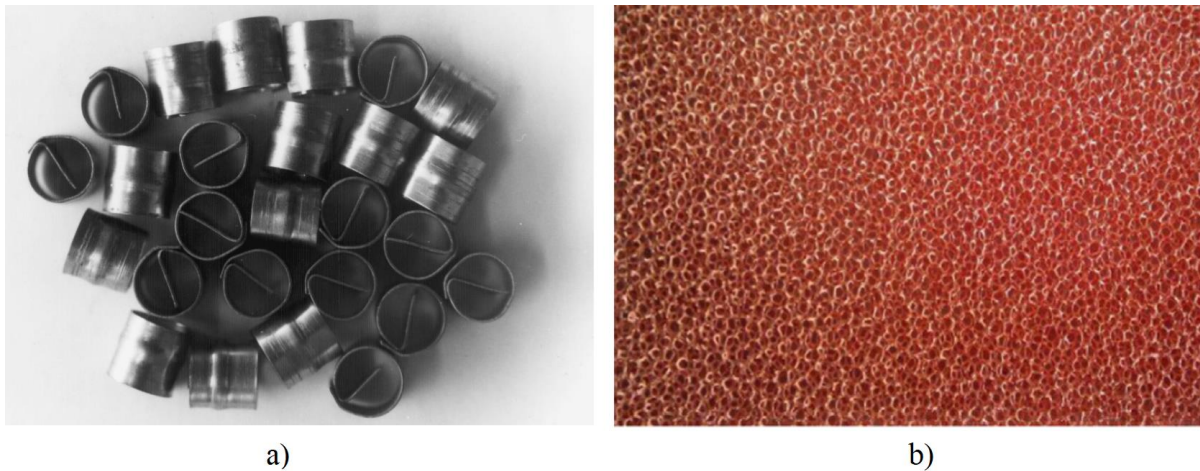
*Slika 1.5. Cijevni latentnog spremnika topline sa spiralnim lamelama oko cijevi [48]*

Vidljivo je da se ugradnjom lamela može znatno poboljšati izmjena topline pri taljenju i skrućivanju akumulatora topline u različitim konfiguracijama latentnih spremnika topline. Međutim, povećavanjem broja i dimenzija lamela smanjuje se količina akumulatora topline te ograničava utjecaj slobodne konvekcije, što nepovoljno djeluje na učinkovitost latentnog spremnika topline. Kako bi latentni spremnik topline bio učinkovit, broj i dimenzije lamela potrebno je pažljivo odabrati.

### 1.2.3. Povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline povećanjem toplinske vodljivosti akumulatora topline

Veliki toplinski otpor na strani akumulatora topline može se smanjiti povećanjem njegove efektivne toplinske vodljivosti. To se najčešće izvodi dodavanjem dobro provodljivih čestica ili struktura u akumulator topline. Primjerice, Mettawee i Assassa [49] eksperimentalno su istražili poboljšanje solarnog sustava s latentnim spremnikom topline dodavanjem mikročestica aluminija u parafin koji je korišten kao akumulator topline. Zaključili su da dodavanje čestica u masenom udjelu 0,5% skraćuje procese spremanja i korištenja topline za do 60%. Daljnje povećanje masenog udjela čestica nije rezultiralo znatnijim poboljšanjem. Velraj i sur. [50] su u akumulator topline dodali tankostijene šuplje cilindre (prstenove) te opazili značajno smanjenje vremena skrućivanja, približno 1/9 vremena potrebnog za skrućivanje bez dodanih

prstenova. Jedna od metoda poboljšanja toplinske vodljivosti akumulatora topline je stvaranje kompozitne strukture kombinacijom osnovnog akumulatora topline i poroznog, dobro provodljivog materijala. Često se koriste metalne pjene poput bakrene, niklene i aluminijske te pjene od ekspaniranog grafita. Wang i sur. [51] ispitali su kompozitni akumulator topline, kombinaciju bakrene pjene i parafina te uočili ravnomjernu izmjenu topline i smanjenje trajanja procesa spremanja topline za do 40%. Zaključili su da se toplinska vodljivost povećala 48 puta u odnosu na toplinsku vodljivost čistog parafina. Spomenuta poboljšanja toplinske vodljivosti akumulatora topline prikazana su na slici 1.6.



*Slika 1.6. Primjer dodavanja dobro provodljivih elemenata u akumulator topline u svrhu poboljšanja njegove toplinske vodljivosti, a) metalni prstenovi [50], b) bakrena pjena [28]*

Dodavanjem dobro provodljivih čestica, struktura i poroznih materijala moguće je znatno poboljšati izmjenu toplinu provođenjem u akumulatoru topline. Međutim, njihova prisutnost ograničava utjecaj slobodne konvekcije i smanjuje količinu akumulatora topline, odnosno kapacitet spremnika za spremanje topline. Smjernice za odabir i detaljan pregled poboljšanja ovog tipa dali su Bose i Amirtham [52].

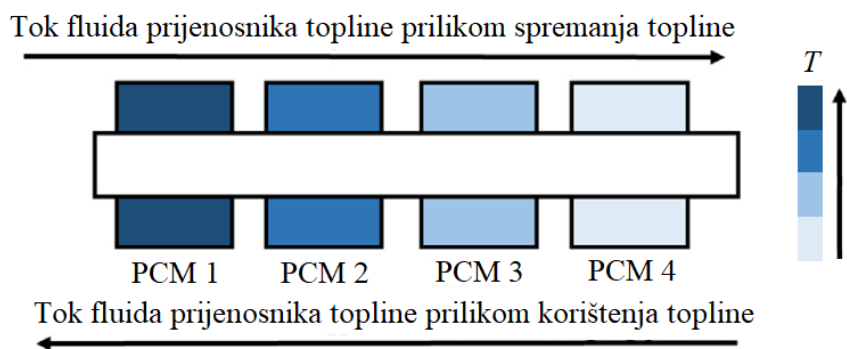
#### 1.2.4. Povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline korištenjem više različitih akumulatora topline

Korištenjem više različitih akumulatora topline u latentnom spremniku topline postiže se i održava približno jednaka razlika temperatura fluida prijenosnika topline i akumulatora topline, odnosno približno jednak toplinski tok tijekom trajanja procesa. U tu se svrhu umjesto jednog



akumulatora topline koristi više njih, koji su od ulaza fluida prijenosnika topline poredani prema svojim talištima (slika 1.7). U slučaju taljenja, od onoga s najvećim talištem prema onome s najmanjim talištem u odnosu na smjer strujanja fluida prijenosnika topline, a u slučaju skrućivanja smjer strujanja prijenosnika topline mora biti suprotan kako bi se i u procesu korištenja topline postiglo sličan učinak. Utjecaj korištenja različitih vrsta akumulatora topline istraživali su Wang i sur. [53], eksperimentalno ispitavši proces spremanja topline u latentnom spremniku topline konfiguracije trostruke koncentrične cijevi. Svaka je cijev bila ispunjena različitim akumulatorima topline; stearinskom kiselinom, parafinom i laurinskom kiselinom. Ovisno o vrsti akumulatora topline, vrijeme potpunog taljenja pri ovoj vrsti poboljšanja izmjene topline smanjeno je za 37-42% u usporedbi kad bi se koristio samo jedan akumulator topline. Sličnu su usporedbu proveli Aldoss i Rahman [54] te zaključili da korištenje više od tri različita akumulatora topline ne doprinosi značajno povećanju učinkovitosti latentnog spremnika topline.

Općenito, učinkovitost kaskadnog latentnog spremnika topline uvelike ovisi o odnosima korištenih akumulatora topline te njihovim toplinskim svojstvima; talištu, toplinskoj vodljivosti i latentnoj toplini. Prilikom odabira ovakvog latentnog spremnika topline, potreban je pažljiv odabir akumulatora topline i njihovog redoslijeda u spremniku.



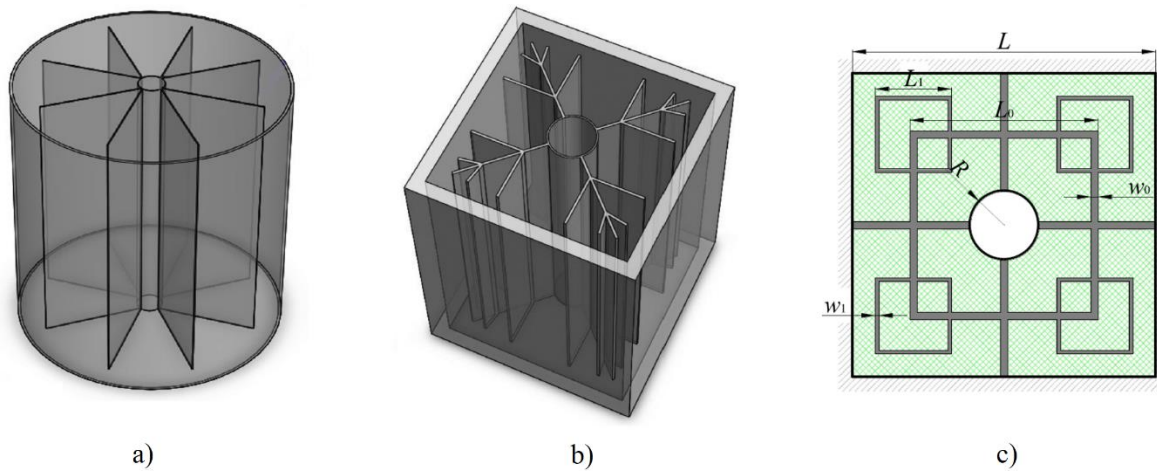
Slika 1.7. Shematski prikaz latentnog spremnika topline s više različitih akumulatora topline [28]

#### 1.2.5. Optimizacija latentnih spremnika topline

Iz provedenog pregleda uočava se da je povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline često kompromis između poboljšanja izmjene topline i kapaciteta za spremanje, odnosno predaju topline. U tu se svrhu provodi optimizacija utjecajnih parametara latentnog spremnika topline kako bi se postiglo optimalno rješenje s obzirom na zadanu funkciju cilja.

Zhang i sur. [55] numerički su ispitivali skrućivanje vode u cijevnom spremniku leda s ravnim uzdužnim lamelama. Koristeći Taguchijevu metodu, za ispitivane funkcije s ciljem smanjenja vremena skrućivanja, odnosno povećanja toplinskog kapaciteta spremnika dobili su optimalne vrijednosti broja, širine i debljine lamela. Yu i sur. [56] numerički su ispitali taljenje parafina RT 58 u horizontalnom latentnom spremniku topline s osam nejednoliko raspoređenih ravnih uzdužnih lamela te metodom odzivnih ploha dobili optimalne vrijednosti gradijenta kuta otklona između lamela te gradijent debljine lamela s ciljem smanjenja vremena taljenja. Lohrasbi i sur. [57, 58] numerički su ispitivali skrućivanje akumulatora topline u cijevnom latentnom spremniku topline s uzdužnim lamelama u obliku slova V (prikazanih na slici 1.8a). Korištenjem metode odzivnih ploha, proveli su višeciljnu optimizaciju s ciljem smanjenja vremena skrućivanja uz povećanje predane topline te odredili optimalne vrijednosti širine i debljine lamela te kuta između lamela. Optimalne vrijednosti navedenih parametara za istu geometriju i cilj autori su dobili i prilikom razmatranja cijelog ciklusa spremanja i korištenja topline [59]. Isti cilj koristili su i Sheikholeslami i sur. [60], koji su proveli optimizaciju geometrije dvostruko razgranatih lamela u obliku snježne pahulje (prikazanih na slici 1.8b) prilikom skrućivanja akumulatora topline. Metodom odzivnih ploha dobili su optimalne vrijednosti kutova otklona pojedinih grana te njihovih udaljenosti od cijevi. Optimizaciju razgranatih lamela proveli su i Yu i sur. [61], numerički istražujući proces taljenja laurinske kiseline u cijevnom latentnom spremniku topline s uzdužnim dvostruko razgranatim lamelama. Koristeći metodu odzivnih ploha, odredili su optimalne vrijednosti širine i debljine lamela s ciljem smanjenja vremena taljenja.

Deng i sur. [62] numerički su analizirali proces taljenja u latentnom spremniku topline koji koristi parafin RT 58 kao akumulator topline, a izmjena topline potpomognuta je metalnom matricom fraktalne geometrije (prikazanih na slici 1.8c). Koristeći metodu odzivnih ploha, proveli su optimizaciju geometrijskih parametara matrice s ciljem smanjenja vremena taljenja. Uočili su poboljšanje u smanjenju vremena taljenja od 95,7% uz smanjenje kapaciteta za spremanje topline od 10%.



*Slika 1.8. Latentni spremnici topline analizirani u postupku optimizacije, a) s uzdužnim lamelama u obliku slova V [57-59], b) s lamelama u obliku snježne pahulje [60], c) s metalnom matricom fraktalne geometrije [62]*

Lin i sur. [63] proveli su višeciljnu optimizaciju modularnog latentnog spremnika topline koji koristi hidrat soli S21 kao akumulator topline i zrak kao fluid prijenosnik topline. Tražili su optimalne vrijednosti ulazne temperature i protoka zraka, broja modula akumulatora topline i broja modula fluida prijenosnika topline s obzirom na vrijeme spremanja i korištenja topline te omjer stvarnog i teoretski najvećeg toplinskog toka tijekom promjene faze. Potrebne odzive sustava dobili su eksperimentalno, koristeći Taguchijevu metodu za odabir broja i konfiguracije pojedinih mjerenja. Optimalne vrijednosti dobili su genetskim algoritmom, ispitujući različite vrijednosti faktora važnosti odabranih funkcija cilja.

Navedeni radovi ukazuju da se optimizacijom utjecajnih parametara mogu, u skladu s odabranim ciljevima, odrediti njihove optimalne vrijednosti, što rezultira povećanjem učinkovitosti latentnog spremnika topline. Iz pregleda literature vidljivo je da brojna istraživanja pri optimizaciji razmatraju samo jednu promjenu agregatnog stanja. Budući da se u latentnom spremniku topline periodički izmjenjuju ciklusi spremanja i korištenja topline, a procesi taljenja i skrućivanja znatno se razlikuju prema mehanizmima izmjene topline, optimalne vrijednosti ispitivanih parametara razlikuju se pri pojedinačnom razmatranju tih procesa. Za određivanje stvarnih optimalnih vrijednosti utjecajnih parametara latentnog spremnika topline, potrebno je uzeti u obzir cjelokupni ciklus spremanja i korištenja topline.

### **1.3. Cilj i hipoteza istraživanja**

Cilj provedenog istraživanja je temeljem termodinamičke analize fizikalnog procesa spremanja i korištenja toplinske energije iz latentnog spremnika topline odrediti optimalne vrijednosti utjecajnih parametara u svrhu povećanja njegove učinkovitosti.

Iz navedenog proizlazi i hipoteza istraživanja:

Pravilnim odabirom utjecajnih parametara moguće je povećati učinkovitost  
latentnog spremnika topline.

### **1.4. Znanstveni doprinos**

Znanstveni doprinos provedenog istraživanja obuhvaća produblјivanje znanstvenih spoznaja o spremanju i korištenju topline u latentnim spremnicima topline koje se očituje kroz:

- rezultate dobivene eksperimentalnim istraživanjem procesa spremanja i korištenja topline na konstruiranom latentnom spremniku topline,
- izrađeni i eksperimentom provjereni numerički model izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline,
- rezultate numeričkih analiza geometrijskih parametara latentnog spremnika topline s ciljem određivanja njihovih utjecaja na izmjenu topline unutar latentnog spremnika topline,
- rezultate optimizacije geometrijskih parametara s ciljem povećanja učinkovitosti latentnog spremnika topline.

### **1.5. Metodologija istraživanja i struktura doktorske disertacije**

Doktorska disertacija podijeljena je u deset poglavlja. Uvodni dio istraživanja obuhvaća proučavanje dostupne znanstvene literature u području fizikalnog procesa izmjene topline u latentnom spremniku topline i upoznavanje s dosadašnjim znanstvenim postignućima u području poboljšavanja izmjene topline u latentnim spremnicima topline, poglavito u području poboljšanja geometrijskih karakteristika latentnog spremnika topline te ugradnje lamela i njihovog utjecaja na izmjenu topline.

Glavni dio istraživanja podijeljen je u preostalih devet poglavlja, koja se mogu podijeliti u četiri tematske cjeline koje predstavljaju navedene doprinose dokorskog istraživanja. U drugom poglavlju opisan je fizikalni problem akumulacije i predaje topline u razmatranom

latentnom spremniku topline s uzdužnim lamelama. Treće poglavlje obuhvaća opis i provedbu eksperimentalnih istraživanja na konstruiranom latentnom spremniku topline. Niz eksperimentalnih mjerenja tijekom procesa spremanja i korištenja topline proveden je za različite pogonske uvjete, a njihovi rezultati prikazani su u četvrtom poglavlju.

Rezultati eksperimentalnih mjerenja korišteni su i za provjeru valjanosti matematičkog modela i numeričkog postupka. U petom poglavlju sadržan je opis matematičkog modela postavljenog za odabranu domenu numeričkog proračuna, koji opisuje trodimenzijsko nestacionarno strujanje fluida i izmjenu topline, uključujući modeliranje izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja prema entalpijskoj metodi. Matematički model sastavljen je od odgovarajućih jednadžbi očuvanja te početnih i rubnih uvjeta. Šesto poglavlje sadrži opis numeričkog rješavanja metodom kontrolnih volumena. Ondje je također prikazana nadogradnja postojećeg numeričkog postupka strujanja i izmjene topline, ugradnjom korisnički definiranih funkcija napisanih u programskom jeziku C, u program za numeričko rješavanje Ansys Fluent, kako bi se njime mogla opisati izmjena topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline. U sedmom poglavlju opisana je provjera valjanosti matematičkog modela i numeričkog postupka usporedbom numeričkih rezultata s rezultatima mjerenja koja su dobivena eksperimentalnim istraživanjima na konstruiranom latentnom spremniku topline. Usporedbom je uočeno dobro poklapanje eksperimentalno i numerički dobivenih rezultata.

U osmom poglavlju provedene su numeričke analize utjecaja odabranih geometrijskih parametara latentnog spremnika topline na fizikalne procese spremanja, odnosno korištenja topline.

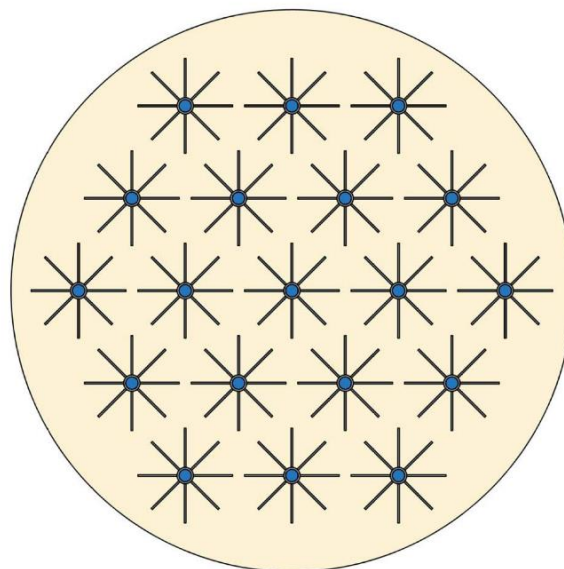
U devetom poglavlju provedena je optimizacija ispitivanih geometrijskih parametara u svrhu određivanja njihovih optimalnih vrijednosti s ciljem povećanja učinkovitosti latentnog spremnika topline i prikazana je usporedba optimalne konfiguracije s eksperimentalnim latentnim spremnikom topline.

U desetom poglavlju dan je zaključak provedenog istraživanja te su navedene smjernice za daljnje istraživanje.

## 2. FIZIKALNI PROBLEM

Akumulacija i predaja toplinske energije ciklički se odvijaju unutar latentnog spremnika topline. Tijekom dana, u fazi spremanja (akumuliranja) topline, zagrijani fluid prijenosnik topline predaje toplinu akumulatoru topline, koji se pritom tali. Noću, u fazi korištenja (predaje) topline, akumulator topline predaje pohranjenu toplinu fluidu prijenosniku topline, što rezultira njegovim skrućivanjem. Toplinske pojave unutar latentnog spremnika topline zahtjevan su nestacionarni fizikalni problem koji uključuje strujanje fluida prijenosnika topline i njegovu izmjenu topline prisilnom konvekcijom sa stijenkom, provođenje topline kroz stijenkku te izmjenu topline između stijenke i akumulatora topline koji pritom mijenja agregatno stanje, pri čemu se osim osjetne topline izmijenjuje i latentna toplina. Dodatno, u kapljevitoj fazi akumulatora topline prisutna je slobodna konvekcija, koja također utječe na izmjenu topline.

Latentni spremnik topline analiziran u ovom radu vertikalno je orijentirani spremnik konfiguracije snopa cijevi u plaštu koji se sastoji od 19 koncentričnih cijevi, na svakoj od kojih se nalazi osam jednoliko raspoređenih ravnih uzdužnih lamela. Fluid prijenosnik topline struji kroz cijevi, a prostor oko cijevi ispunjen je akumulatorom topline. Razmatrani latentni spremnik topline te konfiguracija cijevi unutar njega prikazani su na slici 2.1.

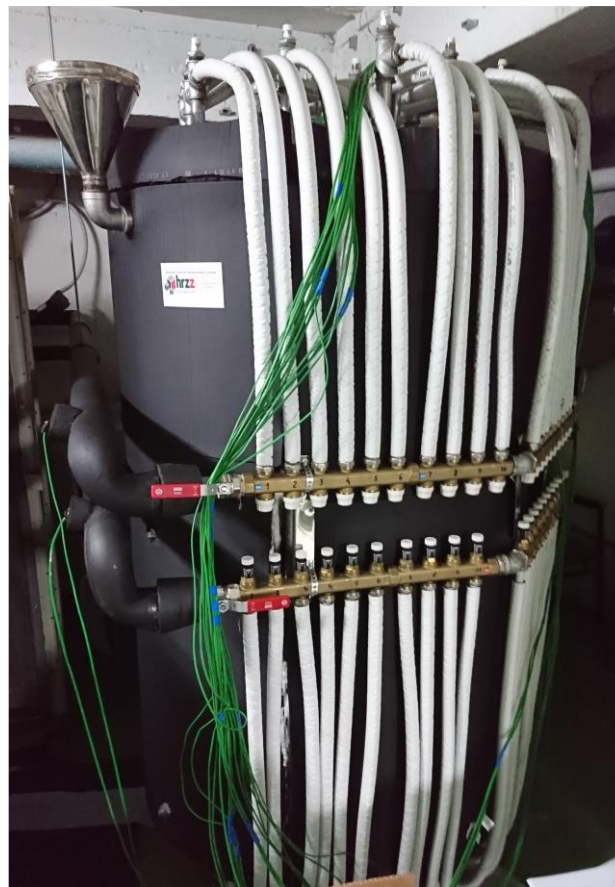


*Slika 2.1. Latentni spremnik topline cijevne konfiguracije s lamelama, a) razmatrani latentni spremnik topline, b) konfiguracija cijevi i lamela unutar spremnika*

### 3. POSTAVLJANJE I IZVOĐENJE EKSPERIMENTALNOG DIJELA ISTRAŽIVANJA

#### 3.1. Opis eksperimentalne naprave i ispitne linije

U Laboratoriju za toplinska mjerenja na Tehničkom fakultetu u Rijeci uspostavljena je ispitna linija s latentnim spremnikom topline, sa svrhom provođenja eksperimentalnih istraživanja na latentnom spremniku topline, kao i provjere valjanosti definiranog matematičkog modela i numeričkog postupka. Konstruiran je vertikalni latentni spremnik topline konfiguracije snopa cijevi u plaštu (eng. *shell-and-tube*), koji se sastoji od 19 koncentričnih aluminijskih cijevi, unutarnjeg promjera 0,025 m i vanjskog promjera 0,03 m. Na svakoj cijevi nalazi se 8 ravni uzdužnih lamela, izrađenih od aluminija te međusobno otklonjenih za kut od  $45^\circ$ , širine 0,066 m i debljine 0,002 m. Cijevi se nalaze u plaštu izrađenom od nehrđajućeg čelika, promjera 0,95 m i visine 1,5 m. Kako bi se smanjili toplinski gubici prema okolini, plašt je izoliran s 0,025 m ekspanzirane gumene pjene IT Flex C1, čiji je proizvođač EvoCell. Konstruirani latentni spremnik topline korišten u eksperimentalnim istraživanjima prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Konstruirani latentni spremnik topline korišten u eksperimentalnim istraživanjima

Ispitna linija sastoji se od opisanog latentnog spremnika topline, dizalice topline voda-voda CIAT Koala, učina 49 kW, spremnika tople i hladne vode, oba zapremine 300 l, termostatskog miješajućeg ventila i cirkulacijskih pumpi u krugu kondenzatora i toplog spremnika, krugu isparivača i hladnog spremnika te krugu radnog spremnika i latentnog spremnika topline. Dijelovi ispitne linije; latentni spremnik topline i sustav za prikupljanje podataka te regulacija ulazne temperature i protoka vode, odnosno termostatski miješajući ventil i cirkulacijska pumpa u krugu latentnog spremnika topline, prikazani su na slici 3.2.



*Slika 3.2. Dijelovi ispitne linije, a) latentni spremnik topline i sustav za prikupljanje podataka, b) regulacija ulazne temperature i protoka vode*

Cijevi u krugu dizalice topline i latentnog spremnika topline izrađene su od čelika i promjera su 33,7/30 mm. Ukupan protok vode iz polaznog voda cjevovoda u krugu latentnog spremnika topline razdjelnikom je podijeljen na 19 fleksibilnih izoliranih bakrenih cijevi promjera 14/12,5 mm, koje se pri vrhu spremnika spajaju na aluminijske cijevi s lamelama unutar spremnika. Fluid prijenosnik topline izlazi pri dnu latentnog spremnika topline, gdje se, analogno ulazu u spremnik, aluminijske cijevi s lamelama spajaju na fleksibilne bakrene cijevi, a one na sabirnik, odnosno povratni vod.



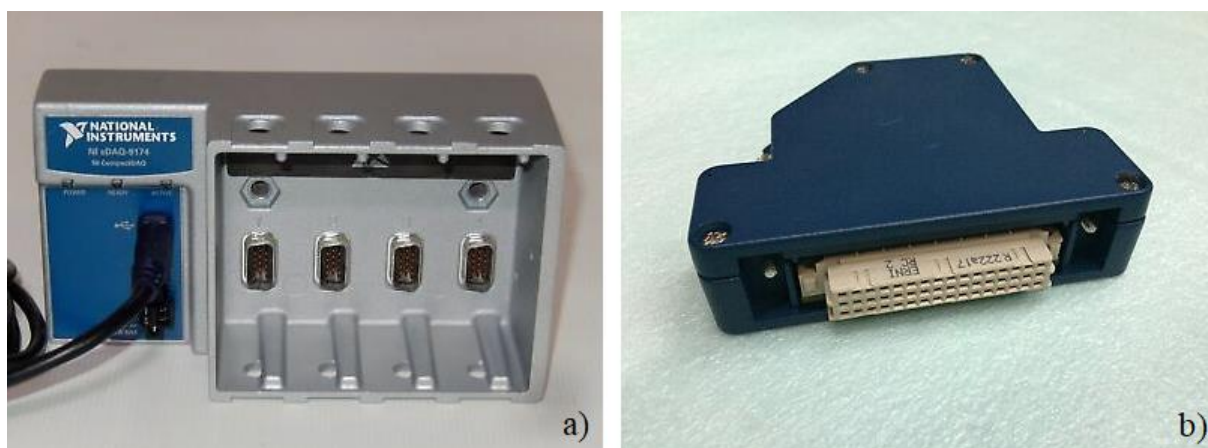
## 3.2. Mjerna oprema

### 3.2.1. Osjetnici temperature

Mjerenje temperatura unutar latentnog spremnika topline vrši se termoparovima (termoelementima), osjetnicima sastavljenima od dvije žice izrađene od različitih materijala koje su na jednom kraju zalemljene. Princip njihova rada temelji se na Seebeckovu efektu [64], odnosno međuovisnosti električnog napona i temperature; pri različitim temperaturama, između zalemljenog spoja i drugog kraja žice poznate temperature inducira se električni napon, a iz proporcionalne veze napona i temperature može se odrediti temperatura zalemljenog kraja žice. Termoparovi se dijele u tipove ovisno o vrsti materijala izrade, a u provedenom eksperimentalnom istraživanju koristi se tip K, odnosno osjetnici izrađeni od kromela (legura nikla i kroma) i alumela (legura nikla i aluminijska).

### 3.2.2. Sustav za automatsko prikupljanje i pohranu podataka

Modularni sustav za akviziciju podataka cDAQ-9174, čiji je proizvođač National Instruments (NI), sastoji se iz baznog kućišta te upravljačkog sustava za komunikaciju s mjernim modulima. Moguće je povezivanje s dva tipa mjernih modula: NI 9214, namijenjenim za termoparove, i NI 9216, namijenjenim za otporničke osjetnike Pt100. U eksperimentalnom istraživanju korištena su dva NI 9214 modula, svaki od kojih sadrži 16 analognih kanala namijenjenih za precizna mjerenja malih razlika napona u milivoltima (mV), na koje se spajaju termoparovi. Na slici 3.3 je prikazan je korišteni akvizicijski sustav.

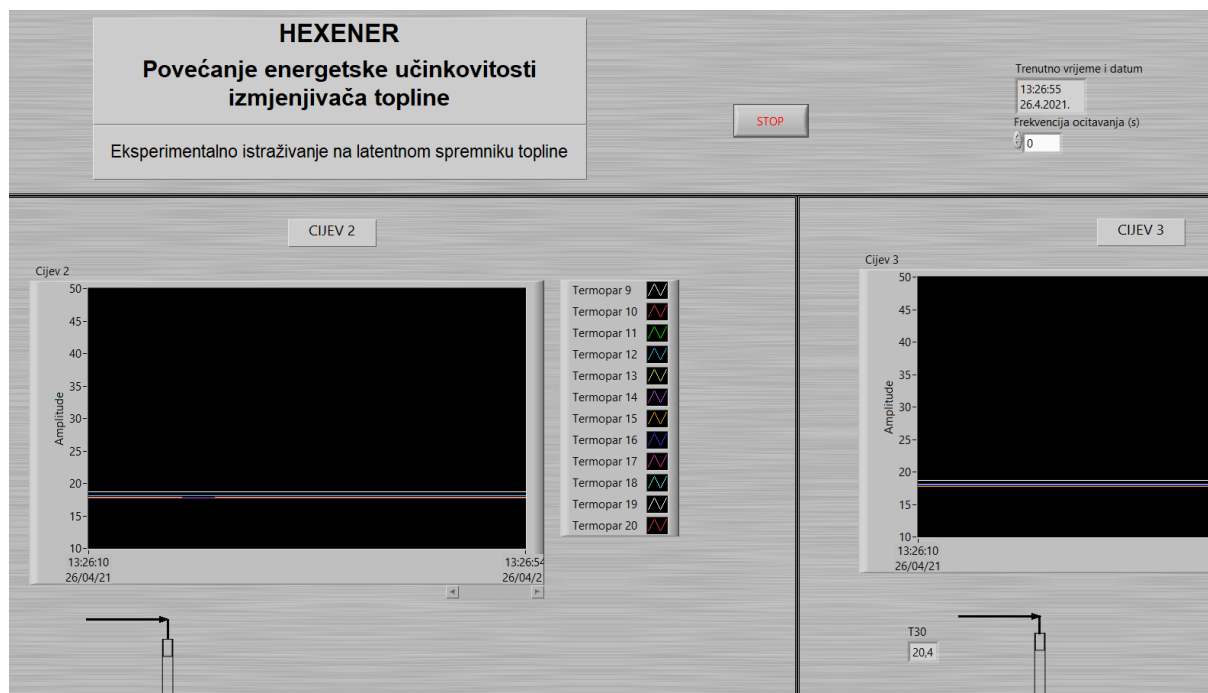


*Slika 3.3. Sustav za prikupljanje podataka, a) akvizicijska jedinica NI cDAQ-9174, b) modul za termoparove NI 9214*

### 3.2.3. Korisnička aplikacija za prikupljanje i obradu podataka

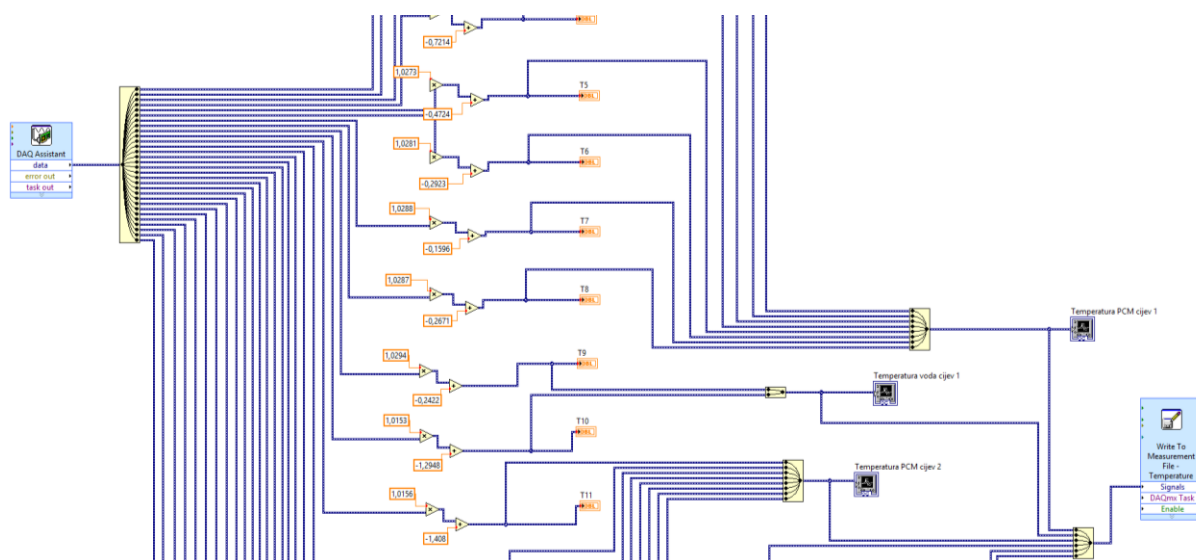
Na prijenosno računalo Hewlett Packard Pavilion postavljeni su računalni programi NI Measurement & Automation Explorer 17.0 i LabView 2015. Prvi navedeni program skup je upravljačkih programa pomoću kojih se uspostavlja veza između mjerne opreme (cDAQ-9174 s modulom NI 9214) i LabViewa te služi za definiranje njezinih karakteristika. LabView je računalni program za izradu virtualnih instrumenata i sustava upravljanja pomoću grafičkog programskog sučelja. Ondje je izrađena korisnička aplikacija za potrebe eksperimentalnog istraživanja. Aplikacija omogućuje praćenje i pohranu temperatura na ulazu i izlazu fluida prijenosnika topline, kao i na različitim pozicijama na strani akumulatora topline.

Sučelje razvijenog virtualnog instrumenta za mjerenje i pohranu temperatura akumulatora topline i fluida prijenosnika topline prikazano je na slici 3.4.



*Slika 3.4. Sučelje korisničke aplikacije razvijene u računalnom programu LabView*

Prikupljanje podataka za određeno mjerenje vrši se u skladu s definiranom frekvencijom očitavanja. Trenutne vrijednosti očitanih temperatura su prikazane u odgovarajućim poljima na zaslonu računala. Zbog dodatne preglednosti, temperature se za određeni vremenski raspon u realnom vremenu prikazuju u za to predviđenim dijagramima. Sve očitane vrijednosti zapisuju se u podatkovne datoteke programa Microsoft Excel radi kasnije obrade. Shematski prikaz dijela koda razvijene korisničke aplikacije je prikazan na slici 3.5.



Slika 3.5. Shematski prikaz dijela koda korisničke aplikacije razvijene u računalnom programu LabView

### 3.3. Analiza greške mjerenja

Neovisno o vrsti i kvaliteti mjernih osjetnika i opreme, svaki rezultat mjerenja doznaje se s određenom nesigurnošću, odnosno pogreškom. Za ispravno provođenje mjerenja te tumačenje izmjerenih podataka, potrebno je odrediti grešku mjerenja.

Pogreške u mjerenju mogu se podijeliti na sustavne i slučajne [65]. Sustavne mogu nastati zbog neispravnosti mjernih instrumenata, izbora pogrešne metode mjerenja, pogrešnog izvođenja mjerenja, utjecaja okoline itd. Slučajne pogreške javljaju se zbog nesavršenosti mjerne opreme i ljudske interpretacije rezultata, a prisutne su u svakom mjerenju. Uočavaju se kad ponovljena mjerenja u istim uvjetima pokazuju razlike u izmjerenim veličinama.

Mjerna nesigurnost dijeli se u dvije skupine: mjerna nesigurnost tipa A, koja se određuje statističkim metodama; i mjerna nesigurnost tipa B, koja se određuje ostalim (kombiniranim) metodama [66]. Ukupna nesigurnost  $u$  proizlazi iz zbroja ovih dvaju tipova nesigurnosti:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3.1)$$

Primjena mjerne nesigurnosti tipom A moguća je za veći broj provedenih mjerenja, pri čemu se mjerna nesigurnost određuje razdiobom učestalosti očitavanja mjerene veličine koja proizlazi iz ponavljanja mjerenja u istim uvjetima. Određivanje mjerne nesigurnosti tipa B najčešće se

provodi u slučaju nedostatnog broja mjerenja za procjenu nesigurnosti tipa A. Pritom se za određivanje mjerne nesigurnosti osim statističkog pristupa koriste drugi izvori podataka; podaci iz prethodnih mjerenja, podaci iz uputa mjernih uređaja i osjetnika, podaci iz priručnika i umjernica, podaci temeljeni na procjeni ili iskustvu poznavanja mjernog instrumenta itd.

Kod složene mjerne nesigurnosti pretpostavlja se matematički model ovisnosti mjerene veličine o drugim utjecajnim veličinama te iskustvena vjerojatnosna raspodjela nesigurnosti. Traženom se mjernom točnošću određuje koje su sve veličine utjecajne na mjerenu veličinu. Mjerenje ispitivanih veličina najčešće se vrši posredno, tako da je mjerena fizikalna veličina  $\Omega$  funkcija niza neovisnih mjerenih veličina  $(\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n)$ , vrijednost kojih se dobiva mjerenjem. Uzimajući u obzir procijenjene vrijednosti  $(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)$ , svaka od kojih ima vlastitu mjernu nesigurnost  $u(\psi_i)$ , može se odrediti  $\omega$ , procijenjena vrijednost mjerene veličine  $\Omega$ . Pretpostavlja se da je svaka procijenjena veličina ispravljena za vrijednost poznate sustavne pogreške. Apsolutnu nesigurnost mjernog rezultata  $u(\omega)$  moguće je procijeniti izrazom temeljenim na aproksimaciji prvim članom Taylorova reda:

$$u(\omega) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \omega}{\partial \psi_i} \right)^2 u^2(\psi_i)} \quad (3.2)$$

Parcijalne derivacije funkcije po pojedinim ulaznim veličinama još se nazivaju i koeficijenti osjetljivosti budući da pokazuju utjecaj pojedinačnih mjernih nesigurnosti na mjerni rezultat.

### 3.3.1. Umjeravanje osjetnika topline

Svi termoparovi izrađeni su od istog materijala i istog koluta žice, približno su jednake duljine te elektrootporno zavareni pa se može pretpostaviti jednaka brzina odziva. Postupak umjeravanja proveden je uranjanjem 32 termopara u vodenu kupku s mješalicom kako bi se osigurala jednolika raspodjela temperature. Umjeravanja su provedena za temperature 3, 10, 20, 30, 40 i 50 °C pomoću kontaktnog digitalnog termometra Parr 6775 koji služi kao mjerni etalon. Referentni termometar dio je sustava za kalorimetiranje i kao osjetnik temperature koristi termistorsku sondu razine točnosti  $\pm 0,1$  °C [68]. Vrijednosti izmjerenih temperatura prilikom umjeravanja termoparova prikazane su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Izmjerene temperature prilikom umjeravanja termoparova

<b>Osjetnik</b>	<b>Temperatura [°C]</b>					
Parr 6775	2,6	9,62	19,95	30,67	41,18	50,53
A-T <sub>1</sub>	3,48	10,64	20,94	31,53	42,17	51,37
A-T <sub>2</sub>	3,37	10,58	20,93	31,53	42,22	51,46
A-T <sub>3</sub>	3,48	10,65	20,96	31,54	42,20	51,36
A-T <sub>4</sub>	3,52	10,65	20,93	31,55	42,18	51,38
A-T <sub>5</sub>	3,49	10,64	20,92	31,53	42,15	51,37
A-T <sub>6</sub>	3,35	10,54	20,91	31,51	42,31	51,57
A-T <sub>7</sub>	3,43	10,63	20,93	31,58	42,18	51,38
A-T <sub>8</sub>	3,49	10,66	20,98	31,52	42,21	51,40
A-T <sub>9</sub>	3,53	10,55	20,92	31,56	42,32	51,59
B-T <sub>1</sub>	3,50	10,54	20,90	31,60	42,30	51,55
B-T <sub>2</sub>	3,59	10,78	21,08	31,57	42,32	51,51
B-T <sub>3</sub>	3,59	10,77	21,07	31,67	42,31	51,49
B-T <sub>4</sub>	3,46	10,64	21,02	31,66	42,40	51,69
B-T <sub>5</sub>	3,54	10,73	21,07	31,70	42,38	51,61
B-T <sub>6</sub>	3,54	10,72	21,06	31,70	42,36	51,56
B-T <sub>7</sub>	3,57	10,76	21,04	31,69	42,27	51,47
B-T <sub>8</sub>	3,42	10,63	20,95	31,63	42,18	51,35
B-T <sub>9</sub>	3,44	10,66	20,94	31,54	42,18	51,47
B-T <sub>IV</sub>	3,55	10,75	21,07	31,53	42,31	51,58
B-T <sub>V</sub>	3,57	10,75	21,04	31,66	42,30	51,56
B-T <sub>VI</sub>	3,50	10,73	21,04	31,64	42,28	51,57
C-T <sub>1</sub>	3,57	10,60	20,95	31,63	42,26	51,57
C-T <sub>2</sub>	3,47	10,64	20,94	31,58	42,19	51,44
C-T <sub>3</sub>	3,56	10,77	21,08	31,54	42,32	51,59
C-T <sub>4</sub>	3,48	10,69	21,05	31,67	42,36	51,61
C-T <sub>5</sub>	3,45	10,70	21,03	31,68	42,33	51,65
C-T <sub>6</sub>	3,55	10,59	20,94	31,66	42,26	51,56
C-T <sub>7</sub>	3,42	10,63	20,94	31,57	42,18	51,47
C-T <sub>8</sub>	3,43	10,63	20,92	31,54	42,16	51,31
C-T <sub>9</sub>	3,45	10,60	20,95	31,52	42,26	51,55
T <sub>HTF,ul</sub>	3,44	10,64	20,94	31,58	42,19	51,45
T <sub>HTF,iz</sub>	3,46	10,64	20,92	31,54	42,14	51,36

Iz tablice se može uočiti da najveće odstupanje izmjerenih temperatura od temperature etalona iznosi 1,18 °C. Sukladno odstupanjima, definirane su korekcijske funkcije temperatura za svaki termopar i unesene u korisničku aplikaciju sustava za prikupljanje i obradu podataka.

Potrebno je odrediti mjernu nesigurnost provedenih umjeravanja termoparova. Sustavnu pogrešku moguće je izračunati kao:

$$u_s = \sqrt{u_{s1}^2 + u_{s2}^2} \quad (3.3)$$

Pri tome  $u_{s1}$  predstavlja najveće odstupanje od temperature etalona, koje iznosi 1,183 °C, a  $u_{s2}$  mjernu nesigurnost zbog utjecaja zračenja i nestacionarnosti, koja se može procijeniti na 0,5% mjerene temperature [1], odnosno 0,253 °C pa proizlazi:

$$u_s = \sqrt{u_{s1}^2 + u_{s2}^2} = \sqrt{1,183^2 + 0,253^2} = 1,21 \text{ °C} \quad (3.4)$$

Slučajnu pogrešku moguće je odrediti kao:

$$u_n = \sqrt{u_{n1}^2 + u_{n2}^2} \quad (3.5)$$

Pri tome je  $u_{n1}$  standardna devijacija srednje vrijednosti, odnosno mjerna nesigurnost mjerenih temperatura zbog rasipanja definirana standardnom pogreškom, koja iznosi 0,018 °C, a  $u_{n2}$  mjerna nesigurnost etalona, preuzeta iz kataloga proizvođača referentnog termometra, iznosi 0,1 °C. Slijedi:

$$u_n = \sqrt{u_{n1}^2 + u_{n2}^2} = \sqrt{0,018^2 + 0,1^2} = 0,102 \text{ °C} \quad (3.6)$$

Ukupna mjerna nesigurnost mjerenja temperature termoparova iznosi:

$$u = \sqrt{u_s^2 + u_n^2} = \sqrt{1,21^2 + 0,102^2} = 1,214 \text{ °C} \quad (3.7)$$

Nakon unošenja korekcijskih funkcija u korisničku aplikaciju sustava za prikupljanje i obradu podataka, najveće odstupanje temperatura termoparova od temperature referentnog termometra iznosi 0,256 °C. Uzimajući u obzir prethodno usvojenu mjernu nesigurnost zbog utjecaja zračenja i nestacionarnosti 0,253 °C, slijedi vrijednost sustavne pogreške:

$$u = \sqrt{u_{s1}^2 + u_{s2}^2} = \sqrt{0,256^2 + 0,253^2} = 0,36 \text{ °C} \quad (3.8)$$

Mjerna nesigurnost mjerenih temperatura zbog rasipanja definirana standardnom pogreškom iznosi 0,012 °C, a mjerna nesigurnost etalona 0,1 °C. Slučajna pogreška u mjerenju temperatura nakon umjeravanja iznosi:

$$u = \sqrt{u_{n1}^2 + u_{n2}^2} = \sqrt{0,012^2 + 0,1^2} = 0,101 \text{ °C} \quad (3.9)$$

Ukupna mjerna nesigurnost mjerenja temperature termoparovima nakon umjeravanja iznosi:

$$u = \sqrt{u_s^2 + u_n^2} = \sqrt{0,36^2 + 0,101^2} = 0,374 \text{ °C} \quad (3.10)$$

### 3.3.2. Određivanje mjerne nesigurnosti izračunatih toplina i toplinskih učina

Provedenim eksperimentalnim istraživanjem na latentnom spremniku topline analizirane su akumulirane i predane topline ( $Q$ ) te srednji toplinski učini ( $\dot{Q}$ ) prilikom spremanja, odnosno korištenja topline u ovisnosti o različitim pogonskim uvjetima. Te se vrijednosti dobivaju preko poznatih vrijednosti temperatura ( $T$ ) i masenog protoka fluida prijenosnika topline ( $\dot{m}$ ), svake od kojih se doznaju s određenom mjernom nesigurnošću.

Mjerna nesigurnost mjerenja temperature može se izraziti i relativno, dijeljenjem dobivene mjerne nesigurnosti s temperaturnim rasponom mjerenja. Najveća relativna pogreška dobiva se za najmanju početnu razliku temperatura fluida prijenosnika topline i akumulatora topline, koja za provedeno istraživanje iznosi 24 °C. Najveća relativna mjerna nesigurnost iznosi:

$$\delta_T = \frac{u}{\Delta T} = \frac{0,374}{24} = 0,0156 = 1,56\% \quad (3.11)$$

Protok fluida prijenosnika topline kroz latentni spremnik topline regulira se cirkulacijskom pumpom, a njegova vrijednost mjeri ultrazvučnim protokomjerom razine točnosti  $\pm 1\%$ , sastavnim dijelom Kamstrupovog kalorimetra Multical 403 [68].

Navedene relativne mjerne nesigurnosti mogu se objediniti kako bi se dobila relativna mjerna nesigurnost izračunatih toplina, pri čemu je potrebno dva puta navesti relativnu mjernu nesigurnost temperatura budući se u izračunima toplina koriste ulazna i izlazna temperatura fluida prijenosnika topline. Analogno izrazu (3.2), slijedi:

$$\delta_Q = \sqrt{(\delta_T)^2 + (\delta_T)^2 + (\delta_m)^2} \quad (3.12)$$

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti proizlazi:

$$\delta_Q = \sqrt{(0,0156)^2 + (0,0156)^2 + (0,01)^2} = 0,024 = 2,4\% \quad (3.13)$$

### 3.4. Opis izvršenog mjerenja

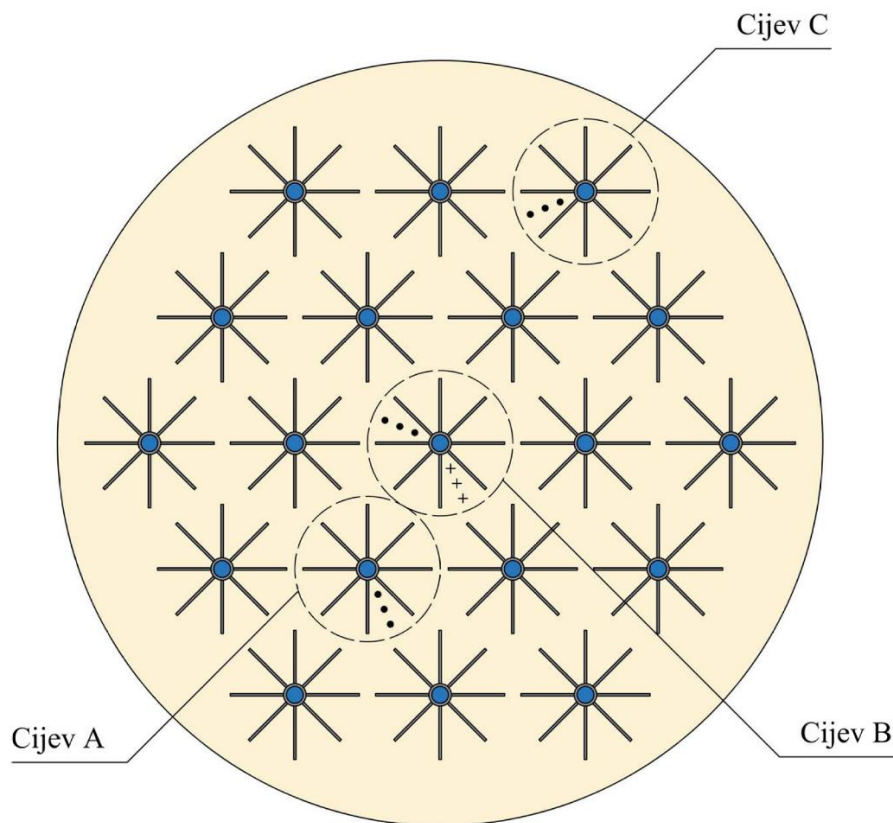
U ovom eksperimentalnom istraživanju kao fluid prijenosnik topline korištena je voda, koja se dobavlja iz toplog ili hladnog spremnika, ovisno o tome istražuje li se taljenje ili skrućivanje akumulatora topline. Voda struji kroz cijevi i u latentni spremnik topline ulazi na vrhu, a akumulator topline, Rubithermov tehnički parafin RT 25, ispunjava prostor oko cijevi. Svojstva parafina RT 25 prikazana su u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Fizikalna svojstva parafina RT 25 [69]

Svojstvo	RT 25
Temperaturni raspon promjene faze [°C]	22-26
Specifična latentna toplina [J/kg]	170000
Koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]	0,2
Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]	2000
Gustoća, krutina [kg/m <sup>3</sup> ]	880
Gustoća, kapljevinna [kg/m <sup>3</sup> ]	760

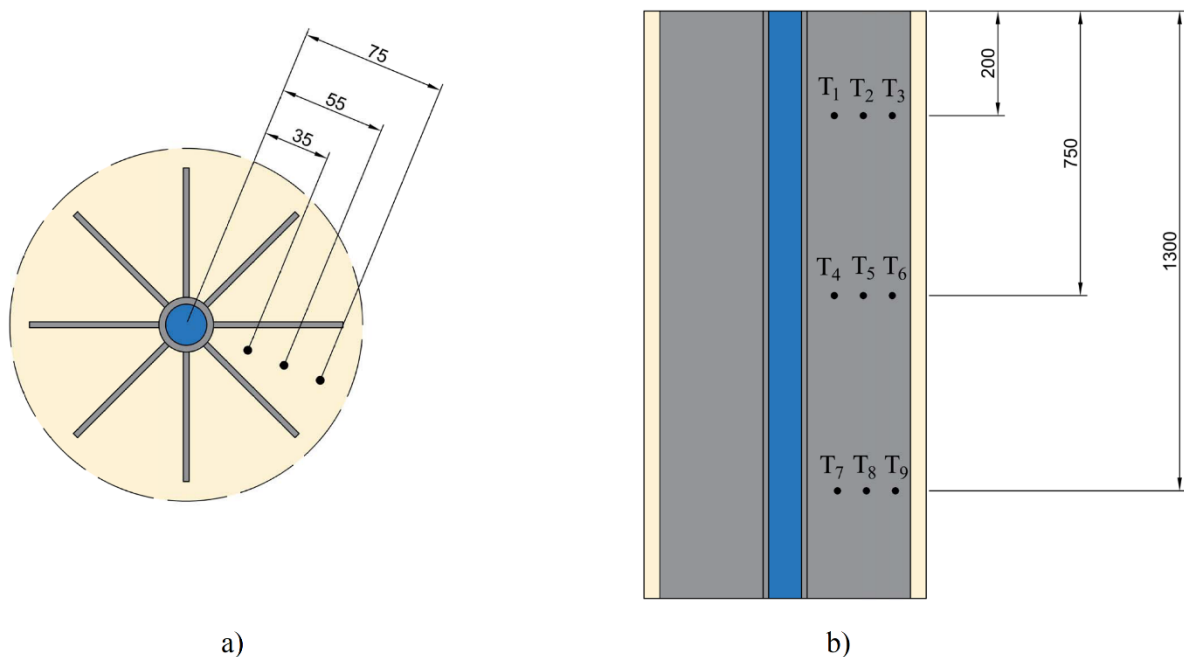


Protok vode kroz cijevi konstantan je tijekom provedenih mjerenja, a njegov iznos mjeri se ultrazvučnim protokomjerom navedenog kalorimetra. Temperatura vode na ulazu također je konstantna tijekom mjerenja, a regulira ju termostatski miješajući ventil. Mjerenje temperature vode i parafina provedeno je termoparovima tipa K. Unutar latentnog spremnika topline postavljeno je 30 termoparova na strani parafina oko triju karakterističnih cijevi; cijevi u manjem koncentričnom krugu (cijev A), središnje cijevi (cijev B) i cijevi u većem koncentričnom krugu, uz rub spremnika (cijev C). Oko svake cijevi postavljena su tri termopara u radijalnom smjeru na tri različite visine, formirajući mjerno polje  $3 \times 3$ . Preostala tri termopara (označena s +) postavljena su na srednju visinu središnje cijevi. Ispitivane cijevi te pozicije termoparova oko njih prikazane su na slici 3.6.



*Slika 3.6. Ispitivane cijevi unutar latentnog spremnika topline i pozicije termoparova oko njih*

Termoparovi su oko cijevi postavljeni na aksijalnim pozicijama (visinama) 0,2 m, 0,75 m i 1,3 m u odnosu na ulaz vode, a na svakoj visini tri radijalne pozicije nalaze se na radijalnim udaljenostima 0,035 m, 0,055 m te 0,075 m od središta cijevi. Pozicije i nomenklatura temperaturnih osjetnika oko jedne cijevi prikazani su na slici 3.7 u tlocrtu i uzdužnom presjeku te u tablici 3.3.

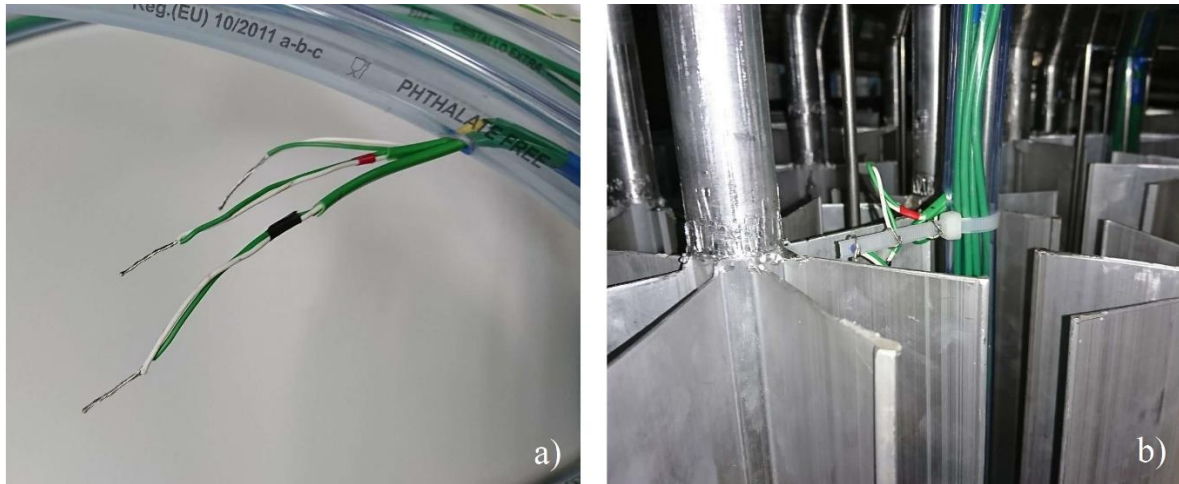


*Slika 3.7. Pozicije i nomenklatura termoparova na strani akumulatora topline oko jedne cijevi latentnog spremnika topline, a) tlocrt, b) uzdužni presjek cijevi i okolnog akumulatora topline*

*Tablica 3.3. Aksijalne i radijalne pozicije termoparova na strani akumulatora topline oko jedne cijevi prilikom eksperimentalnih istraživanja na latentnom spremniku topline*

<b>Mjerna pozicija</b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>4</sub></b>	<b>T<sub>5</sub></b>	<b>T<sub>6</sub></b>	<b>T<sub>7</sub></b>	<b>T<sub>8</sub></b>	<b>T<sub>9</sub></b>
Aksijalna pozicija [m]	0,2	0,2	0,2	0,75	0,75	0,75	1,3	1,3	1,3
Radijalna pozicija [m]	0,035	0,055	0,075	0,035	0,055	0,075	0,035	0,055	0,075

Termoparovi B-T<sub>IV</sub>, B-T<sub>V</sub> i B-T<sub>VI</sub> označavaju dodatne mjerne pozicije na srednjoj visini središnje cijevi B. Termoparovi za pojedine cijevi postavljeni su u gumenu fleksibilnu cijev, koja je potom u latentni spremnik topline sprovedena pomoću za to predviđene čelične šipke. Termoparovi su na karakterističnim visinama izvučeni iz gumene cijevi te na odgovarajuće radijalne pozicije učvršćeni plastičnim vezicama. Postavljeni termoparovi unutar latentnog spremnika topline prikazani su na slici 3.8. Dva dodatna termopara postavljena su na ulaz i izlaz vode, unutar čahura na polaznom, odnosno povratnom vodu.



*Slika 3.8. Postavljanje mjernih osjetnika u latentni spremnik topline, a) termoparovi u gumenoj cijevi, b) termoparovi učvršćeni plastičnim vezicama na pozicijama oko cijevi*

Termoparovi su spojeni na sustav za prikupljanje i obradu podataka te povezani s osobnim računalom HP Pavilion. Rezultati mjerenja prikupljaju se i bilježe u intervalima od 10 s pomoću korisničke aplikacije razvijene u programu LabView prilikom taljenja i skrućivanja parafina.

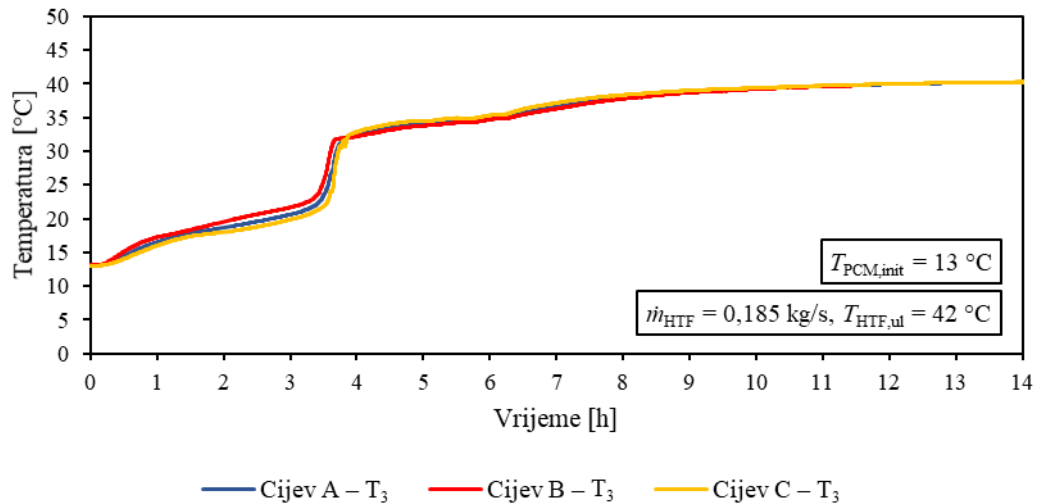
#### 3.4.1. Taljenje akumulatora topline

Eksperimentalna istraživanja prilikom taljenja parafina započela su pri jednolikoj temperaturi, nižoj od njegova tališta. Jednolika temperatura unutar latentnog spremnika topline postignuta je strujanjem vode iz hladnog spremnika kroz cijevi do postizanja toplinske ravnoteže unutar akumulatora topline. Potom je kroz cijevi uspostavljeno strujanje vode iz toplog spremnika, koja u latentni spremnik topline ulazi s konstantnom temperaturom i protokom, te započinje mjerenje i pohranjivanje podataka. Temperature sa svih termoparova, smještenih unutar parafina te na ulazu i izlazu vode, očitavaju se svakih 10 s te zapisuju u odgovarajuću datoteku na računalu. Prikupljanje podataka zaustavlja se nakon što je parafin potpuno rastaljen i svi termoparovi pokazuju slične vrijednosti temperatura, malo ispod ulazne temperature vode.

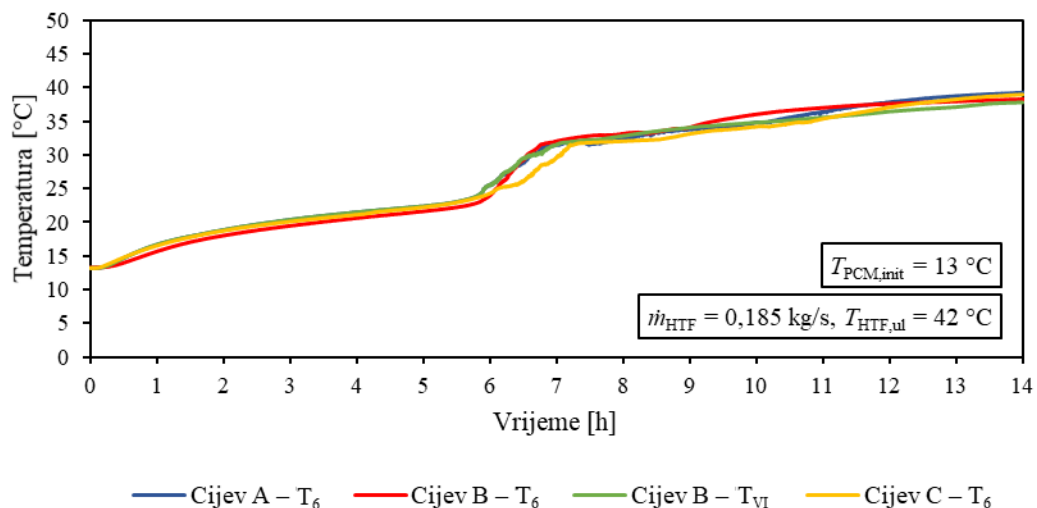
Proveden je niz mjerenja prilikom taljenja parafina za različite protoke ( $\dot{m}_{HTF}$ ) i ulazne temperature vode ( $T_{HTF,ul}$ ) u rasponu od 0,185 do 0,294 kg/s, odnosno od 37 do 42 °C.

Vremenske promjene temperatura parafina za ekvivalentne pozicije promatranih cijevi pokazuju slične rezultate, a kao primjer, na slikama 3.9 i 3.10 prikazane su promjene temperatura na mjernim pozicijama T<sub>3</sub> (aksijalna pozicija 0,2 m i radijalna pozicija 0,075 m) i

$T_6$  (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,075 m) na cijevima A, B i C. Mjerenje je vršeno uz protok vode 0,185 kg/s, pri čemu ulazna brzina u jednu cijev iznosi 0,02 m/s, i ulaznu temperaturu vode 42 °C. Početna temperatura parafina ( $T_{PCM,init}$ ) iznosila je 13 °C.



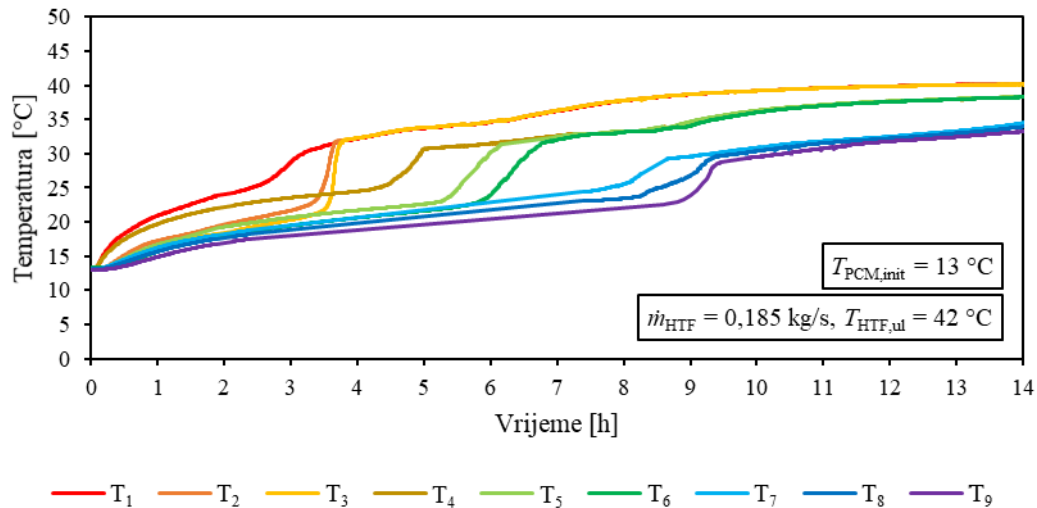
Slika 3.9. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji  $T_3$  dobivene eksperimentalnim mjerenjima na različitim cijevima



Slika 3.10. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji  $T_6$  dobivene eksperimentalnim mjerenjima na različitim cijevima

Sa slika se može uočiti podjednaka vremenska promjena temperatura parafina za ekvivalentne pozicije na promatranim cijevima. Zbog prikazane sličnosti i preglednosti rezultata, u daljnjim

razmatranjima procesa taljenja (spremanja topline) prikazane su promjene temperatura parafina dobivene mjerenjima oko jedne cijevi. Vremenske promjene temperatura parafina oko središnje cijevi B u definiranom mjernom polju za protok vode 0,185 kg/s i ulaznu temperaturu vode 42 °C prikazane su na slici 3.11.



Slika 3.11. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja oko središnje cijevi B dobivene eksperimentalnim mjerenjima u definiranom mjernom polju

Sa slike se može uočiti da se taljenje odvija slično za sve ispitivane pozicije; parafin u krutom stanju zagrijava se od početne temperature do donje temperature taljenja (temperatura solidusa), nakon čega se tali unutar temperaturnog raspona, pri čemu akumulira latentnu toplinu do postizanja gornje temperature taljenja (temperatura likvidusa). Nakon što je parafin potpuno rastaljen, uočava se intenzivnije povećanje temperature, odnosno zagrijavanje kapljevito parafina.

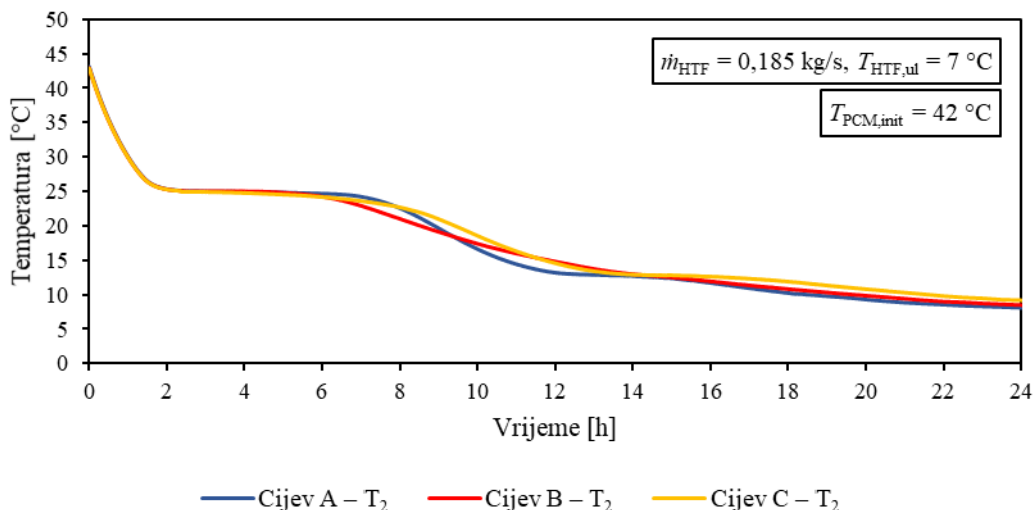
Sa slike se također može uočiti da je proces taljenja brži na gornjim aksijalnim pozicijama te na radijalnim pozicijama najbliže cijevi. Budući da voda u latentni spremnik topline ulazi pri vrhu, ondje je prisutna najveća razlika temperatura vode i akumulatora topline. Također, u kapljevitoj fazi akumulatora topline prisutna je slobodna konvekcija, uzgonsko gibanje rastaljenih čestica parafina koje nastaje razlikom gustoća i pokretano je razlikom temperatura. Nastaje unutar kapljevito sloja koji se formira uz stijenku te napreduje s povećanjem količine rastaljenog akumulatora topline. Slobodna konvekcija poboljšava izmjenu topline, a njezin utjecaj također je jači na vrhu spremnika te uz cijev, zbog čega se parafin najprije rastali upravo na tim pozicijama. Akumulator topline potpuno se rastali unutar 4 h na gornjim aksijalnim

pozicijama. Na srednjim aksijalnim pozicijama, taljenje završava unutar 6 h, dok se na donjim aksijalnim pozicijama akumulator topline rastali unutar 9 h. Nakon što je akumulator topline potpuno rastaljen na svim mjernim pozicijama i njegova se temperatura približava ulaznoj temperaturi vode, mjerenje je završeno.

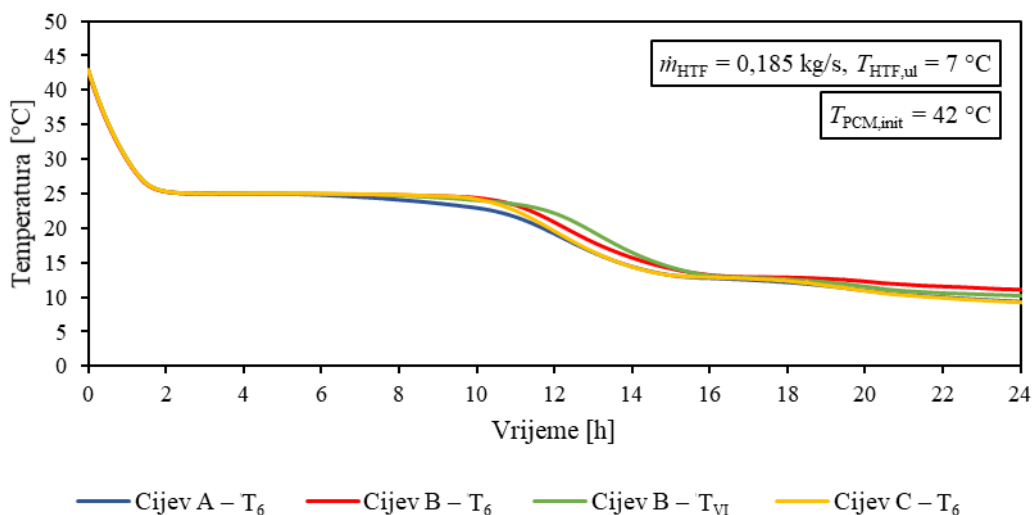
### 3.4.2. Skrućivanje akumulatora topline

Početni uvjeti eksperimentalnih istraživanja prilikom skrućivanja parafina uspostavljeni su na sličan način kao u slučaju taljenja; jednolika temperatura, viša od tališta akumulatora topline, postignuta je strujanjem vode iz toplog spremnika kroz cijevi do postizanja toplinske ravnoteže unutar latentnog spremnika topline. Nakon toga je kroz cijevi uspostavljeno strujanje vode iz hladnog spremnika, također uz konstantnu ulaznu temperaturu i protok, i započinje prikupljanje mjerenih veličina. Temperature parafina i vode bilježe se i pohranjuju u datoteku na računalu u istim intervalima kao u eksperimentalnim analizama spremanja topline. Mjerenje završava nakon potpunog skrućivanja parafina i nakon što svi termoparovi pokazuju slične temperature, malo iznad ulazne temperature vode.

Niz mjerenja prilikom skrućivanja parafina proveden je za različite protoke ( $\dot{m}_{\text{HTF}}$ ) i ulazne temperature vode ( $T_{\text{HTF,ul}}$ ), u rasponu od 0,185 do 0,294 kg/s, odnosno od 7 do 13 °C. Kao i u slučaju taljenja, vremenske promjene temperatura parafina za ekvivalentne pozicije promatranih cijevi pokazuju slične rezultate, a kao primjer dane su promjene temperatura na mjernim pozicijama  $T_2$  (aksijalna pozicija 0,2 m i radijalna pozicija 0,055 m) i  $T_6$  (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,075 m) na cijevima A, B i C te prikazane na slikama 3.12 i 3.13. Mjerenje je provedeno uz protok vode 0,185 kg/s, pri čemu ulazna brzina u jednu cijev iznosi 0,02 m/s, i ulaznu temperaturu vode 7 °C. Početna temperatura parafina ( $T_{\text{PCM,init}}$ ) bila je 42 °C.

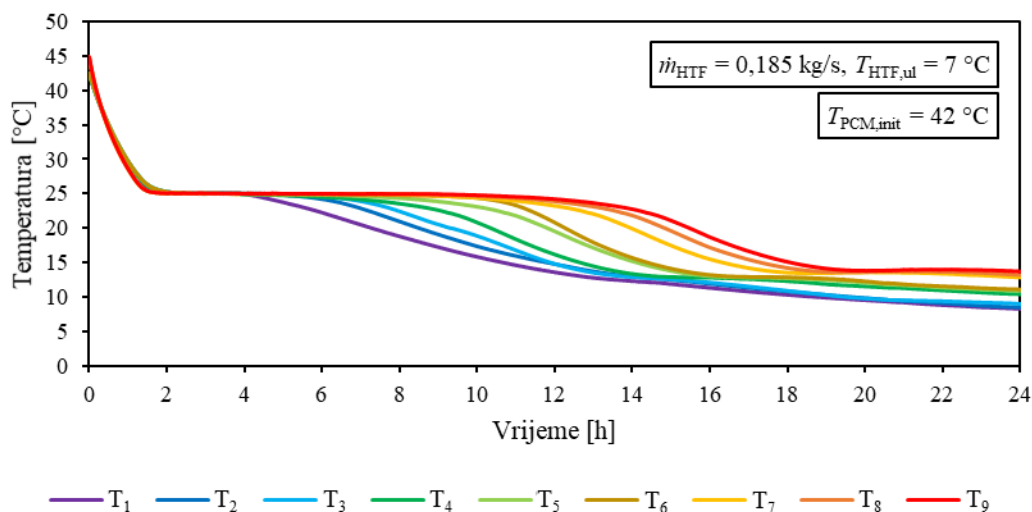


Slika 3.12. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja na poziciji  $T_2$  dobivene eksperimentalnim mjerenjima na različitim cijevima



Slika 3.13. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja na poziciji  $T_6$  dobivene eksperimentalnim mjerenjima na različitim cijevima

Sa slika je vidljiva približno jednaka vremenska promjena temperatura akumulatora topline za ekvivalentne pozicije na promatranim cijevima. U daljnjim prikazima rezultata procesa skrućivanja (korištenja topline) prikazane su promjene temperatura akumulatora topline oko jedne cijevi. Za protok vode 0,185 kg/s i ulaznu temperaturu vode 7 °C, na slici 3.14 prikazane su vremenske promjene temperatura akumulatora topline u definiranom mjernom polju oko središnje cijevi B.



Slika 3.14. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja oko središnje cijevi B dobivene eksperimentalnim mjerenjima u definiranom mjernom polju

Iz prikazanih rezultata može se uočiti da je proces skrućivanja gotovo potpuno izoterman i odvija se na temperaturi od približno 25 °C. Na početku procesa toplina se oduzima kapljevito parafinu i predaje vodi, što se očituje smanjenjem temperature na svim mjernim pozicijama. Dok je akumulator topline u kapljevito stanju, prisutna je slobodna konvekcija koja poboljšava izmjenu topline i doprinosi ujednačenom smanjenju temperature parafina unutar latentnog spremnika topline. Nakon što je postignuta temperatura promjene faze, započinje proces skrućivanja na približno konstantnoj temperaturi pri čemu se oslobađa latentna toplina akumulatora topline i predaje fluidu prijenosniku topline. Nakon što akumulator topline preda svu latentnu toplinu, završava proces skrućivanja i uočava se naglije smanjenje njegove temperature, što predstavlja oslobađanje osjetne topline krutog parafina.

Također je vidljivo da je, zbog najveće početne razlike temperatura između vode i parafina, proces skrućivanja najbrži na gornjim aksijalnim pozicijama. Usporedbom promjena temperatura za iste aksijalne pozicije, vidljivo je da je akumulator topline najprije skrućen na radijalnim pozicijama najbližima cijevi. Na gornjim aksijalnim pozicijama, parafin je potpuno skrućen unutar 7 h. Na srednjim aksijalnim pozicijama, skrućivanje završava unutar 11 h, dok se na donjim aksijalnim pozicijama parafin skruti unutar 15 h. Nakon što je akumulator topline u latentnom spremniku topline potpuno skrućen i njegova temperatura se približava ulaznoj temperaturi fluida prijenosnika topline, mjerenje se zaustavlja.



## 4. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ANALIZA

U sklopu eksperimentalnih istraživanja na latentnom spremniku topline izvršen je niz eksperimenata taljenja i skrućivanja akumulatora topline. Provedenim eksperimentalnim analizama istražen je utjecaj protoka i ulazne temperature fluida prijenosnika topline na izmjenu topline unutar latentnog spremnika topline, odnosno spremanje i korištenje topline. Eksperimentalna mjerenja taljenja i skrućivanja akumulatora topline provedena su za različite masene protoke i ulazne temperature fluida prijenosnika topline. Pri razmatranjima utjecaja pogonskih uvjeta pri taljenju i skrućivanju parafina, prikazane su promjene temperatura u vremenu za odabrane mjerne pozicije na strani parafina te na izlazu vode. Također, izračunate su i prikazane vremenske promjene akumulirane, odnosno predane topline za provedena mjerenja te srednji toplinski učini spremanja, odnosno korištenja topline za analizirane slučajeve. Akumulirana/predana toplina računa se prema izrazu:

$$Q = \pm \sum_i^n \dot{m}_{\text{HTF}} \cdot c_{\text{HTF}} \cdot (T_{\text{HTF,ul}} - T_{\text{HTF,iz}}) \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

Pri tome je  $\dot{m}_{\text{HTF}}$  [kg/s] maseni protok fluida prijenosnika topline,  $c_{\text{HTF}}$  [J/kgK] označava njegov specifični toplinski kapacitet,  $T_{\text{HTF,ul}}$  i  $T_{\text{HTF,iz}}$  [°C] su ulazna, odnosno izlazna temperatura fluida prijenosnika topline u, odnosno iz latentnog spremnika topline u trenutnom vremenskom koraku, a  $\Delta t$  [s] označava vremenski korak, odnosno interval zapisivanja rezultata mjerenja. Pri računanju akumuliranih toplina, koristi se razlika ulazne i izlazne temperature fluida prijenosnika topline, a pri računanju predanih toplina, koristi se razlika izlazne i ulazne temperature fluida.

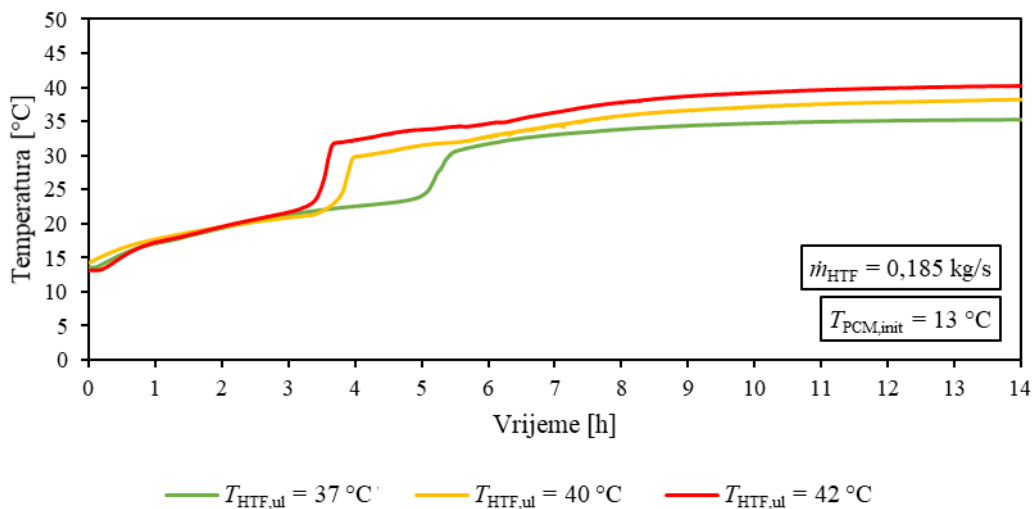
Srednji toplinski učin spremanja, odnosno korištenja topline moguće je odrediti dijeljenjem ukupne akumulirane/predane količine topline s ukupnim vremenom trajanja procesa  $t$  [s]:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (4.2)$$

#### 4.1. Analiza utjecaja ulazne temperature fluida prijenosnika topline na proces spremanja topline

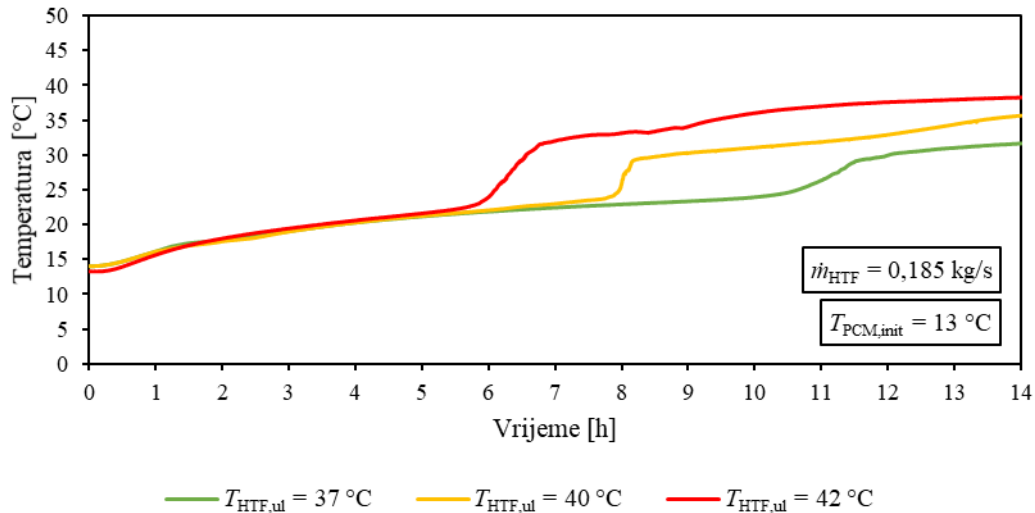
Proveden je niz mjerenja pri taljenju akumulatora topline za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline. Pri svakom ispitivanju protok fluida bio je konstantan i iznosio je 0,185 kg/s. Mjerenja su provedena za ulazne temperature vode 37, 40 i 42 °C.

Na slici 4.1 prikazane su vremenske promjene temperatura akumulatora topline na mjernoj poziciji T<sub>2</sub> (aksijalna pozicija 0,2 m i radijalna pozicija 0,055 m) za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline.



*Slika 4.1. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>2</sub> za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*

Na slici 4.2 prikazane su vremenske promjene temperatura akumulatora topline na mjernoj poziciji T<sub>6</sub> (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,075 m) za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline.

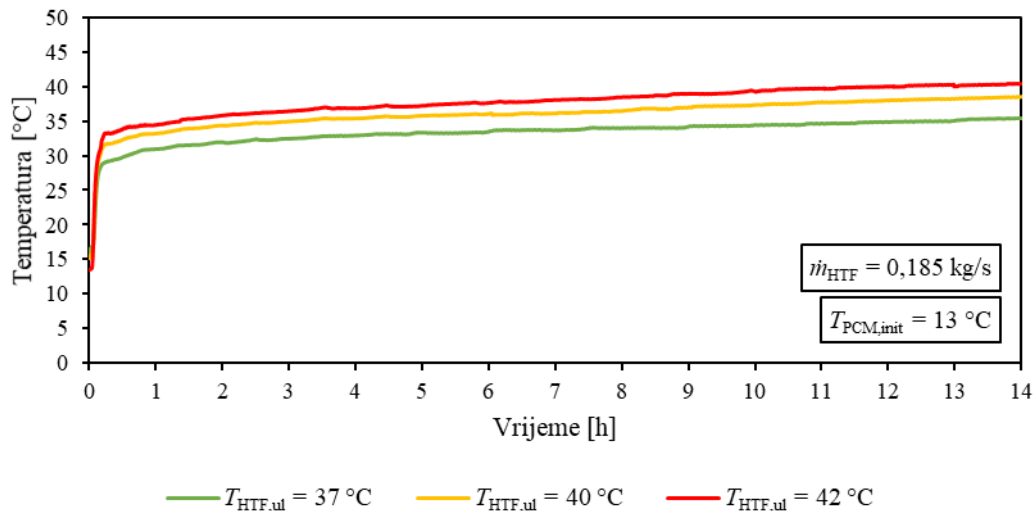


*Slika 4.2. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji  $T_6$  za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*

Sa slika se može uočiti značajan utjecaj ulazne temperature fluida prijenosnika topline na izmjenu topline pri spremanju topline. Veća razlika temperatura fluida prijenosnika topline i akumulatora topline rezultira većim toplinskim tokom, odnosno intenzivnijom izmjenom topline, pa se na promatranim mjernim pozicijama parafin najprije rastali pri ulaznoj temperaturi vode 42 °C. Utjecaj povećanja ulazne temperature vode na obje promatrane pozicije najmanje je prisutan u početnoj fazi procesa, dok je parafin u krutom stanju te na početku taljenja, dok se toplina pretežno izmijenjuje provođenjem. Razlika u promjenama temperatura najviše se očituje u završnoj fazi taljenja, gdje kao mehanizam izmjene topline prevladava slobodna konvekcija i u akumulator topline se pohranjuje latentni dio topline. Utjecaj slobodne konvekcije, intenzivniji pri vrhu latentnog spremnika topline, dodatno pojačava i pozicija ulaza fluida prijenosnika topline pa se parafin najprije rastali na gornjim mjernim pozicijama. Na mjernoj poziciji  $T_2$ , akumulator topline rastali se za približno 5,5 h u slučaju s ulaznom temperaturom fluida prijenosnika topline 37 °C, a u slučaju s ulaznom temperaturom fluida 40 °C, akumulator topline rastaljen je za približno 4 h. Kad je ulazna temperatura vode 42 °C, akumulator topline rastaljen je za približno 3,5 h na istoj mjernoj poziciji. Na mjernoj poziciji  $T_6$ , akumulator topline rastali se za približno 10,5 h kad je ulazna temperatura fluida prijenosnika topline 37 °C. Kad je ulazna temperatura fluida 40 °C, akumulator topline se na istoj mjernoj poziciji rastali za približno 8 h, a uz ulaznu temperaturu fluida prijenosnika topline 42 °C, akumulator topline rastali se za približno 6 h. Nakon što je parafin potpuno rastaljen,

njegova se temperatura povećava i približava ulaznoj temperaturi vode za promatrane slučajeve na svim mjernim pozicijama.

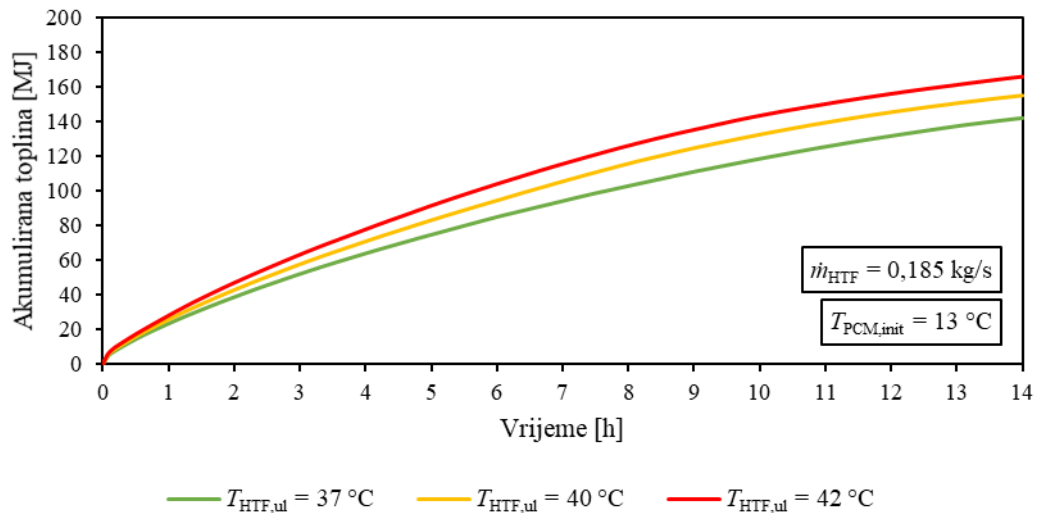
Na slici 4.3 prikazane su izlazne temperature vode za različite ulazne temperature vode prilikom spremanja topline.



*Slika 4.3. Vremenske promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*

Vidljivo je da veća ulazna temperatura fluida prijenosnika temperatura rezultira većim izlaznim temperaturama fluida u cjelokupnom trajanju procesa spremanja topline. Povećanjem ulazne temperature povećava se razlika temperatura između fluida prijenosnika topline i akumulatora topline te poboljšava izmjena topline. Na samom početku procesa, kad je razlika temperatura vode i parafina najveća, izmjena topline je najintenzivnija, nakon čega se izlazna temperatura ubrzano povećava u svim promatranim slučajevima. Izmjena topline između vode i parafina usporava se nakon što sloj akumulatora topline uz stijenku postigne temperaturu približnu ulaznoj temperaturi fluida budući da je izmjena topline prema dubljim slojevima parafina otežana zbog njegove male toplinske vodljivosti. Do kraja procesa povećanje izlaznih temperatura vode gotovo je linearno i one se približavaju ulaznim temperaturama vode.

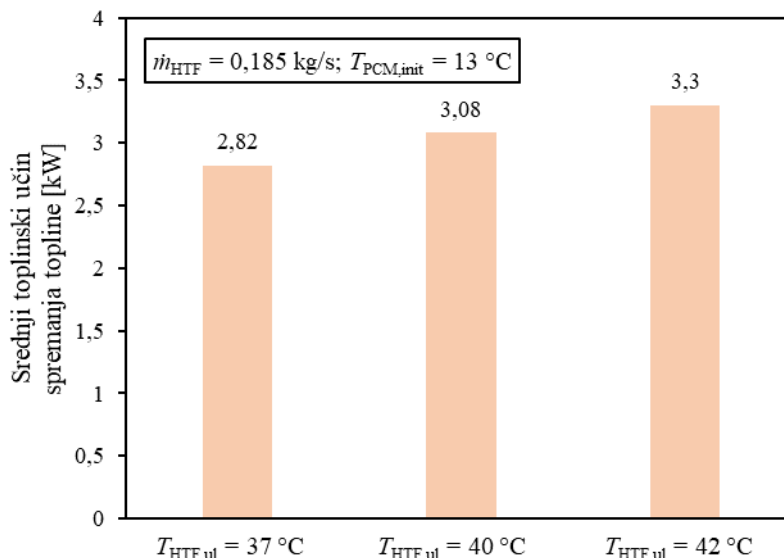
Na slici 4.4 prikazana je usporedba akumuliranih toplina u vremenu prilikom taljenja akumulatora topline (spremanja topline) za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline.



*Slika 4.4. Vremenske promjene akumuliranih toplina prilikom spremanja topline dobivene rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*

Sa slike se može uočiti da se povećanjem ulazne temperature vode povećava i količina spremljene topline budući da kapacitet latentnog spremnika topline za spremanje topline izravno ovisi o razlici temperatura vode i parafina. Za vrijeme trajanja mjerenja najviše topline akumulirano je za slučaj najveće ulazne temperature vode, 42 °C. Na početku procesa spremanja topline, toplina se akumulira podjednako brzinom u svim analiziranim slučajevima, analogno prikazanim vremenskim promjenama temperatura parafina u početnim fazama procesa. Kako proces odmiče, povećava se razlika u akumuliranim toplinama. U razdoblju spremanja topline od 14 h, uz ulaznu temperaturu vode 37 °C latentni spremnik topline akumulira 142,3 MJ topline. Pri ulaznoj temperaturi vode 40 °C akumulira se 155,2 MJ, a pri ulaznoj temperaturi vode 42 °C akumulira se 166,2 MJ za isto vrijeme spremanja topline.

Na slici 4.5 prikazana je usporedba srednjih toplinskih učina spremanja topline za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline.



*Slika 4.5. Usporedba srednjih toplinskih učina spremanja topline dobivenih rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*

Sa slike se vidi povećanje srednjeg toplinskog učina spremanja topline povećanjem ulazne temperature fluida prijenosnika topline, što je u skladu s ostalim prikazanim rezultatima. Za ulaznu temperaturu 37 °C on iznosi 2,82 kW, za ulaznu temperaturu 40 °C srednji toplinski učin iznosi 3,08 kW, a za ulaznu temperaturu 42 °C učin je 3,3 kW.

Za ulaznu temperaturu 40 °C, akumulirana toplina u vremenu spremanja topline od 14 h i srednji toplinski učin spremanja topline veći su za 9,1% u odnosu na slučaj s ulaznom temperaturom 37 °C, a za ulaznu temperaturu 42 °C povećanje iznosi 16,9% u odnosu na akumuliranu toplinu i toplinski učin spremanja topline kad je ulazna temperatura vode 37 °C.

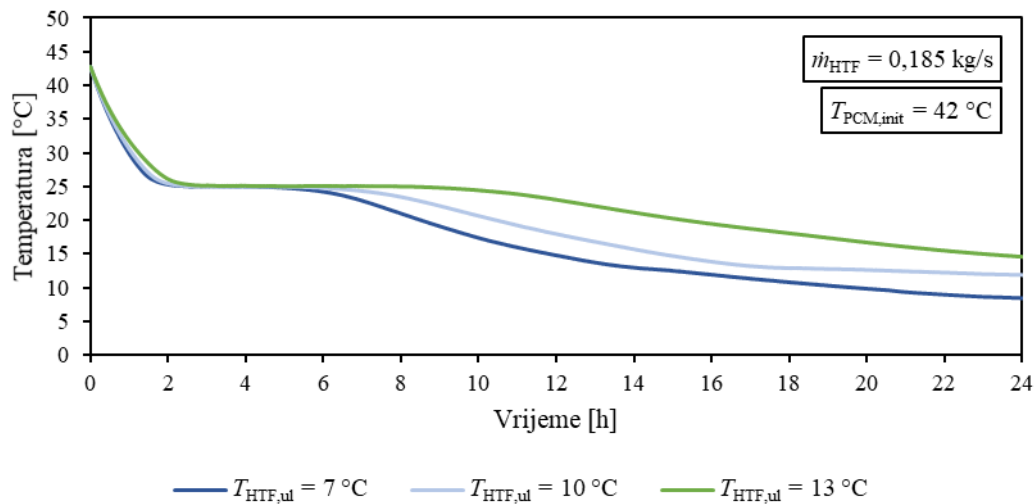
Iz prikazanih i analiziranih rezultata može se zaključiti da povećanje ulazne temperature fluida prijenosnika topline znatno utječe na poboljšanje izmjene topline prilikom spremanja topline u latentnom spremniku topline.

#### **4.2. Analiza utjecaja ulazne temperature fluida prijenosnika topline na proces korištenja topline**

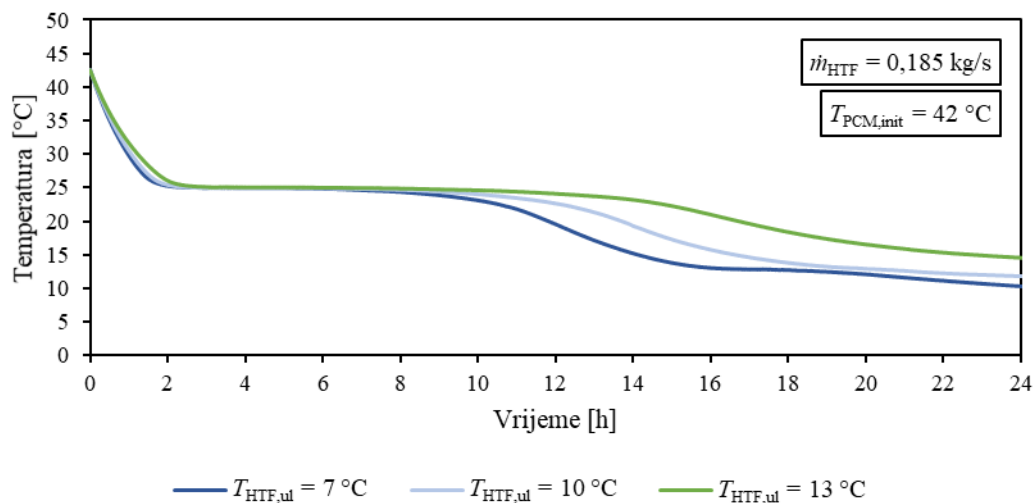
Niz mjerenja pri skrućivanju akumulatora topline (korištenju topline) proveden je za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline. Protok fluida je pri svakom ispitivanju bio

konstantan i iznosio je 0,185 kg/s. Eksperimentalna mjerenja izvršena su za ulazne temperature vode 7, 10 i 13 °C.

Na slikama 4.6 i 4.7 prikazane su vremenske promjene temperatura parafina na mjernim pozicijama T<sub>2</sub> (aksijalna pozicija 0,2 m i radijalna pozicija 0,055 m), odnosno T<sub>5</sub> (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,055 m) za različite ulazne temperature vode.



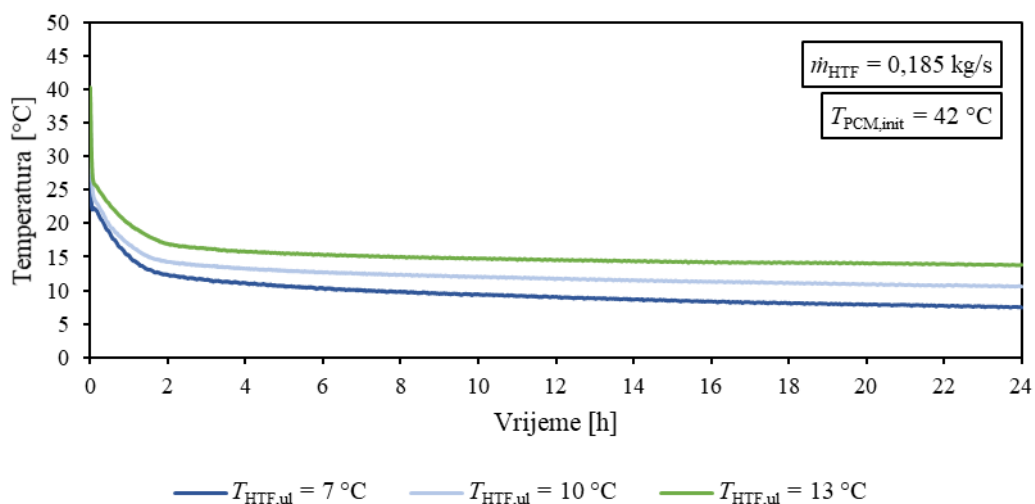
*Slika 4.6. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>2</sub> za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*



*Slika 4.7. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>5</sub> za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*

Sa slika se uočava značajan utjecaj ulazne temperature vode na izmjenu topline pri korištenju topline. Izmjena topline intenzivnija je pri većim razlikama temperatura vode i parafina pa je na obje promatrane mjerne pozicije parafin najprije skrućen pri ulaznoj temperaturi vode 7 °C. Dok je akumulator topline potpuno rastaljen, na samom početku procesa korištenja topline, vidljivo je podjednako intenzivno smanjenje temperature na svim mjernim pozicijama za sve slučajeve ulaznih temperatura vode. U toj je fazi procesa u kapljevitom akumulatoru topline prisutna slobodna konvekcija koja doprinosi intenzivnijoj izmjeni topline. Na temperaturi od približno 25 °C započinje gotovo izoterman proces skrućivanja. Kako odmiče proces skrućivanja, utjecaj slobodne konvekcije sve je manji i naposljetku nestaje, a izmjena topline odvija se samo provođenjem topline. Najveća razlika u vremenskim promjenama temperatura parafina vidljiva je prilikom izmjene latentne topline, odnosno u trajanju procesa skrućivanja. Na mornoj poziciji T<sub>2</sub>, parafin se skruti za približno 6,5 h kad je ulazna temperatura vode 7 °C, odnosno za približno 7,5 h kad je ulazna temperatura vode 10 °C te za približno 11 h kad je ulazna temperatura vode 13 °C. Na mornoj poziciji T<sub>6</sub>, parafin je skrućen za približno 10 h u slučaju s ulaznom temperaturom vode 7 °C, odnosno za približno 12 h slučaju s ulaznom temperaturom vode 10 °C te za približno 15 h u slučaju s ulaznom temperaturom vode 13 °C. Nakon završetka skrućivanja, parafin predaje osjetnu toplinu i njegova temperatura približava se ulaznoj temperaturi vode u analiziranim slučajevima na promatranim pozicijama.

Izlazne temperature vode za različite ulazne temperature vode prilikom korištenja topline prikazane su na slici 4.8.

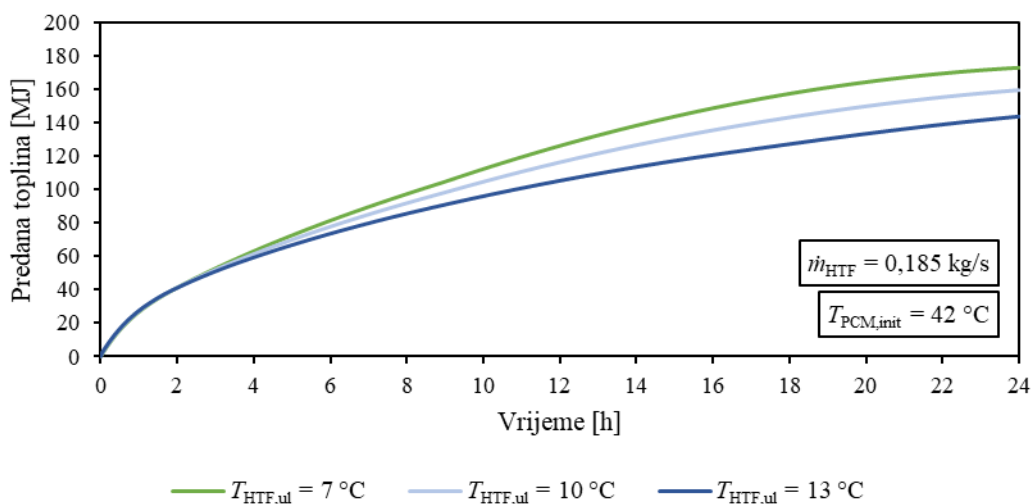


*Slika 4.8. Vremenske promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*



Sa slike se može uočiti da se manje izlazne temperature vode postižu pri njezinim manjim ulaznim temperaturama za vrijeme cjelokupnog trajanja procesa korištenja topline. Smanjenjem ulazne temperature povećava se razlika temperatura između vode i parafina čime se poboljšava izmjena topline. U početnoj fazi procesa izlazne temperature vode se ubrzano smanjuju, a najveće smanjenje prisutno je u slučaju s najmanjom ulaznom temperaturom, 7 °C, budući da je u tom slučaju početna razlika temperatura fluida i akumulatora topline najveća. Nakon što sloj parafina uz stijenku postigne temperaturu približno jednaku ulaznoj temperaturi vode, izmjena topline u svim razmatranim slučajevima znatno usporava zbog slabog prijenosa topline u radijalnom smjeru uzrokovanog malom toplinskom vodljivošću parafina. Temperature vode do kraja procesa mijenjaju se polagano i gotovo linearno, približavajući se svojim ulaznim vrijednostima.

Usporedba vremenskih promjena predanih toplina prilikom korištenja topline za različite ulazne temperature vode dana je na slici 4.9.

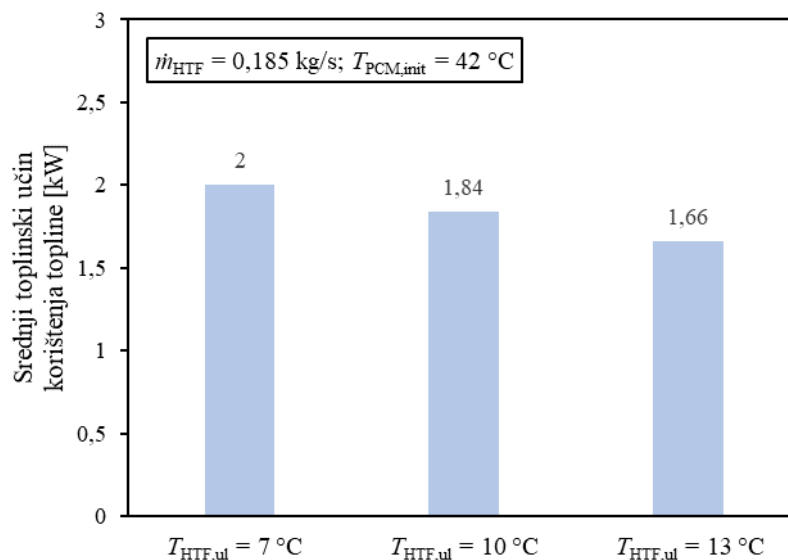


*Slika 4.9. Vremenske promjene predanih toplina prilikom korištenja topline dobivene rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*

Vidljivo je da manja ulazna temperatura fluida prijenosnika topline rezultira većom količinom predane topline budući da se povećanjem razlike temperatura vode i parafina povećava kapacitet latentnog spremnika topline za predaju topline. Također, uz veću početnu razliku temperatura postiže se veći toplinski tok. Sukladno tome, najveća količina toplina predaje se za slučaj s najmanjom ulaznom temperaturom fluida prijenosnika topline, 7 °C. Zbog velike

početne razlike u temperaturi vode i parafina te utjecaja slobodne konvekcije u kapljevitom parafinu, proces predaje topline u početku se odvija podjednako u svim analiziranim slučajevima. Male razlike u predanim toplinama na početku procesa u skladu su s prethodno prikazanim vremenskim promjenama temperatura parafina. Od početka skrućivanja, pri čemu akumulator topline oslobađa latentnu toplinu, pa do kraja procesa, povećava se razlika u predanim toplinama za razmatrane slučajeve. Za promatrano razdoblje korištenja topline od 24 h, latentni spremnik topline predaje 172,7 MJ topline pri ulaznoj temperaturi vode 7 °C. U istom vremenu korištenja topline, pri ulaznoj temperaturi 10 °C predano je 159,3 MJ topline, a pri ulaznoj temperaturi vode 13 °C predaje se 143,5 MJ topline.

Na slici 4.10 prikazana je usporedba srednjih toplinskih učina korištenja topline za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline.



*Slika 4.10. Usporedba srednjih toplinskih učina korištenja topline dobivenih rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline*

U skladu s prethodno prikazanim vremenskim promjenama temperatura parafina i vode te predanih toplina, sa slike se vidi da se srednji toplinski učin korištenja topline povećava smanjenjem ulazne temperature vode. Za ulaznu temperaturu 7 °C, učin iznosi 2 kW, za ulaznu temperaturu 10 °C on iznosi 1,84 kW, a za ulaznu temperaturu 13 °C srednji toplinski učin je 1,66 kW.

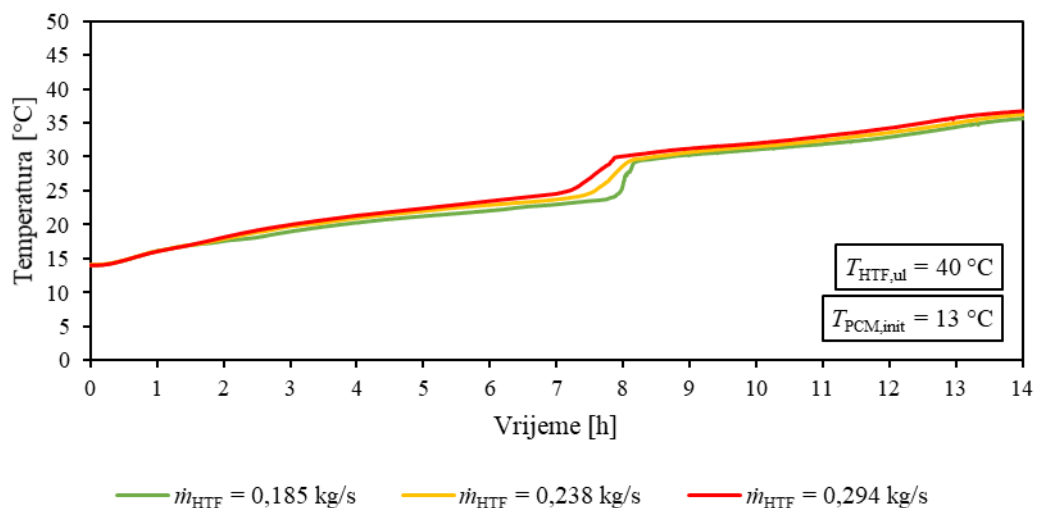
Predana toplina u vremenu korištenja topline od 24 h i srednji toplinski učin korištenja topline za ulaznu temperaturu 10 °C veći su za 7,7% u odnosu na slučaj s ulaznom temperaturom 13 °C, a za ulaznu temperaturu 7 °C povećanje iznosi 16,9% u odnosu na predanu i toplinski učin latentnog spremnika topline kad je ulazna temperatura vode 13 °C.

Analizirani rezultati provedenih eksperimentalnih mjerenja ukazuju da se smanjenjem ulazne temperature fluida prijenosnika topline može znatno poboljšati izmjena topline prilikom korištenja topline iz latentnog spremnika topline.

### 4.3. Analiza utjecaja masenog protoka fluida prijenosnika topline na proces spremanja topline

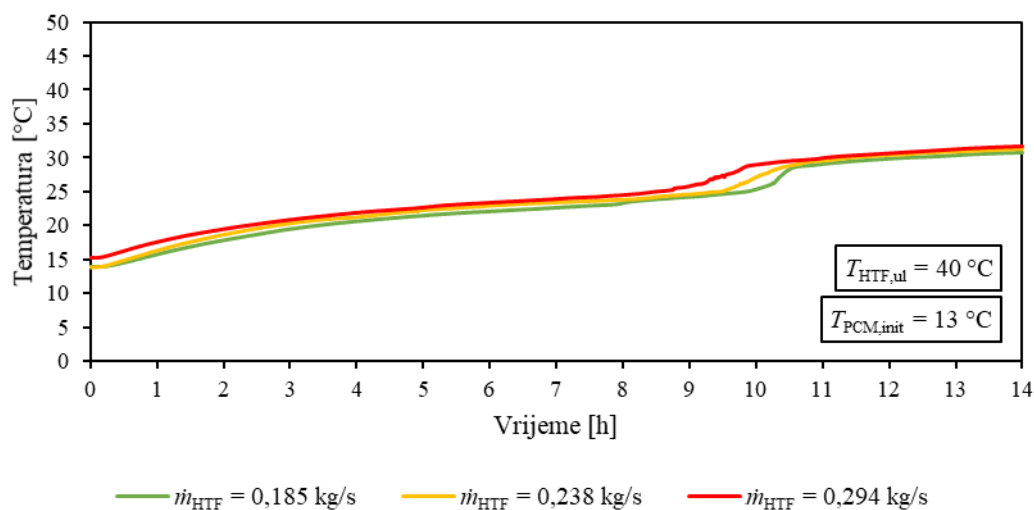
Kako bi se ispitaio utjecaj masenog protoka fluida prijenosnika topline na izmjenu topline unutar latentnog spremnika topline, izvršen je niz mjerenja prilikom taljenja akumulatora topline za različite protoke fluida prijenosnika topline. Ulazna temperatura fluida bila je konstantna pri svakom ispitivanju i iznosila je 40 °C. Mjerenja su provedena za vrijednosti masenih protoka vode 0,185, 0,238 i 0,294 kg/s, pri čemu ulazne brzine vode u jednu cijev iznose 0,02, 0,026, odnosno 0,032 m/s.

Vremenske promjene temperatura parafina na mjernoj poziciji T<sub>6</sub> (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,075 m), za različite masene protoke vode prikazane su na slidi 4.11.



Slika 4.11. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>6</sub> za različite masene protoke fluida prijenosnika topline

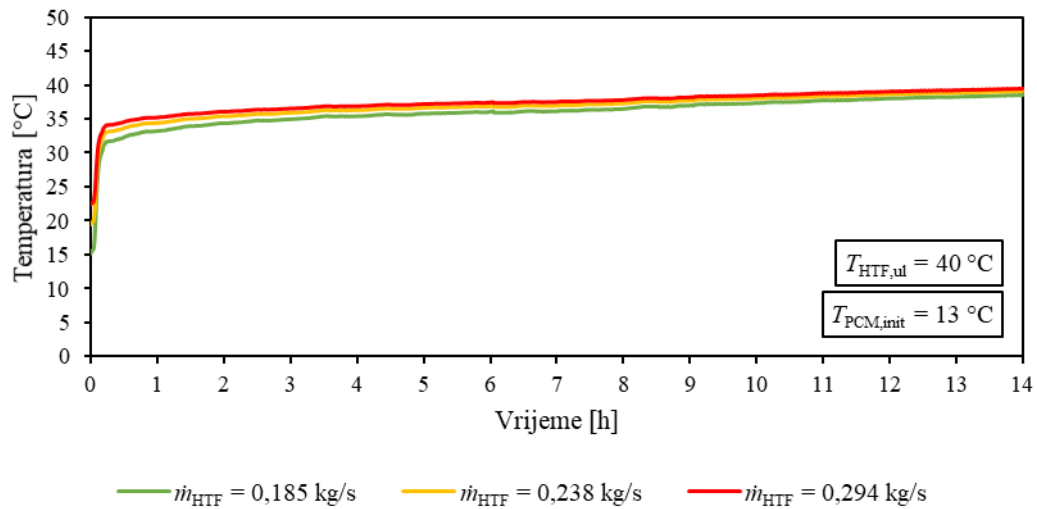
Vremenske promjene temperatura parafina na mjernoj poziciji  $T_9$  (aksijalna pozicija 1,3 m i radijalna pozicija 0,075 m) za različite masene protoke vode prikazane su na slici 4.12.



*Slika 4.12. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji  $T_9$  za različite masene protoke fluida prijenosnika topline*

Sa slika je vidljiv blag utjecaj povećanja protoka fluida prijenosnika topline na poboljšanje izmjene topline prilikom taljenja akumulatora topline, odnosno spremanja topline. Povećanjem protoka povećava se količina vode koja struji kroz cijevi, no toplina koju voda donosi ne uspijeva se značajno prenijeti na parafin, stoga povećanje protoka ima ograničen utjecaj na poboljšanje izmjene topline. Razlike između prikazanih vremenskih promjena temperatura parafina za različite protoke vode male su u usporedbi s njihovim razlikama kod analize utjecaja ulazne temperature vode. Utjecaj povećanja protoka vode blago je vidljiv u završnoj fazi taljenja te na početku zagrijavanja kapljevitog akumulatora topline, dok su u ostatku procesa vremenske promjene temperatura parafina vrlo slične za ispitane protoke. Na mjernoj poziciji  $T_6$ , akumulator topline rastali se za približno 8 h u slučaju s masenim protokom fluida prijenosnika topline 0,185 kg/s te za približno 7,5 h kad je maseni protok fluida 0,238 kg/s. Kad je maseni protok fluida prijenosnika topline 0,294 kg/s, akumulator topline se na istoj mjernoj poziciji rastali za približno 7 h. Na mjernoj poziciji  $T_9$ , akumulator topline rastaljen je za približno 10 h u slučaju s masenim protokom fluida prijenosnika topline 0,185 kg/s te za približno 9,5 h u slučaju s masenim protokom fluida 0,238 kg/s. Kad je maseni protok fluida prijenosnika topline 0,294 kg/s, akumulator topline se na istoj mjernoj poziciji rastali za približno 9 h.

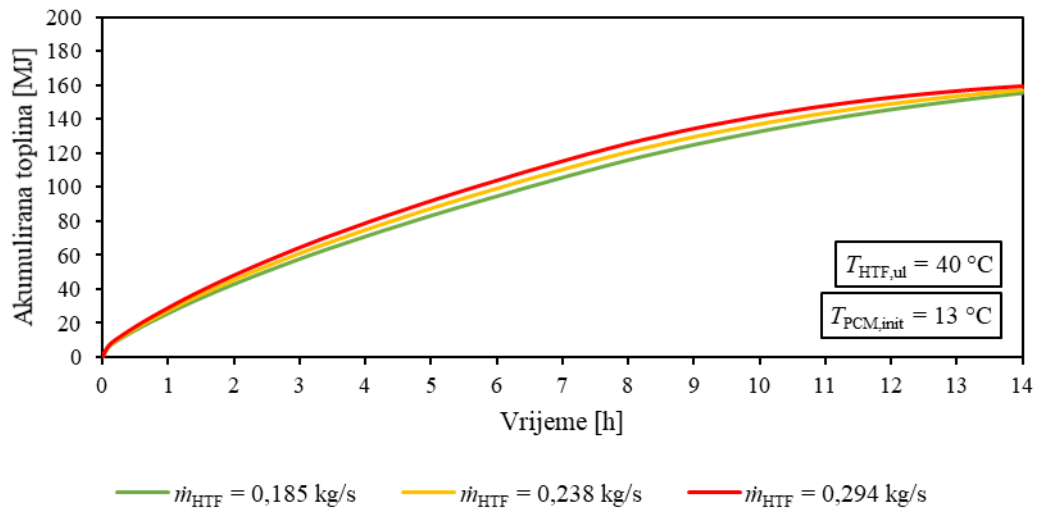
Na slici 4.13 prikazane su promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom spremanja topline za različite protoke fluida prijenosnika topline.



*Slika 4.13. Vremenske promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima za različite masene protoke fluida prijenosnika topline*

Sa slike se mogu uočiti male razlike između izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline za njegove različite protoke. Izlazne temperature fluida za ispitane slučajeve u početku se naglo povećavaju sve dok sloj akumulatora topline uz stijenku ne postigne temperaturu približno jednaku temperaturi fluida prijenosnika topline. Nakon toga, intenzitet izmjene topline u svim se slučajevima smanjuje. Promjenom protoka fluida ne utječe se na prijenos topline unutar parafina zbog njegove male toplinske vodljivosti, stoga je poboljšanje izmjene topline povećanjem protoka ograničeno. Odmicanjem procesa, izlazne temperature se postupno i gotovo linearno približavaju ulaznoj temperaturi fluida prijenosnika topline.

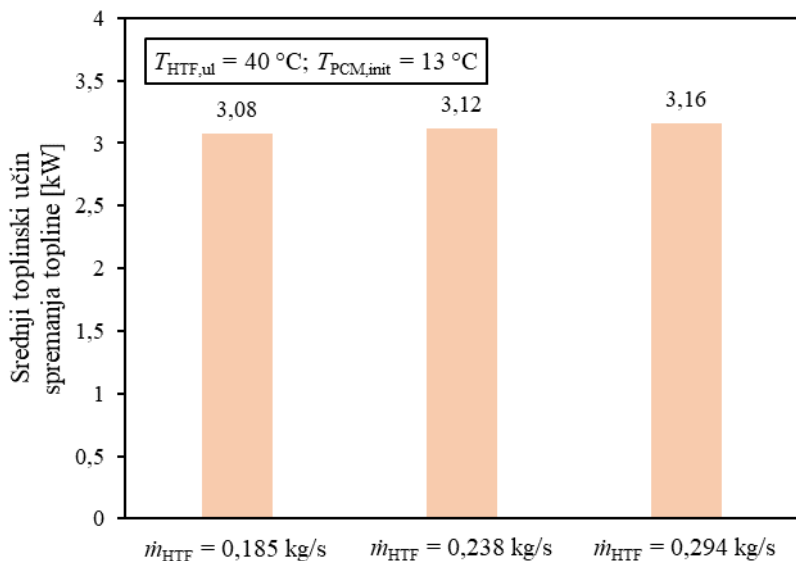
Usporedba akumuliranih toplina u vremenu prilikom taljenja akumulatora topline za različite protoke fluida prijenosnika topline prikazana je na slici 4.14.



Slika 4.14. Vremenske promjene akumuliranih toplina prilikom spremanja topline dobivene rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite masene protoke fluida prijenosnika topline

Analogno prethodnim prikazanim rezultatima, sa slike se uočava mala razlika u vremenskim promjenama akumulirane topline za različite protoke fluida prijenosnika topline prilikom spremanja topline. Za razdoblje spremanja topline od 14 h, uz protok vode 0,185 kg/s u latentnom spremniku topline akumulira se 155,2 MJ topline. Uz protok fluida prijenosnika topline 0,238 kg/s akumulira se 157,1 MJ, a uz protok fluida 0,294 kg/s akumulira se 159,2 MJ za isto vrijeme spremanja topline.

Na slici 4.15 prikazana je usporedba srednjih toplinskih učina spremanja topline za različite protoke fluida prijenosnika topline.



*Slika 4.15. Usporedba srednjih toplinskih učina spremanja topline dobivenih rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite masene protoke fluida prijenosnika topline*

Sa slike je moguće uočiti blago povećanje srednjeg toplinskog učina spremanja topline povećanjem protoka fluida prijenosnika topline, što je u skladu s prethodno prikazanim rezultatima. Za maseni protok vode 0,185 kg/s srednji toplinski učin iznosi 3,08 kW, za maseni protok 0,238 kg/s toplinski učin je 3,12 kW, a za maseni protok 0,294 kg/s učin iznosi 3,16 kW.

Za maseni protok vode 0,238 kg/s akumulirana toplina u vremenu spremanja topline od 14 h i srednji toplinski učin spremanja topline veći su za 1,2% u odnosu na slučaj s masenim protokom 0,185 kg/s, a za maseni protok 0,294 kg/s povećanje iznosi 2,5% u odnosu na akumuliranu toplinu i toplinski učin spremanja topline latentnog spremnika topline kad je maseni protok fluida prijenosnika topline 0,185 kg/s.

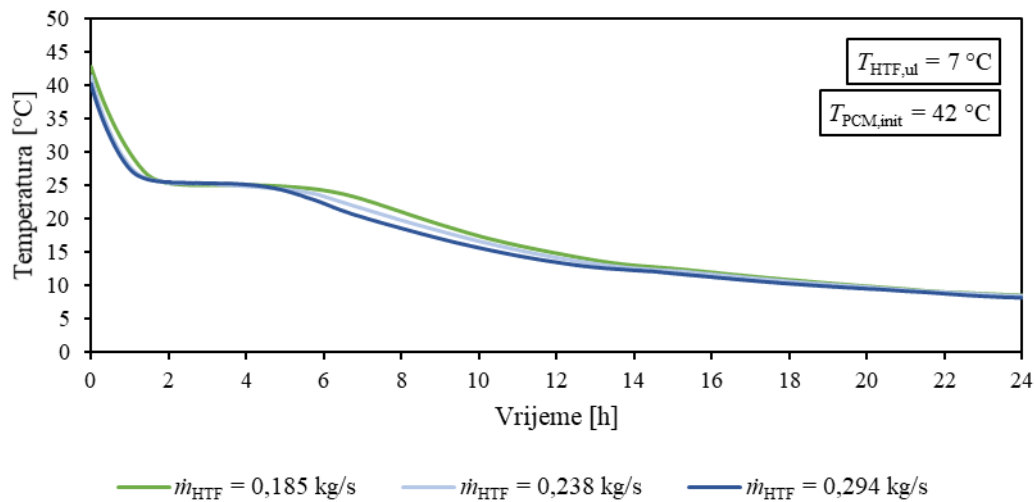
Iz prikazanih i analiziranih rezultata vidljivo je da povećanje masenog protoka fluida prijenosnika topline ne utječe značajno na povećanje učinkovitosti latentnog spremnika topline prilikom spremanja topline.

#### **4.4. Analiza utjecaja masenog protoka fluida prijenosnika topline na proces korištenja topline**

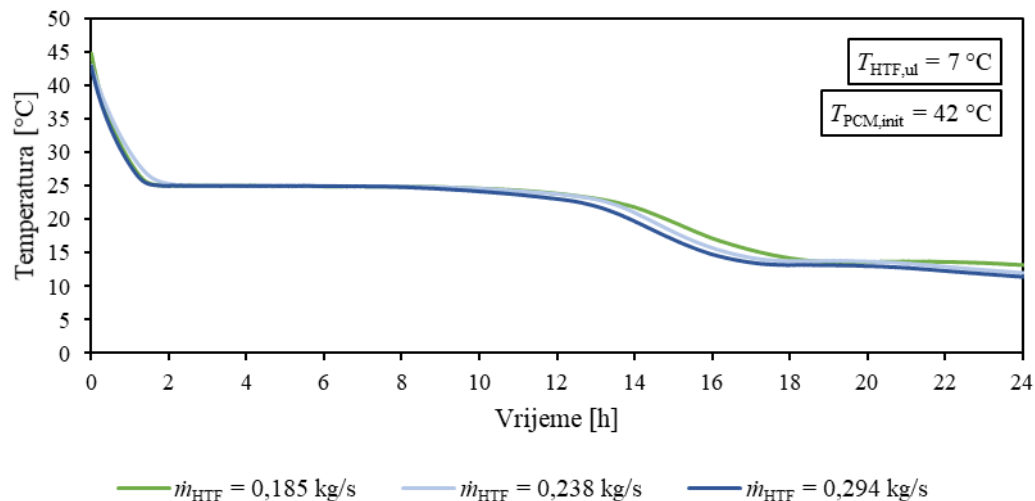
Proveden je niz mjerenja pri skrućivanju akumulatora topline za različite masene protoke fluida prijenosnika topline. Ulazna temperatura fluida bila je konstantna pri svakom ispitivanju i

iznosila je 7 °C. Mjerenja su provedena za masene protoke vode 0,185, 0,238 i 0,294 kg/s, što odgovara ulaznim brzinama vode u jednu cijev od 0,02, 0,026, odnosno 0,032 m/s.

Na slikama 4.16 i 4.17 prikazane su vremenske promjene temperatura parafina na mjernim pozicijama T<sub>2</sub> (aksijalna pozicija 0,2 m i radijalna pozicija 0,055 m), odnosno T<sub>8</sub> (aksijalna pozicija 1,3 m i radijalna pozicija 0,055 m), za različite ulazne temperature vode.



*Slika 4.16. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>2</sub> za različite masene protoke fluida prijenosnika topline*

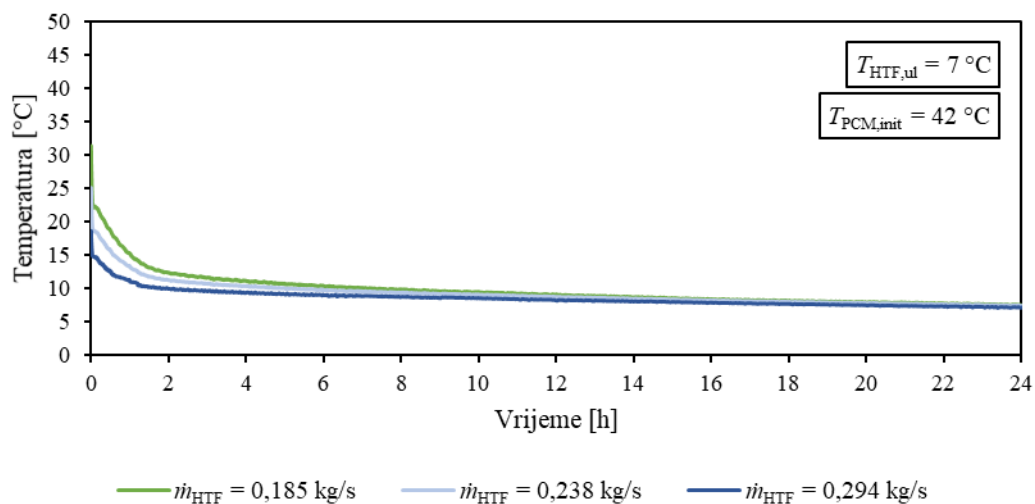


*Slika 4.17. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>8</sub> za različite masene protoke fluida prijenosnika topline*



Vidljivo je da povećanje masenog protoka ne utječe značajno na izmjenu topline na prikazanim mjernim pozicijama unutar latentnog spremnika topline. Iako povećanje protoka smanjuje toplinski otpor na strani vode, izmjena topline ne poboljšava se značajno budući da je najveći toplinski otpor prisutan na strani parafina. Prikazane vremenske promjene temperatura parafina za različite protoke vode vrlo su slične i gotovo se poklapaju u cijelom vremenu korištenja topline. Razlike između prikazanih vremenskih promjena temperatura parafina za različite protoke vode očituju se u trajanju vremena skrućivanja, kad akumulator topline predaje latentnu toplinu, koje se neznatno skraćuje povećanjem protoka vode. Na mjernoj poziciji  $T_2$ , parafin je skrućen za približno 6,5 h u slučaju s masenim protokom vode 0,185 kg/s, a u slučaju s masenim protokom vode 0,238 kg/s, parafin se skruti za približno 6 h. Kad je maseni protok vode 0,294 kg/s, parafin je skrućen za približno 5,5 h na istoj poziciji. Na mjernoj poziciji  $T_8$ , parafin je skrućen za približno 14 h u slučaju s masenim protokom vode 0,185 kg/s, dok je u slučaju s masenim protokom vode 0,294 kg/s parafin skrućen za približno 13,5 h. Parafin se na istoj mjernoj poziciji u slučaju s masenim protokom vode 0,294 kg/s skruti za približno 13 h. Također, u početku procesa, kad je prisutna slobodna konvekcija i kapljevitom parafinu oduzima se osjetna toplina, te nakon završetka taljenja, kad kruti akumulator topline predaje osjetnu toplinu, vremenske promjene temperatura gotovo se poklapaju za analizirane protoke.

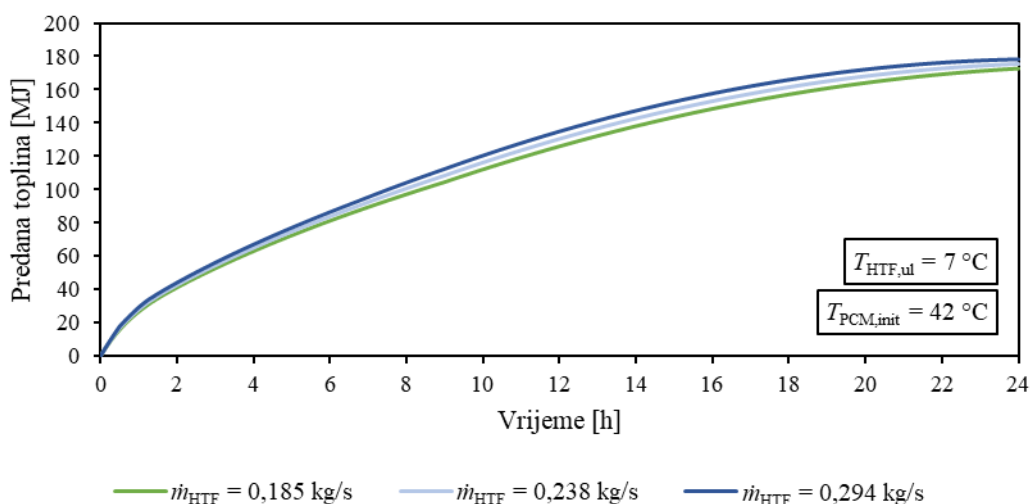
Izlazne temperature vode za različite ulazne temperature vode prilikom korištenja topline prikazane su na slici 4.18.



*Slika 4.18. Vremenske promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima za različite masene protoke fluida prijenosnika topline*

Sa slike je vidljivo da je izmjena topline u svim razmatranim slučajevima najintenzivnija u početnoj fazi procesa, kad je prisutna najveća razlika između temperatura fluida prijenosnika topline i akumulatora topline. Izlazna temperatura fluida najprije se naglo smanjuje, nakon čega se do kraja procesa postupno približava ulaznoj temperaturi u svim razmatranim slučajevima. Zbog male toplinske vodljivosti, prijenos topline u dublje slojeve parafina vrlo je spor pa je razlika temperatura između vode i parafina vrlo mala nakon što sloj parafina uz stijenu postigne temperaturu gotovo jednaku ulaznoj temperaturi vode. Najveće početno smanjenje izlazne temperature te njezine najmanje vrijednosti prisutne su za slučaj s najvećim protokom vode. Postupnim smanjenjem izlazne temperature vode smanjuje se i intenzitet izmjene topline.

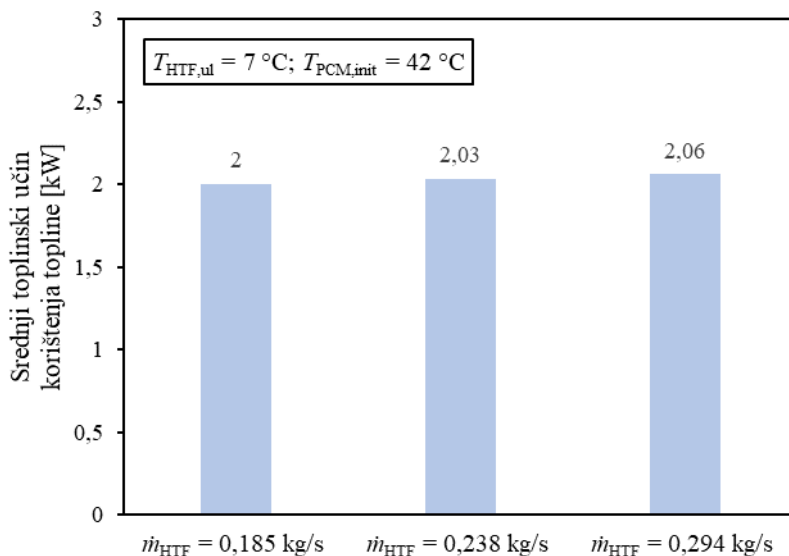
Na slici 4.19 dana je usporedba predanih toplina u vremenu tijekom razdoblja korištenja topline za različite protoke vode.



*Slika 4.19. Vremenske promjene predanih toplina prilikom korištenja topline dobivene rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite masene protoke fluida prijenosnika topline*

Sukladno dosad prikazanim rezultatima, sa slike se uočava blago povećanje predane topline zbog povećanja protoka vode prilikom korištenja topline. Za razdoblje korištenja topline od 24 h, uz protok vode 0,185 kg/s predano je 172,3 MJ topline. Uz protok vode 0,238 kg/s predano je 175,4 MJ, a uz protok vode 0,294 kg/s latentni spremnik topline predaje 178,2 MJ za isto vrijeme korištenja topline.

Usporedba srednjih toplinskih učina korištenja topline za različite protoke vode prikazana je na slici 4.20.



*Slika 4.20. Usporedba srednjih toplinskih učina korištenja topline dobivenih rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite masene protoke fluida prijenosnika topline*

Sa slike se vidi blago povećanje srednjeg toplinskog učina korištenja topline pri povećanju protoka fluida prijenosnika topline, što također odgovara prethodno prikazanim rezultatima. Za maseni protok vode 0,185 kg/s srednji toplinski učin iznosi 2 kW, za maseni protok 0,238 kg/s toplinski učin je 2,03 kW, a za maseni protok 0,294 kg/s učin iznosi 2,06 kW.

Za maseni protok vode 0,238 kg/s u vremenu korištenja topline od 24 h predana toplina i srednji toplinski učin korištenja topline veći su za 1,6% u odnosu na slučaj s masenim protokom vode 0,185 kg/s, a za maseni protok 0,294 kg/s povećanje u odnosu na predanu toplinu i toplinski učin korištenja topline kad je maseni protok fluida prijenosnika topline 0,185 kg/s iznosi 3,2%.

Prikazani eksperimentalno dobiveni i analizirani rezultati ukazuju da povećanje masenog protoka fluida prijenosnika topline ne utječe značajno na poboljšanje izmjene topline unutar latentnog spremnika topline prilikom korištenja topline.

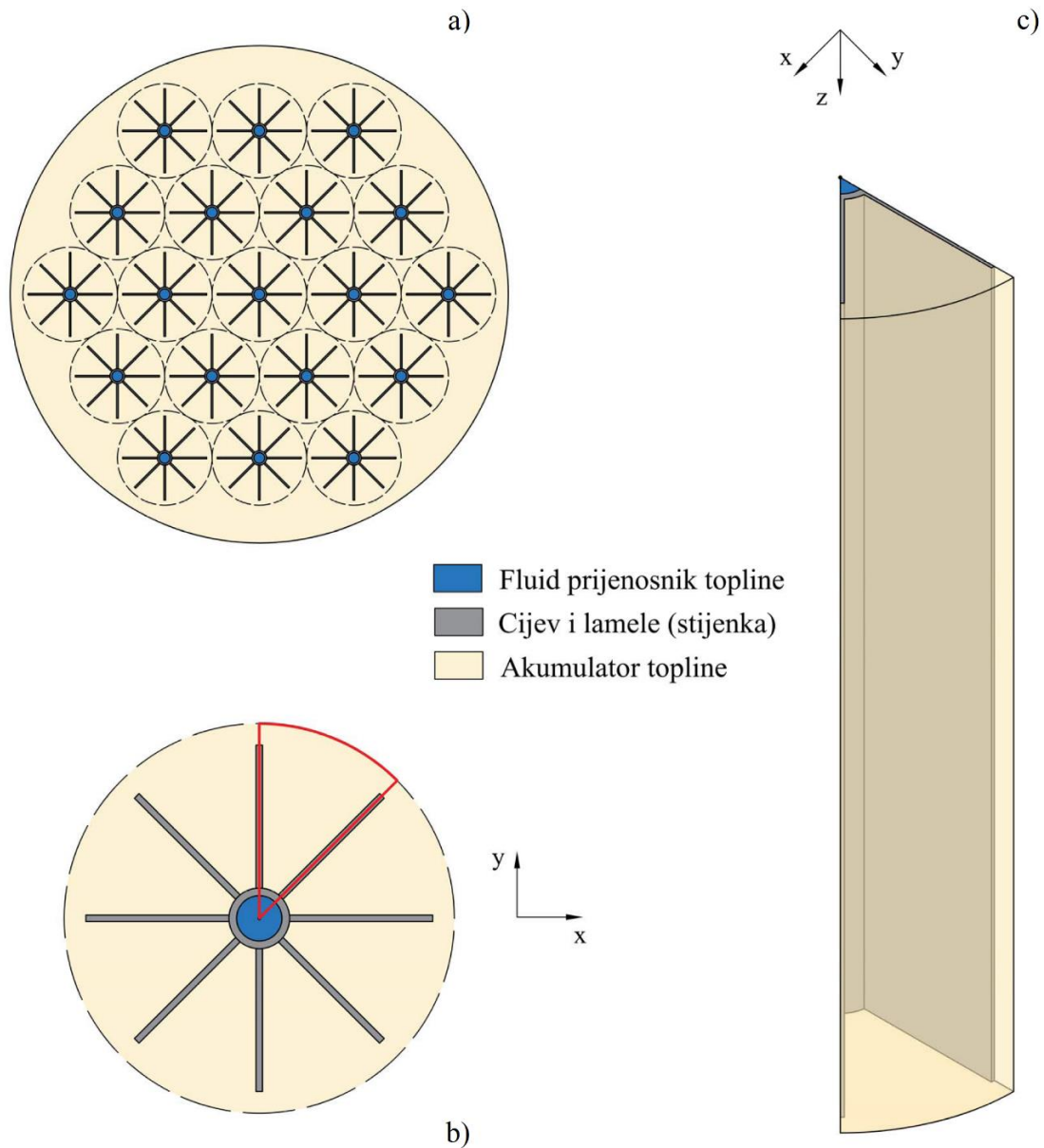
Eksperimentalnim analizama procesa spremanja i korištenja topline ispitan je utjecaj pogonskih uvjeta na izmjenu topline unutar latentnog spremnika topline. Uočeno je da ulazna temperatura fluida prijenosnika topline ima značajan, a protok fluida manji utjecaj na izmjenu topline prilikom spremanja i korištenja topline za analizirane vrijednosti ulaznih temperatura, odnosno masenih protoka fluida prijenosnika topline.

## 5. MATEMATIČKI MODEL OPISANOG FIZIKALNOG PROBLEMA

Svrha matematičkog modeliranja i numeričkog rješavanja opisanog fizikalnog problema je provođenje dodatnih analiza izmjene topline pri taljenju, odnosno skrućivanju akumulatora topline u latentnom spremniku topline. Na ovaj način moguće je ispitivanje većeg broja utjecajnih parametara na znatno jednostavniji i praktičniji način u odnosu na eksperimentalna istraživanja.

### 5.1. Domena

Najmanji dio fizikalnog problema, u kojem su sadržane sve fizikalne pojave unutar latentnog spremnika topline, predstavlja domenu za koju se primijenjuje matematičko modeliranje i numeričko rješavanje. Eksperimentalnim ispitivanjem provedenim na latentnom spremniku topline utvrđeno je da se izmjena topline između fluida prijenosnika topline i akumulatora topline tijekom procesa spremanja i korištenja topline odvija podjednako za analizirane karakteristične cijevi. Iz toga proizlazi da je za opis fizikalnih pojava unutar latentnog spremnika topline dovoljno promatrati izmjenu topline u okruženju jedne cijevi s pripadajućih osam jednoliko raspoređenih uzdužnih lamela, a toplinske pojave mogu se potom preslikati na cijeli spremnik. Oko svake cijevi s lamelama moguće je opisati kružnicu koja predstavlja područje utjecaja pojedine cijevi, tako da se opisane kružnice susjednih cijevi dodiruju, pri čemu samo mali dio akumulatora topline ostaje izvan opisanih kružnica. Promjer opisane kružnice odgovara koraku između susjednih cijevi. Zbog fizikalne i geometrijske simetričnosti odabranog elementa, područje proračuna može se dodatno pojednostaviti tako da uključuje osminu jedne cijevi ispunjene fluidom prijenosnikom topline, polovice dviju susjednih lamela te pripadajući kružni isječak akumulatora topline. Definirana domena numeričkog proračuna sastoji se od tri poddomene; fluida prijenosnika topline, cijevi i lamela (stijenke) te akumulatora topline. Na slici 5.1 prikazan je postupak odabira domene numeričkog proračuna; opisivanjem kružnica oko cijevi u latentnom spremniku topline izdvojena je jedna cijev s pripadajućim akumulatorom topline, iz koje je zbog simetričnosti dodatno izdvojena njezina osmina.



*Slika 5.1. Odabir domene numeričkog proračuna, a) poprečni presjek latentnog spremnika topline s opisanim kružnicama oko cijevi, b) poprečni presjek izdvojene cijevi s označenom domenom u  $xy$  ravnini, c) trodimenzijski prikaz domene numeričkog proračuna*

Za odabranu domenu postavljene su diferencijalne jednadžbe očuvanja te definirani početni i rubni uvjeti.

## 5.2. Jednadžbe očuvanja

Izmjena topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline tijekom procesa spremanja/korištenja topline, koja uključuje slobodnu konvekciju u kapljevitoj fazi akumulatora topline, povezana sa strujanjem fluida prijenosnika topline i izmjenom topline prisilnom konvekcijom sa stijenkom te provođenjem topline kroz stijenku cijevi i lamele nestacionaran je problem, za koji je definiran odgovarajući matematički model u trodimenzijskom Kartezijevu koordinatnom sustavu.

Za modeliranje promjene agregatnog stanja akumulatora topline korištena je entalpijska metoda, kojom se u jednadžbi očuvanja energije u poddomeni akumulatora topline definira nova skalarna varijabla  $H$  [J/kg], koja predstavlja ukupnu specifičnu entalpiju.

Za svaku od poddomena primijenjuju se odgovarajuće jednadžbe očuvanja, za koje vrijede sljedeća pojednostavljenja:

- akumulator topline je homogen i izotropan,
- fizikalna svojstva fluida prijenosnika topline, akumulatora topline te stijenke cijevi i lamela su konstantna,
- tok fluida prijenosnika topline i kapljevitoj akumulatora topline je nestišljiv i laminaran,
- oba fluida mogu se smatrati newtonovskim fluidima,
- utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline uzima se u obzir Boussinesqovom aproksimacijom,
- početna raspodjela temperatura u domeni jednolika je u razmatranjima procesa taljenja i skrućivanja,
- ulazna brzina i ulazna temperatura fluida prijenosnika topline su konstantne,
- zanemaruje se provođenje topline kroz vanjsku stijenku na vrhu i dnu spremnika, odnosno latentni spremnik topline smatra se potpuno izoliranim prema okolini.

Jednadžbe očuvanja mase, količine gibanja i energije u matematičkom modelu, prema prethodno definiranim pretpostavkama, dane su u nastavku.

### Fluid prijenosnik topline (HTF)

- Jednadžba očuvanja mase

$$\operatorname{div} \vec{w} = 0 \quad (5.1)$$

- Jednadžbe očuvanja količine gibanja

smjer osi x:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{HTF}} \cdot w_x)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_{\text{HTF}} \cdot w_x \cdot \vec{w}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\eta_{\text{HTF}} \cdot \operatorname{grad} w_x) \quad (5.2)$$

smjer osi y:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{HTF}} \cdot w_y)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_{\text{HTF}} \cdot w_y \cdot \vec{w}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\eta_{\text{HTF}} \cdot \operatorname{grad} w_y) \quad (5.3)$$

smjer osi z:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{HTF}} \cdot w_z)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_{\text{HTF}} \cdot w_z \cdot \vec{w}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\eta_{\text{HTF}} \cdot \operatorname{grad} w_z) \quad (5.4)$$

- Jednadžba očuvanja energije

$$\frac{\partial(\rho_{\text{HTF}} \cdot T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_{\text{HTF}} \cdot \vec{w} \cdot T) = \frac{\lambda_{\text{HTF}}}{c_{\text{HTF}}} \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) \quad (5.5)$$

### Cijev i lamele (stijenka)

- Jednadžba očuvanja energije

$$\frac{\partial(\rho_{\text{st}} \cdot T)}{\partial t} = \operatorname{div}\left(\frac{\lambda_{\text{st}}}{c_{\text{st}}} \cdot \operatorname{grad} T\right) \quad (5.6)$$

### Akumulator topline (PCM)

- Jednadžba očuvanja mase

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{w}} = 0 \quad (5.7)$$

- Jednadžbe očuvanja količine gibanja

U poddomeni akumulatora topline, osim sila tlaka i smičnih sila uzrokovanih viskoznim naprežanjem, u jednadžbe očuvanja količine gibanja dodaju se i članovi koji predstavljaju gravitacijske sile, pa one u trima prostornim smjerovima imaju sljedeći oblik:

smjer osi x:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_x)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_x \cdot \bar{\mathbf{w}}) = \rho_{\text{PCM}} \cdot g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \operatorname{grad} w_x) + S_x \quad (5.8)$$

smjer osi y:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_y)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_y \cdot \bar{\mathbf{w}}) = \rho_{\text{PCM}} \cdot g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \operatorname{grad} w_y) + S_y \quad (5.9)$$

smjer osi z:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_z)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_z \cdot \bar{\mathbf{w}}) = \rho_{\text{PCM}} \cdot g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \operatorname{grad} w_z) + S_z \quad (5.10)$$

Strujanje fluida kod slobodne konvekcije uzrokovano je razlikom gustoća, koja nastaje zbog razlike temperatura. Ovisnost gustoće o temperaturi u matematičkom se modelu definira dodatnom jednadžbom koja povezuje ove dvije veličine. Može se opisati na različite načine, no zbog svoje jednostavnosti i točnosti pri analizama problema sa slobodnom konvekcijom, u razmatranom problemu koristi se Boussinesqova aproksimacija [70], koja linearno povezuje razlike gustoće s razlikom temperatura:



$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (5.11)$$

Odnosno:

$$\rho - \rho_0 = -\beta \cdot \rho_0 (T - T_0) \quad (5.12)$$

Pri tome  $T_0$  [K] označava referentnu temperaturu,  $\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>] je gustoća pri referentnoj temperaturi, a  $\beta$  [1/K] koeficijent toplinskog istezanja.

U Boussinesqovoj aproksimaciji gustoća se smatra konstantnom u jednadžbi očuvanja mase te konvektivnom članu u jednadžbama očuvanja količine gibanja, kojim su opisane inercijalne sile [71]. Dani izraz za promjenu gustoće s temperaturom koristi se u članu kojim je definiran gradijent tlaka u jednadžbama očuvanja količine gibanja. Pri tome tlak  $p$  u istim izrazima označava ukupni tlak koji se, umanjeno za hidrostatsku komponentu, može izraziti na sljedeći način:

$$p^* = p - \rho_0 \cdot g \cdot h \quad (5.13)$$

Izraz za ukupni tlak ima oblik:

$$p = p^* + \rho_0 \cdot g \cdot h \quad (5.14)$$

Proizlazi:

$$p = p^* + \rho_0 (g_x \cdot x + g_y \cdot y + g_z \cdot z) \quad (5.15)$$

Deriviranjem slijedi:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p^*}{\partial x} + \rho_0 \cdot g_x \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p^*}{\partial y} + \rho_0 \cdot g_y \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial p^*}{\partial z} + \rho_0 \cdot g_z \quad (5.18)$$

Uvrštavanjem izraza u odgovarajuće jednadžbe očuvanja količine gibanja dobivaju se transformirane jednadžbe očuvanja količine gibanja prilagođene za slučaj slobodne konvekcije:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_x \cdot \vec{\mathbf{w}}) = (\rho_{\text{PCM}} - \rho_{0,\text{PCM}}) \cdot g_x - \frac{\partial p^*}{\partial x} + \text{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \text{grad } w_x) + S_x \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_y)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_y \cdot \vec{\mathbf{w}}) = (\rho_{\text{PCM}} - \rho_{0,\text{PCM}}) \cdot g_y - \frac{\partial p^*}{\partial y} + \text{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \text{grad } w_y) + S_y \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_z)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_z \cdot \vec{\mathbf{w}}) = (\rho_{\text{PCM}} - \rho_{0,\text{PCM}}) \cdot g_z - \frac{\partial p^*}{\partial z} + \text{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \text{grad } w_z) + S_z \quad (5.21)$$

Uvrštavanjem Boussinesqove aproksimacije

$$\rho - \rho_0 = \rho \cdot \beta \cdot (T_0 - T) = -\rho \cdot \beta \cdot (T - T_0) \quad (5.22)$$

slijedi konačni oblik jednadžbi očuvanja količine gibanja:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_x \cdot \vec{\mathbf{w}}) = -\frac{\partial p^*}{\partial x} - \rho_{\text{PCM}} \cdot \beta \cdot (T - T_0) \cdot g_x + \text{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \text{grad } w_x) + S_x \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_y)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_y \cdot \vec{\mathbf{w}}) = -\frac{\partial p^*}{\partial y} - \rho_{\text{PCM}} \cdot \beta \cdot (T - T_0) \cdot g_y + \text{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \text{grad } w_y) + S_y \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_z)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot w_z \cdot \vec{w}) = -\frac{\partial p^*}{\partial z} - \rho_{\text{PCM}} \cdot \beta \cdot (T - T_0) \cdot g_z + \text{div}(\eta_{\text{PCM}} \cdot \text{grad } w_z) + S_z \quad (5.25)$$

Izvorni članovi  $S_x$ ,  $S_y$  i  $S_z$  predstavljaju ponore količina gibanja kojima se u obzir uzima prigušeno gibanje u zoni akumulatora topline u kojoj se odvija promjena agregatnog stanja. To se područje promatra kao porozni medij [72], a formulacija ponora temelji se na Kozeny-Carmanovoj jednadžbi, kojom se opisuje strujanje kroz porozne medije:

$$S_x = -\frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} \cdot C_{\text{mor}} \cdot w_x \quad (5.26)$$

$$S_y = -\frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} \cdot C_{\text{mor}} \cdot w_y \quad (5.27)$$

$$S_z = -\frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} \cdot C_{\text{mor}} \cdot w_z \quad (5.28)$$

Iz izraza je vidljivo da ponori količina gibanja ovise o udjelu kapljevite faze  $\gamma$ ; smanjuju se kako odmiče proces taljenja i naposljetku su jednaki nuli, omogućavajući nesmetano strujanje rastaljenog akumulatora topline, dok se pri skrućivanju povećavaju i postupno onemogućavaju gibanje.  $C_{\text{mor}}$  [kg/m<sup>3</sup>s] morfološka je konstanta, koja predstavlja amplitudu prigušenja brzina; što je njezina vrijednost veća, naglija je promjena brzina. Preporuča se usvajanje vrijednosti u rasponu od 10<sup>4</sup> do 10<sup>7</sup>, a u razmatranom problemu usvojena je morfološka konstanta od 10<sup>6</sup> kg/m<sup>3</sup>s. Proračunski parametar  $\varepsilon$  broj je male vrijednosti koji se dodaje u izraze kako bi se spriječilo dijeljenje s nulom u slučaju kad je udio kapljevite faze jednak nuli, odnosno kad je akumulator topline u krutom agregatnom stanju. U ovom je razmatranju usvojena njegova vrijednost od 0,001.

Poroznost kontrolnog volumena u zoni u kojoj se odvija promjena agregatnog stanja jednaka je udjelu kapljevite faze  $\gamma$ , koja se za  $H_s \leq H \leq H_1$  računa kao:

$$\gamma = \frac{H - H_s}{H_1 - H_s} \quad (5.29)$$

Pri tome  $H_s$  predstavlja specifičnu entalpiju solidusa, s vrijednošću  $c_{\text{PCM}} \cdot T_s$ , a  $H_1$  specifičnu entalpiju likvidusa, koja odgovara vrijednosti  $c_{\text{PCM}} \cdot T_1 + L$ , gdje  $L$  [J/kg] označava specifičnu latentnu toplinu akumulatora topline.

- Jednadžba očuvanja energije

$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot H)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{PCM}} \cdot \vec{w} \cdot H) = \frac{\lambda_{\text{PCM}}}{c_{\text{PCM}}} \text{div}(\text{grad } H) \quad (5.30)$$

Ukupna specifična entalpija akumulatora topline  $H$  predstavlja zbroj osjetne i latentne specifične entalpije. Temperatura se u poddomeni akumulatora topline dobiva posredno sljedećim izrazima:

$$T = \frac{H}{c_{\text{PCM}}} \quad \text{za} \quad H \leq H_s \quad (5.31)$$

$$T = T_s + (T_1 - T_s) \cdot \frac{H - H_s}{c_{\text{PCM}} \cdot (T_1 - T_s) + L} \quad \text{za} \quad H_s \leq H \leq H_1 \quad (5.32)$$

$$T = \frac{H - L}{c_{\text{PCM}}} \quad \text{za} \quad H \geq H_1 \quad (5.33)$$

Vidljivo je da se ovakva metoda može primijeniti na procese kod kojih se promjena agregatnog stanja akumulatora topline odvija pri konstantnoj temperaturi (izotermno), kao i na procese kod kojih se odvija unutar temperaturnog intervala (neizotermno), uvrštavanjem odgovarajućih vrijednosti entalpija, odnosno temperatura solidusa i likvidusa.

### 5.3. Početni i rubni uvjeti

Početni uvjeti definirani su jednolikom raspodjelom temperatura u proračunskoj domeni te mirovanjem čestica fluida u poddomenama fluida prijenosnika topline i akumulatora topline, što se može zapisati na sljedeći način:

$$T = T_{\text{init}}; \quad w_x = 0; \quad w_y = 0; \quad w_z = 0 \quad (5.34)$$

Rubni uvjeti definiraju se na vanjskim plohama domene te na granicama između poddomena. Na ulazu fluida prijenosnika topline definiraju se ulazne vrijednosti računatih varijabli, odnosno temperatura i brzina. Na izlazu fluida prijenosnika topline definiran je rubni uvjet potpuno razvijenog toka, bez promjena varijabli u smjeru strujanja. Stijenka na vrhu i dnu domene smatra se potpuno izoliranom prema okolini pa se primijenjuje adijabatski rubni uvjet. Adijabatski rubni uvjet primijenjuje se i za akumulator topline na vrhu i dnu domene. Također vrijedi da su komponente brzine jednake nuli. Na dodirnoj površini fluida prijenosnika topline i stijenke cijevi opisana je izmjena topline u graničnom sloju. Također, za fluid prijenosnik topline vrijedi da su komponente brzina jednake nuli. Na dodirnim površinama akumulatora topline i stijenke cijevi, odnosno lamela, definira se izmjena topline u graničnom sloju. Za poddomenu akumulatora topline još vrijedi da su komponente brzina jednake nuli. Rubni uvjeti simetrije definirani su za sve ostale vanjske plohe u poddomenama fluida prijenosnika topline, stijenke te akumulatora topline. Za taj rubni uvjet vrijedi da nema promjena varijabli u smjeru normale na ravninu simetrije, a brzina u smjeru normale na ravninu simetrije jednaka je nuli.

Matematički zapis opisanih rubnih uvjeta prikazan je u nastavku.

Ulaz fluida prijenosnika topline:

$$T = T_{\text{ul}}; \quad w_x = 0; \quad w_y = 0; \quad w_z = w_{\text{ul}} \quad (5.35)$$

Izlaz fluida prijenosnika topline:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w_x}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w_y}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0 \quad (5.36)$$

Vrh i dno domene – stijenka:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (5.37)$$

Vrh i dno domene – akumulator topline:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad w_x = 0; \quad w_y = 0; \quad w_z = 0 \quad (5.38)$$

Dodirna površina fluid prijenosnik topline-stijenka:

$$\lambda_{\text{HTF}} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_{\text{st}} \cdot \frac{\partial T}{\partial n}; \quad w_n = 0 \quad (5.39)$$

Dodirna površina stijenka-akumulator topline:

$$\lambda_{\text{st}} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_{\text{PCM}} \cdot \frac{\partial T}{\partial n}; \quad w_n = 0 \quad (5.40)$$

Simetrija – fluid prijenosnik topline:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0; \quad w_n = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0 \quad (5.41)$$

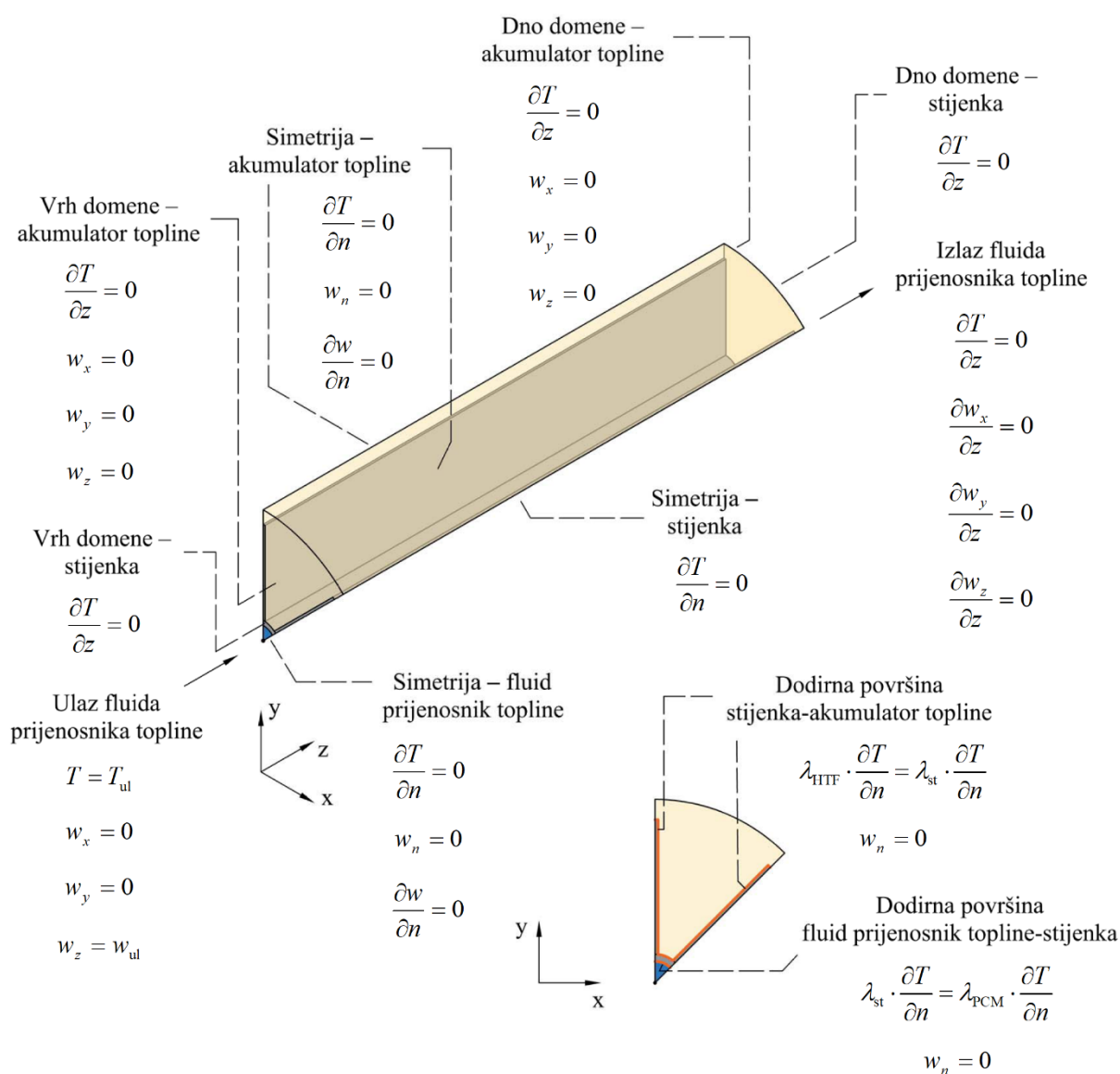
Simetrija – stijenka:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (5.42)$$

Simetrija – akumulator topline:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0; \quad w_n = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0 \quad (5.43)$$

Dodatno, shematski prikaz domene numeričkog proračuna s označenim rubnim uvjetima dan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Shematski prikaz domene numeričkog proračuna s označenim rubnim uvjetima

## 6. NUMERIČKO RJEŠAVANJE MATEMATIČKOG MODELA

### 6.1. Opis numeričkog rješavanja

Opisani matematički model, definiran diferencijalnim jednadžbama očuvanja te početnim i rubnim uvjetima, riješen je numerički, primjenom metode kontrolnih volumena, koju su detaljno opisali Versteeg i Malalasekera [73]. Općenito, postupak proračuna primjenom metode kontrolnih volumena može se sažeti u tri koraka: podjela domene na kontrolne volumene te definiranje čvorova, diskretizacija jednadžbi očuvanja i rješavanje sustava algebarskih jednadžbi.

Korištenjem metode kontrolnih volumena, diferencijalne jednadžbe prevode se u sustav algebarskih jednadžbi, a definirana domena zamjenjuje se željenim brojem kontrolnih volumena koji čine numeričku mrežu. Zakoni očuvanja primjenjuju se na pojedine kontrolne volumene te integracijom prevode u algebarske jednadžbe (jednadžbe diskretizacije), koje se povezuju u sustav s algebarskim jednadžbama susjednih kontrolnih volumena. Pri tome se u čvorovima numeričke mreže dobiva približno rješenje, a njegova točnost ovisi o gustoći odabrane mreže i zadanim kriterijima točnosti. Sustavi algebarskih jednadžbi rješavaju se iteracijski pomoću računala. Često korištena iteracijska metoda je Gauss-Seidelov iteracijski postupak, gdje se na početku pretpostavljaju vrijednosti varijabli, a potom se kontinuiranim obilaženjem čvorova unutar domene pretpostavljene vrijednosti zamjenjuju novodobivenim vrijednostima. Iteracijski postupak se nastavlja do postizanja definiranog kriterija točnosti, odnosno dok se razlika između vrijednosti varijabli u svim čvorovima domene u uzastopnim iteracijama ne smanji ispod unaprijed zadane vrijednosti. Za slučaj nestacionarnih problema, opisani postupak primijenjuje se za svaki vremenski korak do postizanja konačnog proračunskog vremena. Metoda kontrolnih volumena zasniva se na općoj jednadžbi očuvanja fizikalnog svojstva, koja ima oblik:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{w} \cdot \phi) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (6.1)$$

Nestacionarni član  $\frac{\partial(\rho \cdot \phi)}{\partial t}$  predstavlja promjenu varijable u vremenu, konvektivni član  $\text{div}(\rho \cdot \vec{w} \cdot \phi)$  opisuje promjenu varijable uslijed toka kroz kontrolni volumen, difuzijski član



$\text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \phi)$  označava promjenu varijable unutar kontrolnog volumena zbog difuzije, a izvorni član  $S_\phi$  predstavlja izviranje/poniranje varijable (fizikalnog svojstva) u kontrolnom volumenu.

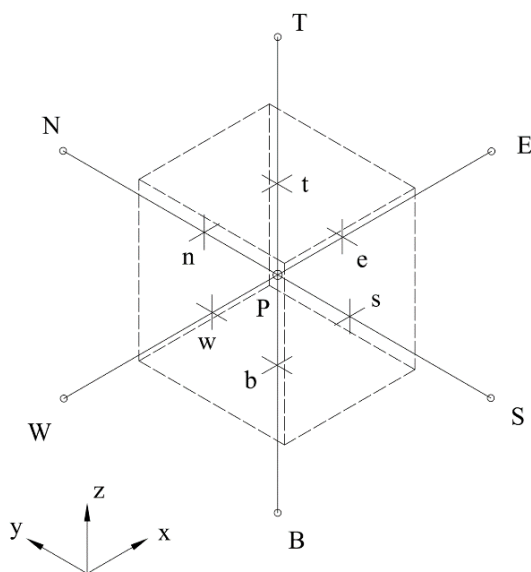
Na temelju ove jednadžbe, uvrštavanjem odgovarajućih vrijednosti umjesto varijabli  $\phi$  i  $\Gamma$ , mogu se izvesti jednadžba očuvanja mase, jednadžbe očuvanja količine gibanja i jednadžba očuvanja energije. U diferencijalnom obliku ova jednadžba izgleda na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \cdot \phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot w_x \cdot \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot w_y \cdot \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w_z \cdot \phi) = \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + S_\phi \end{aligned} \quad (6.2)$$

Tok mora zadovoljiti i jednadžbu očuvanja mase:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w_z)}{\partial z} = 0 \quad (6.3)$$

Kontrolni volumen trodimenzijske mreže s oznakama čvorova i granica prikazan je na slici 6.1.



*Slika 6.1. Kontrolni volumen i čvorovi trodimenzijske mreže*

### 6.1.1. Diskretizacija

Opću jednadžbu očuvanja potrebno je integrirati po kontrolnom volumenu i vremenu. Za rješavanje integrala po vremenu, potrebno je izračunati promjene varijabli u centralnom i susjednim čvorovima u odnosu na prethodni vremenski korak. Pri računanju vremenskog integrala mogu se koristiti vrijednosti varijabli iz prethodnog vremenskog koraka (eksplicitna shema), trenutnog vremenskog koraka (potpuno implicitna shema) ili njihova kombinacija (implicitne sheme). Od navedenih shema, jedino je potpuno implicitna shema bezuvjetno stabilna (svi koeficijenti u jednadžbi diskretizacije su pozitivni) pa je stoga korištena u ovom razmatranju. Uz potpuno implicitnu diskretizaciju po vremenu te primjenom Gaussova divergencijskog teorema slijedi:

$$\begin{aligned} \rho_P^0 \cdot \phi_P^0 \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} + \left[ \begin{aligned} &(\rho \cdot w_x \cdot \phi \cdot A)_e - (\rho \cdot w_x \cdot \phi \cdot A)_w + \\ &+ (\rho \cdot w_y \cdot \phi \cdot A)_n - (\rho \cdot w_y \cdot \phi \cdot A)_s + \\ &+ (\rho \cdot w_z \cdot \phi \cdot A)_t - (\rho \cdot w_z \cdot \phi \cdot A)_b \end{aligned} \right] = \\ = \left[ \begin{aligned} &\left( \Gamma \cdot A \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( \Gamma \cdot A \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w + \\ &+ \left( \Gamma \cdot A \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left( \Gamma \cdot A \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s + \\ &+ \left( \Gamma \cdot A \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_t - \left( \Gamma \cdot A \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_b \end{aligned} \right] + S_\phi \cdot \Delta V \end{aligned} \quad (6.4)$$

Izvorni član može se linearizirati na sljedeći način:

$$S_\phi \cdot \Delta V = S_u + S_P \cdot \phi_P \quad (6.5)$$

Za dobivanje rješenja sustava jednadžbi potrebno je poznavati vrijednosti i gradijente varijable  $\phi$  na granicama  $e$  i  $w$ ,  $n$  i  $s$  te  $t$  i  $b$ , za što se koriste odgovarajuće diskretizacijske sheme.

Difuzijski član diskretiziran je korištenjem linearne sheme (eng. *central differencing scheme*), kojom se vrijednost varijable na granici dobiva linearnom interpolacijom vrijednosti varijable u dvama susjednim čvorovima u ovisnosti o njihovoj međusobnoj udaljenosti. Primjenom ove sheme, vrijedi:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial x} = \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial \phi_e}{\partial x} = \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial y} = \frac{\phi_P - \phi_S}{\delta y_{SP}} \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial \phi_n}{\partial y} = \frac{\phi_N - \phi_P}{\delta y_{PN}} \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial \phi_b}{\partial z} = \frac{\phi_P - \phi_B}{\delta z_{BP}} \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial \phi_t}{\partial z} = \frac{\phi_T - \phi_P}{\delta z_{PT}} \quad (6.11)$$

Za definiranje jednadžbe diskretizacije uvode se veličine  $F$  i  $D$  na granicama, koje predstavljaju konvektivni maseni tok, odnosno difuzijsku vodljivost:

$$F = \rho \cdot w \cdot A \quad (6.12)$$

$$D = \frac{\Gamma}{\delta} \quad (6.13)$$

Odgovarajući konvektivni maseni tokovi i difuzijske vodljivosti te izrazi (6.5) i (6.6)-(6.11) uvrštavaju se u (6.4) pa slijedi:

$$\begin{aligned} & \rho_P^0 \cdot \phi_P^0 \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} + \left[ F_e \cdot \phi_e - F_w \cdot \phi_w + F_n \cdot \phi_n - \right. \\ & \left. - F_s \cdot \phi_s + F_t \cdot \phi_t - F_b \cdot \phi_b \right] = \\ & = \left[ D_e \cdot (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) + \right. \\ & \left. + D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) + \right. \\ & \left. + D_t (\phi_T - \phi_P) - D_b (\phi_P - \phi_B) \right] + S_u + S_P \cdot \phi_P \end{aligned} \quad (6.14)$$

Za diskretizaciju konvektivnog člana promatranog problema, korištena je diskretizacijska shema QUICK (eng. *quadratic upwind differencing scheme*), koju je 1979. opisao Leonard [74], a još se naziva i kvadratna upwind shema. Njome se vrijednost varijable na granici kontrolnih volumena interpolira polinomnom (kvadratnom) funkcijom, koja sadrži vrijednosti varijable u trima čvorovima; dva čvora s obje strane granice te dodatnom čvoru na uzvodnoj strani.

Za strujanje u pozitivnom smjeru koordinatnih osi, vrijednosti varijable  $\phi$  na granicama kontrolnih volumena iznose:

$$\phi_w = \frac{6}{8}\phi_w + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{WW} \quad (6.15)$$

$$\phi_e = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_W \quad (6.16)$$

$$\phi_s = \frac{6}{8}\phi_S + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{SS} \quad (6.17)$$

$$\phi_n = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_N - \frac{1}{8}\phi_S \quad (6.18)$$

$$\phi_b = \frac{6}{8}\phi_B + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{BB} \quad (6.19)$$

$$\phi_t = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_T - \frac{1}{8}\phi_B \quad (6.20)$$

Uvrštavanjem (6.15)-(6.20) u (6.14) slijedi:

$$\begin{aligned} & \rho_P^0 \cdot \phi_P^0 \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} + F_e \cdot \left( \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_W \right) - F_w \cdot \left( \frac{6}{8}\phi_w + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{WW} \right) + \\ & + F_n \cdot \left( \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_N - \frac{1}{8}\phi_S \right) - F_s \cdot \left( \frac{6}{8}\phi_S + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{SS} \right) + F_t \cdot \left( \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_T - \frac{1}{8}\phi_B \right) - \\ & F_b \cdot \left( \frac{6}{8}\phi_B + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{BB} \right) = D_e \cdot (\phi_E - \phi_P) - D_w \cdot (\phi_P - \phi_w) + D_n \cdot (\phi_N - \phi_P) - \\ & D_s \cdot (\phi_P - \phi_S) + D_t \cdot (\phi_T - \phi_P) - D_b \cdot (\phi_P - \phi_B) + S_u + S_P \cdot \phi_P \end{aligned} \quad (6.21)$$

Pripadna jednadžba diskretizacije ima oblik:

$$a_P \cdot \phi_P = a_W \cdot \phi_W + a_E \cdot \phi_E + a_{WW} \cdot \phi_{WW} + a_S \cdot \phi_S + a_N \cdot \phi_N + \\ + a_{SS} \cdot \phi_{SS} + a_B \cdot \phi_B + a_T \cdot \phi_T + a_{BB} \cdot \phi_{BB} + a_P^0 \cdot \phi_P^0 + S_u \quad (6.22)$$

Njezini su koeficijenti:

$$a_P = a_W + a_E + a_{WW} + a_S + a_N + a_{SS} + a_B + a_T + \\ + a_{BB} + a_P^0 - S_p + (F_e - F_w + F_n - F_s + F_t - F_b) \quad (6.23)$$

$$a_W = D_w + \frac{6}{8}F_w + \frac{1}{8}F_e \quad (6.24)$$

$$a_E = D_e - \frac{3}{8}F_e \quad (6.25)$$

$$a_{WW} = -\frac{1}{8}F_w \quad (6.26)$$

$$a_S = D_s + \frac{6}{8}F_s + \frac{1}{8}F_n \quad (6.27)$$

$$a_N = D_n - \frac{3}{8}F_n \quad (6.28)$$

$$a_{SS} = -\frac{1}{8}F_s \quad (6.29)$$

$$a_B = D_b + \frac{6}{8}F_b + \frac{1}{8}F_t \quad (6.30)$$

$$a_T = D_t - \frac{3}{8}F_t \quad (6.31)$$

$$a_{BB} = -\frac{1}{8}F_b \quad (6.32)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \cdot \Delta V}{\Delta t} \quad (6.33)$$

### 6.1.2. Algoritam za proračun polja brzina i tlakova

Konvektivni član u jednadžbama očuvanja ovisi o veličini i smjeru polja brzina, koje nije unaprijed poznato te ga je potrebno izračunati. Također, u jednadžbama očuvanja količine gibanja nije poznato ni polje tlaka. Polja tlakova i brzina mogu se povezati i računati primjenom odgovarajućeg iteracijskog postupka (algoritma). Za povezivanje i računanje polja tlakova i brzina u ovom razmatranju korišten je nestacionarni algoritam SIMPLE (eng. *semi-implicit method for pressure-linked equations*), koji su razvili Patankar i Spalding [75].

Prvi korak postupka uključuje pretpostavljanje polja tlakova  $p^*$ , korištenjem kojega se rješavaju jednadžbe diskretizacije brzina i izračunavaju vrijednosti pretpostavljenih komponenti  $w_x^*$ ,  $w_y^*$  i  $w_z^*$ . Nakon toga, definiraju se korekcije polja tlaka  $p'$  te polja brzina  $w'_x$ ,  $w'_y$  i  $w'_z$ . Uvrštavanjem točnog polja tlakova  $p$  u jednadžbe očuvanja količine gibanja dobivaju se točna polja brzina  $w_x$ ,  $w_y$  i  $w_z$ . Jednadžbe diskretizacije za  $w_x$ ,  $w_y$  i  $w_z$  povezuju točno polje brzina s točnim poljem tlaka. Oduzimanjem jednadžbi diskretizacije za pretpostavljene brzine  $w_x^*$ ,  $w_y^*$  i  $w_z^*$  od jednadžbi diskretizacije za brzine  $w_x$ ,  $w_y$  i  $w_z$ , definiraju se diskretizacijske jednadžbe korekcije brzina:

$$a_{i,j,k} \cdot w'_{x,i,j,k} = \sum a_{nb} \cdot w'_{x,nb} + (p'_{i-1,j,k} - p_{i,j,k}) \cdot A_{i,j,k} \quad (6.34)$$

$$a_{i,j,k} \cdot w'_{y,i,j,k} = \sum a_{nb} \cdot w'_{y,nb} + (p'_{i,j-1,k} - p_{i,j,k}) \cdot A_{i,j,k} \quad (6.35)$$

$$a_{i,j,k} \cdot w'_{z,i,j,k} = \sum a_{nb} \cdot w'_{z,nb} + (p'_{i,j,k-1} - p_{i,j,k}) \cdot A_{i,j,k} \quad (6.36)$$

U nastavku proračuna koristi se aproksimacija kojom se odbacuju članovi  $\sum a_{nb} \cdot w'_{x,nb}$ ,  $\sum a_{nb} \cdot w'_{y,nb}$  i  $\sum a_{nb} \cdot w'_{z,nb}$  pa se jednadžbe pojednostavljuju. Ispuštanje navedenih članova osnovna je aproksimacija algoritma SIMPLE. Polje brzina mora zadovoljavati i jednadžbu očuvanja mase, čija jednadžba diskretizacije za skalarni kontrolni volumen u slučaju razmatranog problema ima oblik:

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho_{i,j,k} - \rho_{i,j,k}^0) \cdot \Delta V}{\Delta t} + (\rho \cdot w_x \cdot A)_{i+1,j,k} - (\rho \cdot w_x \cdot A)_{i,j,k} + (\rho \cdot w_y \cdot A)_{i,j+1,k} - \\ & - (\rho \cdot w_y \cdot A)_{i,j,k} + (\rho \cdot w_z \cdot A)_{i,j,k+1} - (\rho \cdot w_z \cdot A)_{i,j,k} = 0 \end{aligned} \quad (6.37)$$

Diskretizirana jednadžba očuvanja mase ima oblik:

$$\begin{aligned} a_{I,J,K} \cdot p'_{I,J,K} = & a_{I+1,J,K} \cdot p'_{I+1,J,K} + a_{I-1,J,K} \cdot p'_{I-1,J,K} + a_{I,J+1,K} \cdot p'_{I,J+1,K} + \\ & + a_{I,J-1,K} \cdot p'_{I,J-1,K} + a_{I,J,K+1} \cdot p'_{I,J,K+1} + a_{I,J,K-1} \cdot p'_{I,J,K-1} + b'_{I,J,K} \end{aligned} \quad (6.38)$$

Jednadžba (6.38) predstavlja jednadžbu korekcije tlaka čijim se rješavanjem dobiva polje korekcije tlaka  $p'$ . Nakon što se ono izračuna, moguće je izračunati i točno polje tlaka te komponente brzina korištenjem prethodno definiranih jednadžbi.

Ako se prilikom iteracijskog postupka ne koristi podrelaksacija, može doći do divergencije jednadžbe korekcije tlaka. Korištenjem podrelaksacije dobiva se novo poboljšano polje tlaka:

$$p^{\text{new}} = p^* + \alpha_p \cdot p' \quad (6.39)$$

Odabir podrelaksacijskog faktora tlaka  $\alpha_p$  između vrijednosti 0 i 1 omogućava dodavanje pretpostavljenom polju tlaka  $p^*$  takvog udjela polja korekcije tlaka koji je dovoljno velik za približavanje konvergiranoj rješenju iteracijskim postupkom, ali i dovoljno malen da osigura stabilnost iteracijskog postupka.

Podrelaksacija se koristi i za brzine te se dobivaju nove, poboljšane komponente brzina prema jednadžbama:

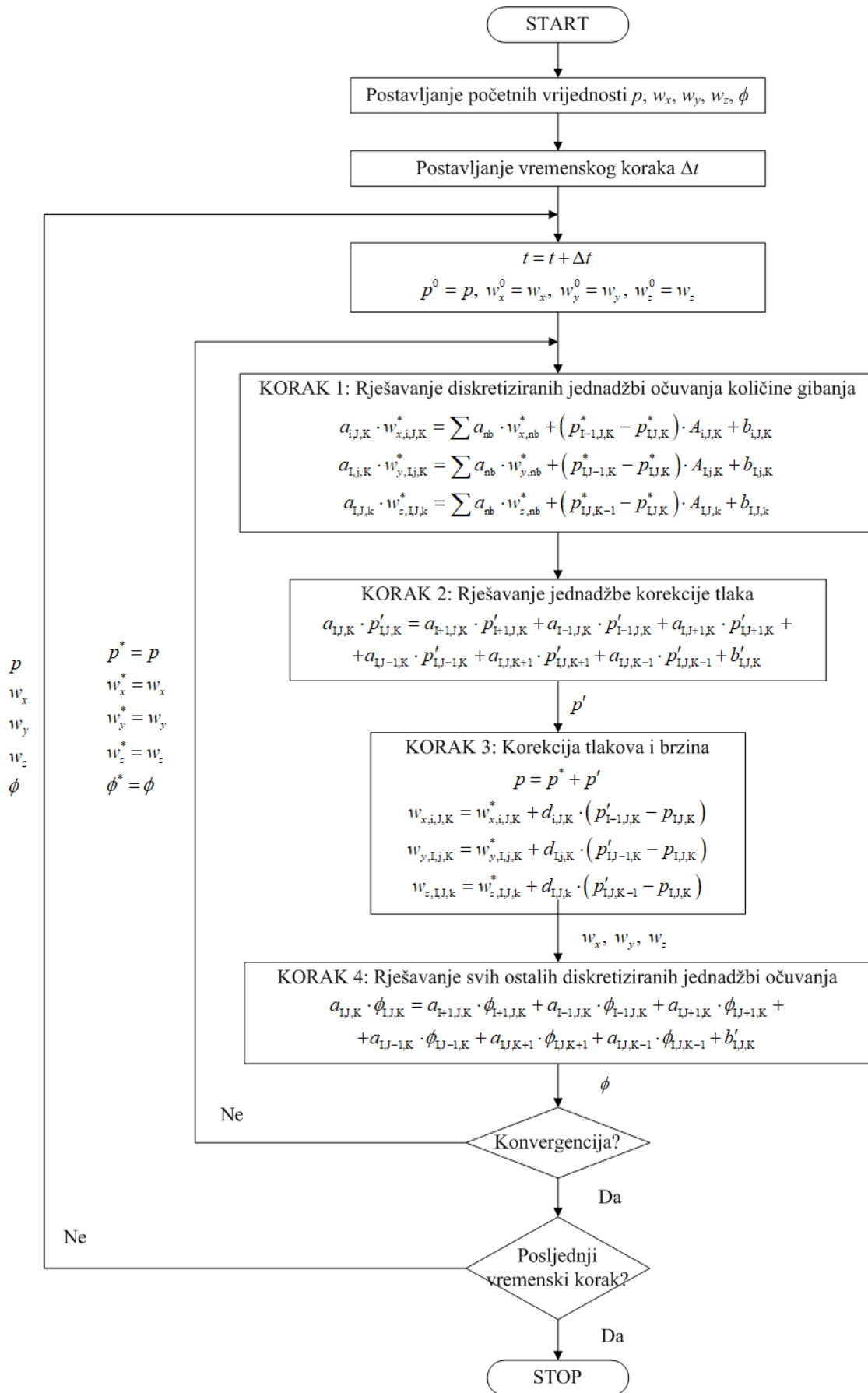
$$w_x^{\text{new}} = \alpha_{w,x} \cdot w_x + (1 - \alpha_{w,x}) \cdot w_x^{(n-1)} \quad (6.40)$$

$$w_y^{\text{new}} = \alpha_{w,y} \cdot w_y + (1 - \alpha_{w,y}) \cdot w_y^{(n-1)} \quad (6.41)$$

$$w_z^{\text{new}} = \alpha_{w,z} \cdot w_z + (1 - \alpha_{w,z}) \cdot w_z^{(n-1)} \quad (6.42)$$

Ovaj postupak, zajedno s rješavanjem ostalih diskretiziranih jednadžbi očuvanja, ponavlja se sve dok se ne postigne konvergencija, odnosno dok se ne postigne željeni kriterij točnosti.

Dijagram toka nestacionarnog SIMPLE algoritma prikazan je na slici 6.2.

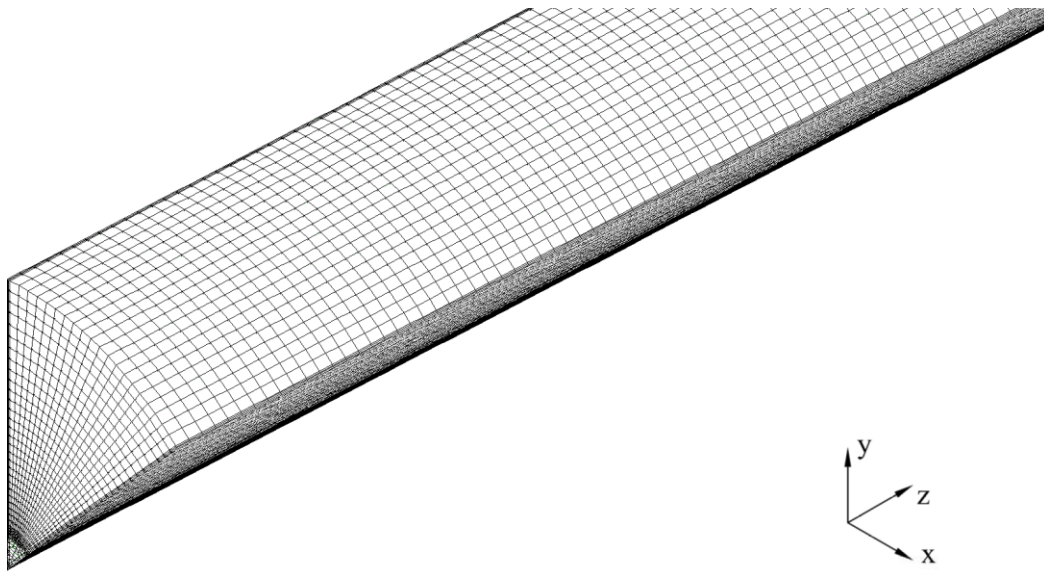


Slika 6.2. Dijagram toka nestacionarnog SIMPLE algoritma



## 6.2. Umrežavanje domene numeričkog proračuna

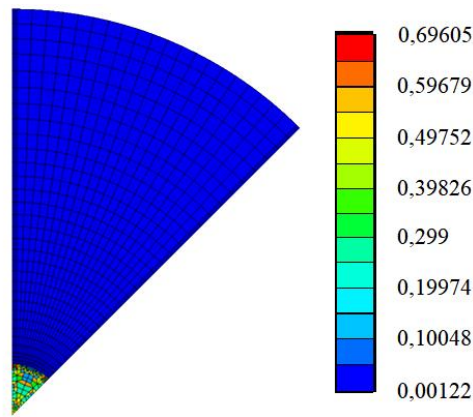
Za izradu geometrije domene numeričkog proračuna, kao i za njezino umrežavanje, korišten je programski paket Ansys, verzije 18.2. Domena je izrađena u potprogramu Geometry, nakon čega je podijeljena u kontrolne volumene u potprogramu Meshing. Na slici 6.3 prikazana je strukturirana numerička mreža s 268500 kontrolnih volumena, dobivena za geometrijske karakteristike koje odgovaraju onima latentnog spremnika topline na kojem su vršena eksperimentalna istraživanja.



Slika 6.3. Strukturirana numerička mreža s 268500 kontrolnih volumena

Oblik kontrolnog volumena može znatno utjecati na točnost numeričkog rješenja. Ovisno o prirodi razmatranog fizikalnog problema, kvaliteta mreže može se ispitati kroz različite kriterije. Jedan od glavnih pokazatelja kvalitete mreže je faktor iskrivljenosti (eng. *skewness*), koji je za trodimenzijske prizmatične mreže definiran omjerom najvećeg odstupanja kuta u kontrolnom volumenu od pravog kuta i iznosa pravog kuta. Vrijednost faktora iskrivljenosti 0 predstavlja idealni oblik kontrolnog volumena, u kojem su sve stranice i kutovi jednaki. Veliki faktor iskrivljenosti nepovoljan je budući da smanjuje točnost i negativno utječe na stabilnost rješenja. Za trodimenzijske mreže, maksimalna vrijednost manja od 0,9 te prosječna vrijednost manja od 0,4 smatraju se zadovoljavajućima [76].

Raspodjela vrijednosti faktora iskrivljenosti za prikazanu mrežu dana je na slici 6.4.



Slika 6.4. Raspodjela vrijednosti faktora iskrivljenosti za generiranu mrežu od 268500 kontrolnih volumena

Vidljivo je da najveća vrijednost ovog faktora ne prelazi 0,7, a njegova prosječna vrijednost za cjelokupnu mrežu iznosi 0,0658. Proizlazi da dobivena mreža ispunjava oba zadana kriterija te se može ocijeniti zadovoljavajućom po pitanju faktora iskrivljenosti.

### 6.3. Korištena računalna i programska oprema

Numeričko rješavanje razmatranog problema provedeno je korištenjem programa Ansys Fluent 18.2, koji koristi metodu kontrolnih volumena za numeričko rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi očuvanja. Numeričko rješavanje provedeno je uz dvostruku preciznost (eng. *double precision*) zapisa brojeva, odnosno formatu u kojem se brojevi zapisuju pomoću 64 bita računalne memorije, čime se postiže veća aritmetička točnost. Proračuni se rješavaju u paralelnom radu računala s 8 procesorskih jedinica (jezgara), pri čemu se omogućuje rješavanje više procesa istovremeno te brže postizanje rješenja. Numerički proračuni izvršeni su na računalu s 32-jezgrenim procesorom Intel Xeon W-3245.

Unutar programa Ansys Fluent, za povezivanje polja tlakova i polja brzina odabran je prethodno opisani algoritam SIMPLE. Za diskretizaciju jednadžbe korekcije tlaka odabrana je diskretizacijska shema PRESTO! (eng. *pressure staggering option*), preporučena za probleme koji uključuju slobodnu konvekciju [77]. Također je odabrana i prethodno opisana kvadratna upwind shema (QUICK), kojom se diskretiziraju konvektivni članovi u jednadžbama očuvanja količine gibanja i energije te potpuno implicitna metoda za diskretizaciju po vremenu. Usvojene su preporučene vrijednosti podrelaksacijskih faktora; 0,3 za jednadžbe očuvanja mase, 0,6 za jednadžbe očuvanja količine gibanja i 1 za jednadžbe očuvanja energije. Također, usvojeni

kriteriji konvergencije za jednadžbe očuvanja iznose  $10^{-3}$  za jednadžbe očuvanja mase te  $10^{-6}$  za jednadžbe očuvanja količine gibanja i energije.

#### **6.4. Prilagodba postojećeg numeričkog postupka za modeliranje prijelaza topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline**

Računalni program Ansys Fluent koristi ugrađenu numeričku proceduru za proračun izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja temeljenu na entalpijskoj metodi. Međutim, uočeno je da postojeći numerički postupak nije prikladan za modeliranje taljenja i skrućivanja, odnosno procesa izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline s malim toplinskim vodljivostima. Zbog toga je bilo potrebno razviti niz prilagodbi numeričkog postupka kako bi se njime mogli modelirati procesi taljenja i skrućivanja parafina.

Polje temperatura na granici poddomene stijenke bilo je potrebno povezati s poljem entalpija na granici poddomene akumulatora topline. Izmjena topline između površine stijenke i akumulatora topline odvija se provođenjem, a smjer toplinskog toka je poprečno na slojeve. Prema [78], prosječni koeficijent provođenja topline u tom slučaju iznosi:

$$\bar{\lambda} = \frac{\delta_{st} + \delta_{PCM}}{\frac{\delta_{st}}{\lambda_{st}} + \frac{\delta_{PCM}}{\lambda_{PCM}}} \quad (6.43)$$

Pri tome  $\delta_{st}$  i  $\delta_{PCM}$  [m] predstavljaju duljinu kontrolnog volumena stijenke, odnosno akumulatora topline u smjeru provođenja topline, a  $\lambda_{st}$  i  $\lambda_{PCM}$  [W/mK] koeficijenti su toplinske vodljivosti stijenke, odnosno akumulatora topline. Izraz za toplinski tok proširen je tako da za vrijeme promjene agregatnog stanja uključuje i izmjenu latentne topline:

$$\dot{q} = \pm \frac{\bar{\lambda}}{\delta_{st} + \delta_{PCM}} \cdot \left[ (T_{st} - T_{PCM}) + \gamma \cdot \frac{L}{c_{PCM}} \right] \quad (6.44)$$

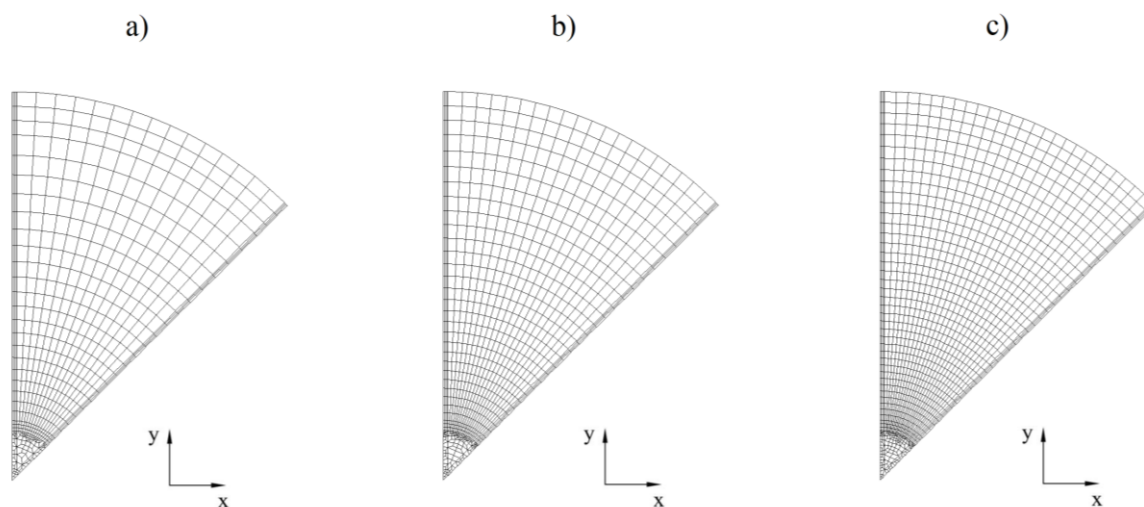
Iz izraza je vidljivo da se osim toka osjetne topline, opisanog Fourierovim zakonom provođenja topline, pri promjeni agregatnog stanja dodaje i tok latentne topline, čiji je intenzitet ovisan o udjelu kapljevite faze te specifičnoj latentnoj toplini i specifičnom toplinskom kapacitetu

akumulatora topline. Ove su prilagodbe u numerički postupak ugrađene nizom korisničkih funkcija (eng. *user-defined function*, UDF), napisanih u programskom jeziku C, koje su potom kompajlirane u strojni jezik programom Microsoft Visual Studio te povezane s programom za numeričko rješavanje Ansys Fluent. Osim za povezivanje polja temperatura na granici poddomene stijenke s poljem entalpija na granici poddomene akumulatora topline, dodatne korisničke funkcije napisane su za posredno računanje temperatura iz proračunatih entalpija u poddomeni akumulatora topline, analogno izrazima (5.31)-(5.33), te definiranje ponora količina gibanja prilikom promjene agregatnog stanja akumulatora topline, prema izrazima (5.26)-(5.28).

### 6.5. Provjera utjecaja gustoće mreže i veličine vremenskog koraka na rješenje

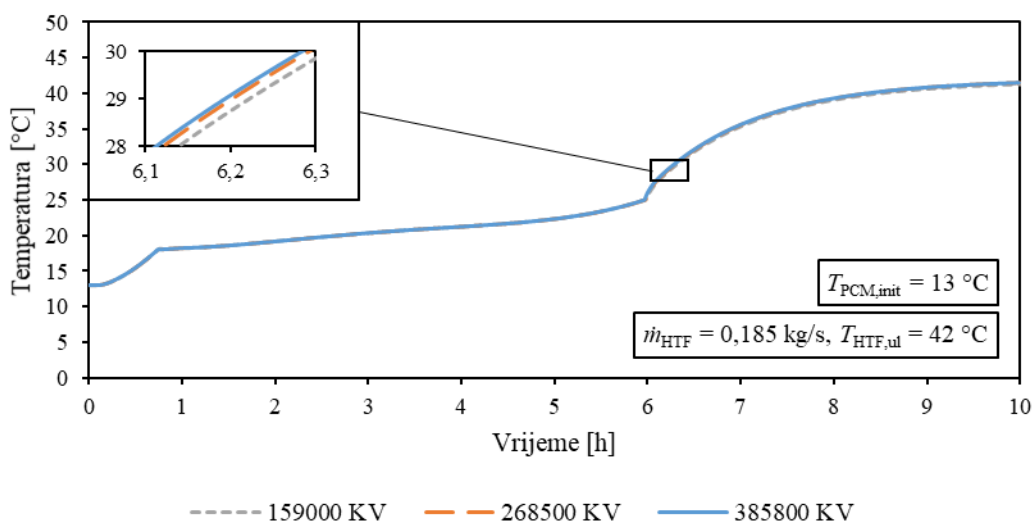
Osim o kvaliteti geometrije izrađene mreže, točnost numeričkog rješenja ovisi i o gustoći mreže kojom je diskretizirana domena. Povećavanjem gustoće mreže, odnosno broja čvorova u kojima se računa rješenje, povećava se točnost rješenja. Međutim, povećanje gustoće mreže može znatno usporiti numerički proračun, a u nekim slučajevima i dovesti do nemogućnosti postizanja zadane razine konvergencije [79]. Numeričko rješenje mora biti neovisno o veličini mreže, odnosno usvojena mreža mora biti takva da daljnjim povećavanjem njezine gustoće nema znatnijih promjena u dobivenim rješenjima [80].

Za razmatrani problem uspoređeni su rezultati dobiveni numeričkim proračunom za tri različite mreže; sa 159000, 268500 i 385800 kontrolnih volumena (KV), prikazane na slici 6.5.



Slika 6.5. Analizirane mreže različitih gustoća za razmatrani problem, a) 159000 kontrolnih volumena, b) 268500 kontrolnih volumena, c) 385000 kontrolnih volumena

Provjera utjecaja gustoće mreže provedena je usporedbom vremenskih promjena temperatura akumulatora topline dobivenih numeričkim proračunima za različite gustoće mreže prilikom taljenja na poziciji  $T_5$  (aksijalna pozicija 0,75 m u odnosu na ulaz fluida prijenosnika topline i radijalna pozicija 0,055 m, gledano od središta cijevi). Ulazna temperatura i ulazna brzina fluida prijenosnika topline iznose 42 °C, odnosno 0,02 m/s. Početna temperatura u domeni iznosi 13 °C. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline za analizirane mreže prikazane su na slici 6.6.

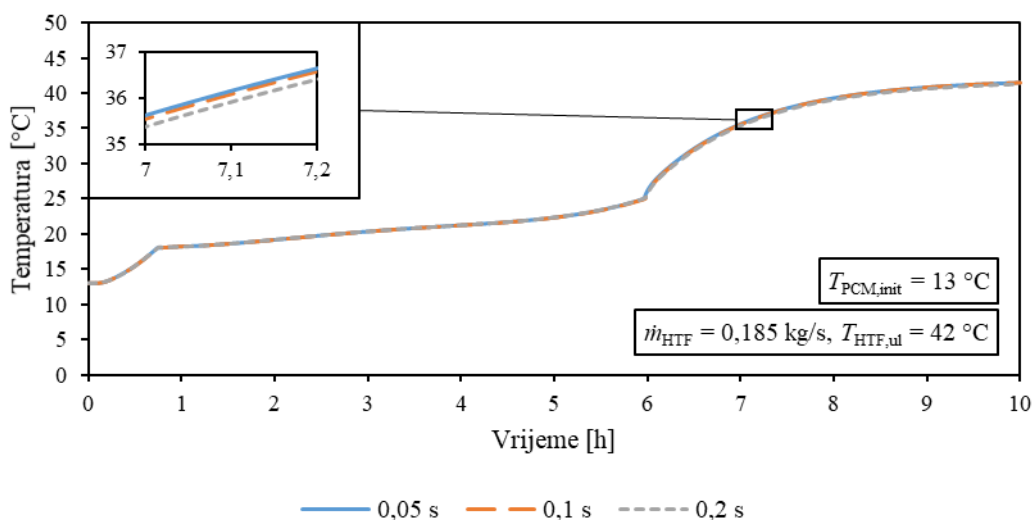


*Slika 6.6. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji  $T_5$  dobivene numeričkim proračunima za različite gustoće mreže*

Sa slike se može uočiti da nema značajnije razlike u vremenskim promjenama temperature akumulatora topline za mreže od 268500 i 385800 kontrolnih volumena, iz čega proizlazi da je postignuta neovisnost numeričkih rezultata o gustoći mreže. Za daljnje numeričke analize može se koristiti mreža od 268500 kontrolnih volumena.

Pri razmatranju nestacionarnih problema potrebno je također analizirati i utjecaj veličine odabranog vremenskog koraka na rješenje. Što je vremenski korak manji, numeričko rješenje bliže je stvarnom rješenju, ali znatno se produljuje trajanje proračuna. S druge strane, povećanjem vremenskog koraka moguće je dobiti rješenje koje zadovoljava postavljene kriterije točnosti, ali njegova prevelika vrijednost može dovesti do divergencije numeričkog proračuna. Potrebno je odabrati onaj vremenski korak nakon kojega daljnim smanjenjem njegove vrijednosti nema znatnijih promjena u rezultatima numeričkog proračuna.

Provjera utjecaja vremenskog koraka na rješenje razmatranog problema provedena je s prethodno usvojenom mrežom od 268500 kontrolnih volumena za tri različita vremenska koraka; 0,05 s, 0,1 s te 0,2 s. Uspoređene su vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji  $T_5$  (aksijalna pozicija 0,75 m u odnosu na ulaz fluida prijenosnika topline i radialna pozicija 0,055 m u odnosu na središte cijevi) za ulaznu temperaturu 42 °C i ulaznu brzinu fluida prijenosnika topline 0,02 m/s. Početna temperatura u domeni iznosi 13 °C. Usporedba vremenskih promjena temperatura akumulatora topline za navedene vremenske korake prikazana je na slici 6.7.



*Slika 6.7. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji  $T_5$  dobivene numeričkim proračunima za različite vremenske korake*

Iz rezultata je vidljivo da nema značajnije razlike u vremenskim promjenama temperatura akumulatora topline za vremenske korake 0,05 s i 0,1 s pa je za daljnje numeričke proračune taljenja i skrućivanja moguće koristiti vremenski korak od 0,1 s.

Za odabrane veličine mreže i vremenskog koraka, vrijeme potrebno za provedbu jednog sata numeričkog proračuna prema definiranom matematičkom modelu iznosi približno 16 h.

## **7. PROVJERA VALJANOSTI MATEMATIČKOG MODELA I NUMERIČKOG POSTUPKA**

### **7.1. Usporedba rezultata numeričkog i eksperimentalnog istraživanja**

U svrhu provjere valjanosti definiranog matematičkog modela i opisanog numeričkog postupka, numeričko je rješavanje primijenjeno na konstruirani latentni spremnik topline s pogonskim uvjetima koji su korišteni pri eksperimentalnim istraživanjima. Rezultati dobiveni numeričkim proračunom uspoređeni su s rezultatima dobivenim eksperimentalnim mjerenjima.

Iz provedenog eksperimentalnog istraživanja vidljivo je da se taljenje akumulatora topline odvija neizotermno, odnosno u malom temperaturnom rasponu, dok je skrućivanje uglavnom izotermno, tj. odvija se na približno konstantnoj temperaturi. Slično ponašanje niskotemperaturnih organskih akumulatora topline zabilježeno je i u ostalim eksperimentalnim istraživanjima dostupnima u literaturi [10, 11, 32, 35]. Kako bi rezultati numeričkog proračuna bolje opisivali fizikalne procese taljenja i skrućivanja akumulatora topline, odnosno više odgovarali eksperimentalnim rezultatima, ove su osobitosti unesene u numerički model. U slučaju taljenja, promjena faze definirana je unutar temperaturnog intervala u rasponu od 18 do 25 °C, dok je za skrućivanje definirana izotermna promjena faze na temperaturi od 25 °C. Budući da se utjecaj slobodne konvekcije uključuje prethodno opisanom Boussinesqovom aproksimacijom, gustoća akumulatora topline je konstantna i njezina vrijednost u numeričkim proračunima usvojena je jednakom u krutoj i kapljevitoj fazi akumulatora topline, a računa se kao aritmetička sredina od proizvođača deklariranih gustoća za krutu, odnosno kapljevitu fazu. Fizikalna svojstva akumulatora topline, fluida prijenosnika topline i stijenke (cijevi i lamela), korištena u numeričkim proračunima, prikazana su u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Svojstva akumulatora topline, fluida prijenosnika topline i stijenke (cijevi i lamela) korištena u numeričkim proračunima

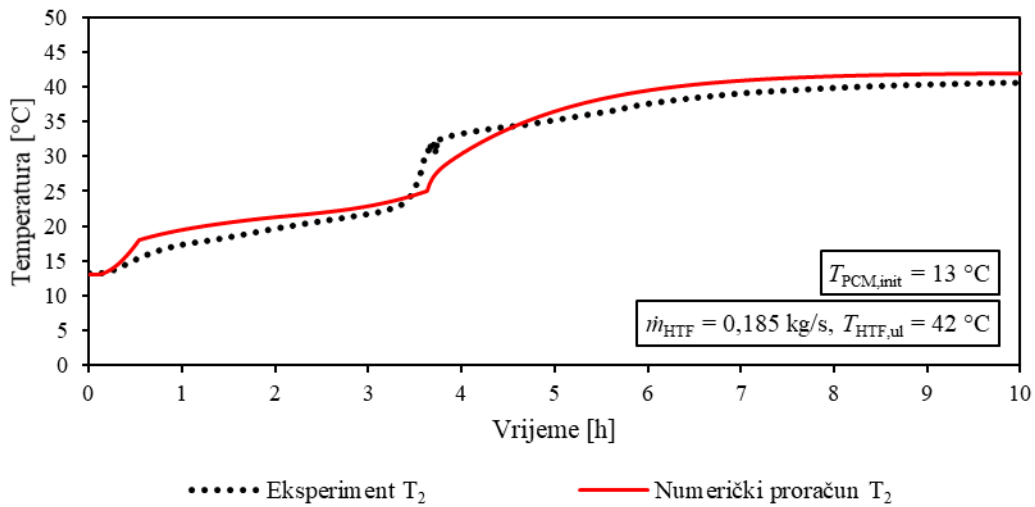
Svojstvo	Akumulator topline	Fluid prijenosnik topline	Stijenka (cijev i lamele)
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	820	998,2	2719
Koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]	0,2	0,6	202,4
Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]	2000	4182	871
Dinamička viskoznost [Pa·s]	0,0036	0,001003	-
Specifična latentna toplina [J/kg]	170000	-	-
Temperatura solidusa [°C]	taljenje: 18	-	-
	skrućivanje: 25	-	-
Temperatura likvidusa [°C]	taljenje: 25	-	-
	skrućivanje: 25	-	-
Koeficijent toplinskog istezanja [1/K]	0,001	-	-

Domena je odabrana prema geometrijskim karakteristikama latentnog spremnika topline korištenog u eksperimentalnim istraživanjima, a numerički proračuni provedeni su za prethodno odabrane veličine mreže i vremenskog koraka. Rezultati numeričkog proračuna pri taljenju i skrućivanju akumulatora topline, koji je izvršen uzimajući u obzir utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline tijekom taljenja i skrućivanja, uspoređeni su s onima dobivenim eksperimentalno. Usporedba je provedena za konstantnu ulaznu temperaturu fluida prijenosnika topline; u procesu taljenja iznosila je 42 °C, a u procesu skrućivanja 7 °C. Također, oba procesa izvedena su s konstantnim protokom fluida prijenosnika topline od 0,185 kg/s, što odgovara ulaznoj brzini u cijev od 0,02 m/s. Raspodjela temperatura u početnom trenutku bila je jednolika i iznosila je 13 °C za slučaj taljenja, odnosno 42 °C za slučaj skrućivanja.

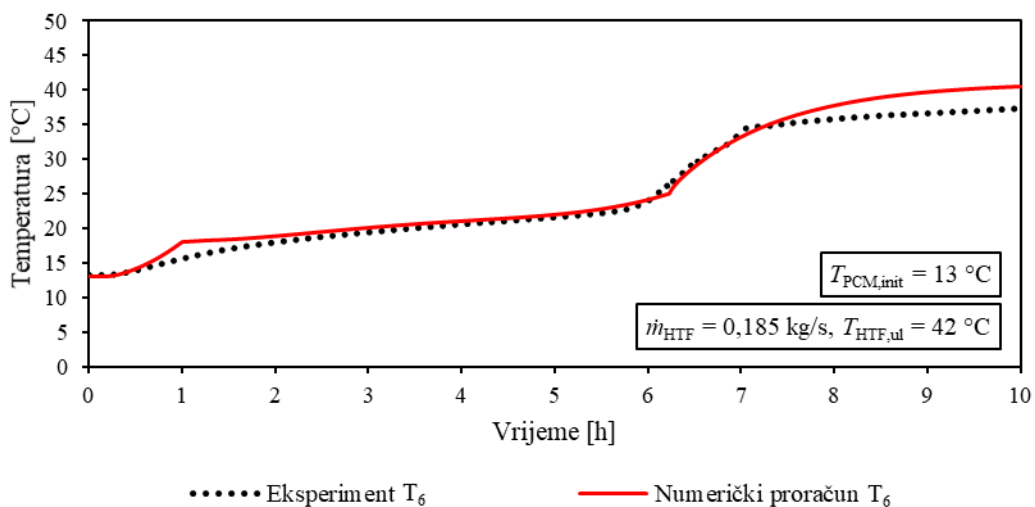
Na slikama 7.1 i 7.2 prikazane su numerički i eksperimentalno dobivene vremenske promjene temperature akumulatora topline prilikom taljenja, za poziciju T<sub>2</sub> (aksijalna pozicija 0,2 m i



radijalna pozicija 0,055 m) te za poziciju  $T_6$  (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,075 m).



*Slika 7.1. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja dobivene eksperimentalno i numerički na poziciji  $T_2$*

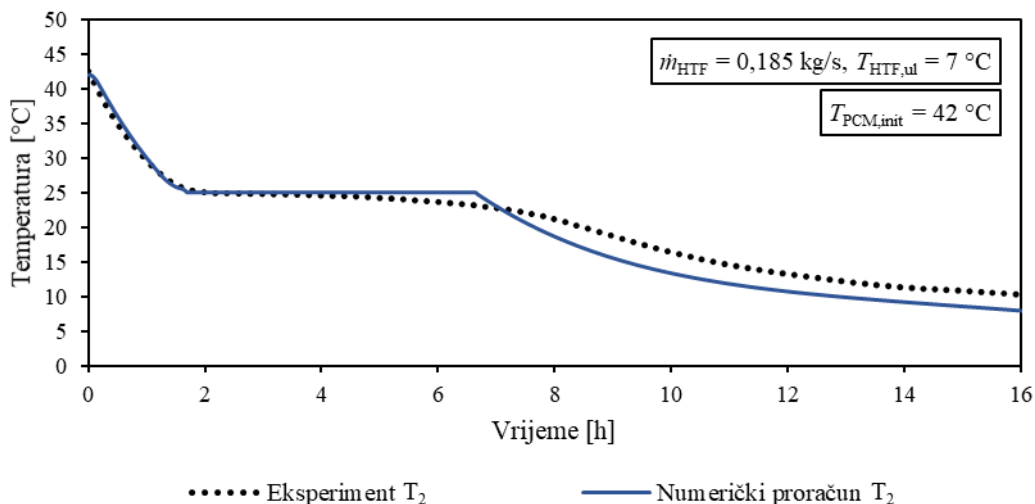


*Slika 7.2. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja dobivene eksperimentalno i numerički na poziciji  $T_6$*

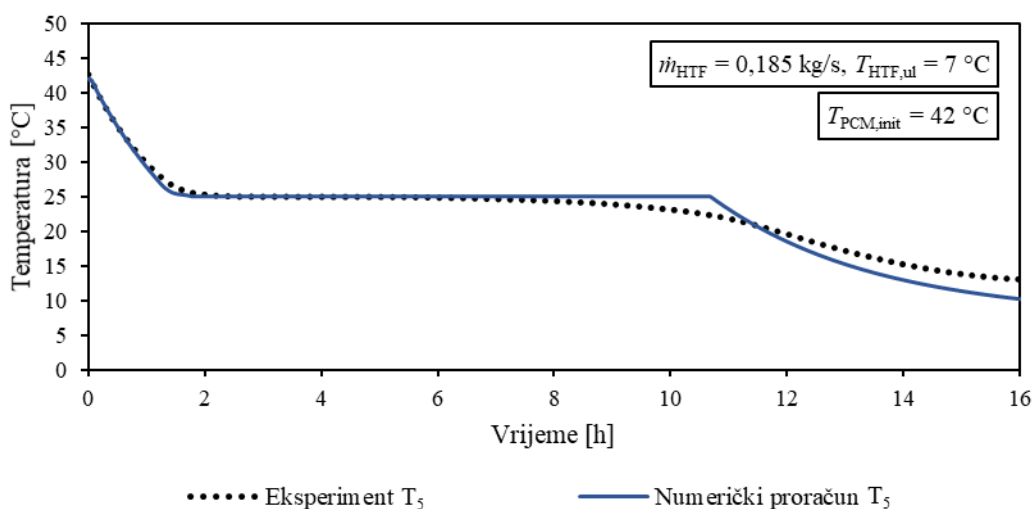
Sa slika se uočava dobra podudarnost promjena temperatura dobivenih numeričkim proračunom s onima dobivenim eksperimentalnim mjerenjima, što ukazuje da se prethodno

definirani model i numerički postupak mogu primijeniti za opisivanje procesa taljenja akumulatora topline u latentnom spremniku topline cijevne konfiguracije.

Slike 7.3 i 7.4 prikazuju numerički i eksperimentalno dobivene vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja za poziciju T<sub>2</sub> (aksijalna pozicija 0,2 m i radijalna pozicija 0,055 m), odnosno za poziciju T<sub>5</sub> (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,055 m).



Slika 7.3. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene eksperimentalno i numerički na poziciji T<sub>2</sub>



Slika 7.4. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene eksperimentalno i numerički na poziciji T<sub>5</sub>

Iz usporedbe vremenskih promjena temperatura može se opaziti dobro poklapanje rezultata numeričkog proračuna s eksperimentalnim rezultatima, što ukazuje da se opisani model i postupak mogu koristiti za modeliranje procesa skrućivanja akumulatora topline u cijevnim latentnim spremnicima topline.

## **7.2. Analiza utjecaja slobodne konvekcije na izmjenu topline**

Nakon provjere valjanosti matematičkog modela i numeričkog postupka, istražen je utjecaj slobodne konvekcije pri procesima taljenja i skrućivanja akumulatora topline.

Modeliranje slobodne konvekcije pri promjeni faze osobito je zahtjevno zbog istovremenog računanja pomaka granice faza i polja brzina u kapljevitoj fazi akumulatora topline, što zahtijeva znatnu računalnu snagu, a time i duže trajanje proračuna u odnosu na slučaj u kojem se izmjena topline opisuje samo provođenjem. Zbog toga neki istraživači [10, 11, 81, 82] u numeričkim analizama zanemaruju utjecaj slobodne konvekcije i pritom dobivaju rezultate koji se zadovoljavajuće poklapaju s eksperimentalnim mjerenjima, što ukazuje da je zanemarivanjem slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline moguće sa zadovoljavajućom točnošću opisati izmjenu topline u latentnom spremniku topline uz znatno brže postizanje rješenja numeričkog proračuna. Međutim, prije usvajanja tog pojednostavljenja, potrebno je istražiti njezin utjecaj na izmjenu topline u promatranom latentnom spremniku topline, budući da utjecaj slobodne konvekcije uvelike ovisi o geometriji i konfiguraciji latentnog spremnika topline, pogonskim uvjetima i vrsti akumulatora topline.

Za latentni spremnik topline s uzdužnim lamelama koji je analiziran u ovom radu, uspoređeni su rezultati numeričkih proračuna u kojima je slobodna konvekcija u kapljevitoj fazi akumulatora topline uzeta u obzir i u kojima je zanemarena s rezultatima dobivenim eksperimentalnim mjerenjima na konstruiranom latentnom spremniku topline. Matematički model koji uključuje slobodnu konvekciju u kapljevitoj fazi prethodno je opisan, a u modelu u kojem je ona zanemarena, pojednostavljaju se jednadžbe očuvanja za poddomenu akumulatora topline na način da se ne koriste jednadžba očuvanja mase i jednadžbe očuvanja količine gibanja, a jednadžba očuvanja energije ne sadrži konvektivni član. Time se dio pojednostavljenog matematičkog modela, u kojem se zanemaruje utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline, u poddmeni akumulatora topline svodi na jednadžbu očuvanja energije, kojom je opisana nestacionarna izmjena toplina provođenjem topline te ona ima oblik:

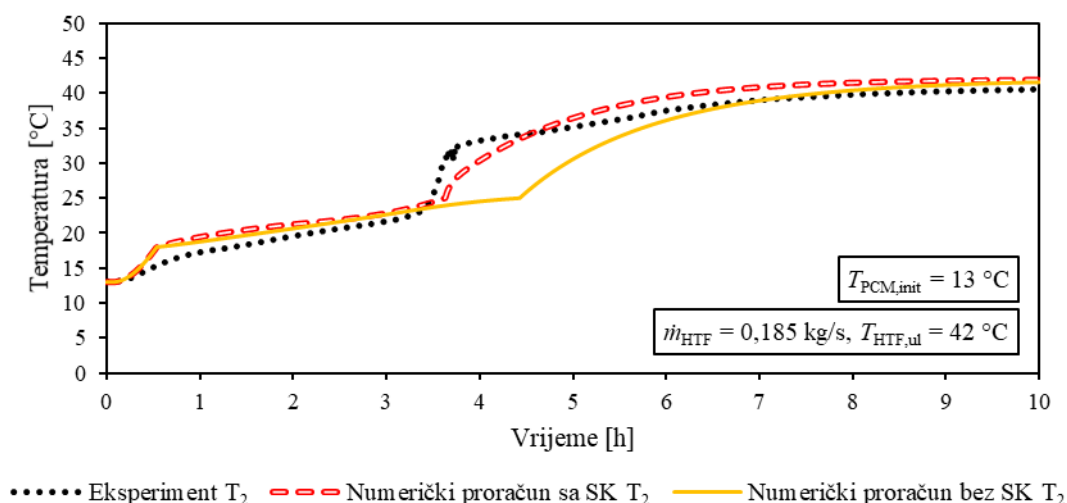
$$\frac{\partial(\rho_{\text{PCM}} \cdot H)}{\partial t} = \frac{\lambda_{\text{PCM}}}{c_{\text{PCM}}} \text{div}(\text{grad } H) \quad (7.1)$$

Jednadžbe očuvanja za poddomene fluida prijenosnika topline i stijenke ostaju nepromijenjene.

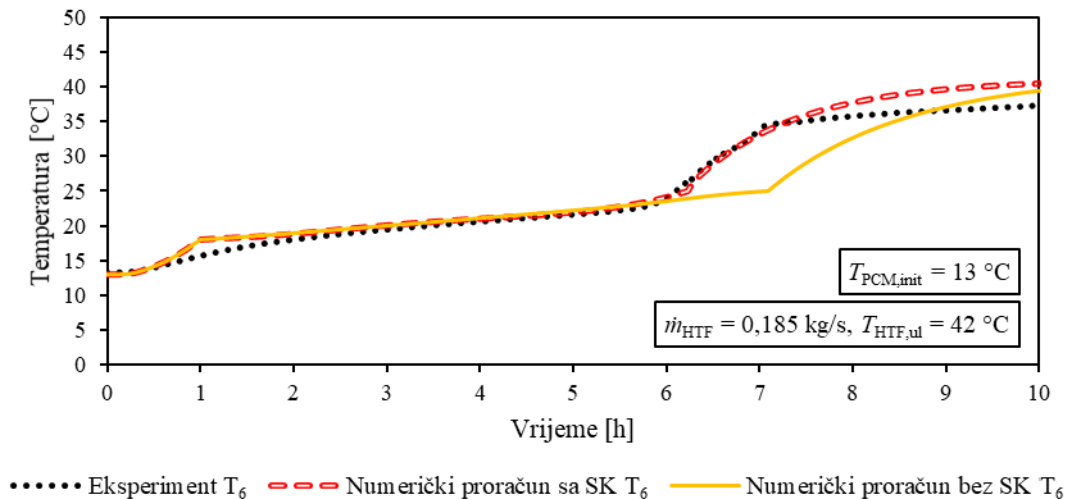
Numeričkim rješavanjem ovih dvaju definiranih matematičkih modela, koji su provedeni za niz različitih pogonskih uvjeta, uspoređene su vremenske promjene temperatura akumulatora topline dobivene numerički i eksperimentalno te raspodjele temperatura i udjela kapljevite faze u oba slučaja kako bi se ocijenio utjecaj slobodne konvekcije (SK) na taljenje i skrućivanje akumulatora topline, odnosno procese spremanja i korištenja topline. Prikazani su i vektori brzina dobiveni numeričkim proračunom koji u obzir uzima utjecaj slobodne konvekcije. Prikazani rezultati dobiveni su za pogonske i početne uvjete korištene u provedenoj provjeri valjanosti modela koji uključuje slobodnu konvekciju.

### 7.2.1. Taljenje (spremanje topline)

Na slikama 7.5 i 7.6 prikazane su vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja za poziciju T<sub>2</sub> (aksijalna pozicija 0,2 m i radijalna pozicija 0,055 m), odnosno za poziciju T<sub>6</sub> (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,075 m) dobivene numerički obama modelima te su uspoređene s analognim temperaturama iz eksperimentalnih istraživanja.



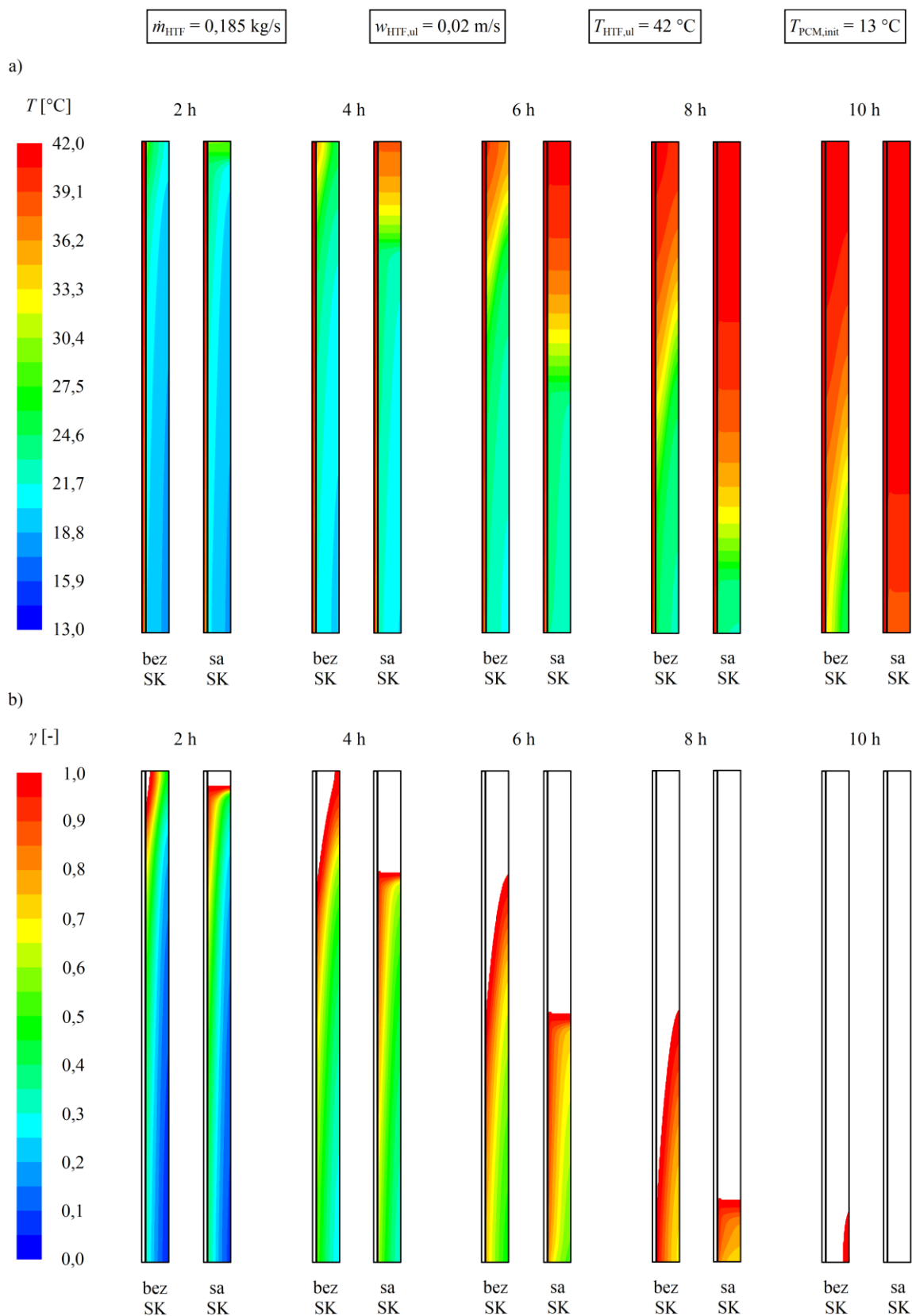
*Slika 7.5. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja dobivene eksperimentalno i numerički s i bez utjecaja slobodne konvekcije na poziciji T<sub>2</sub>*



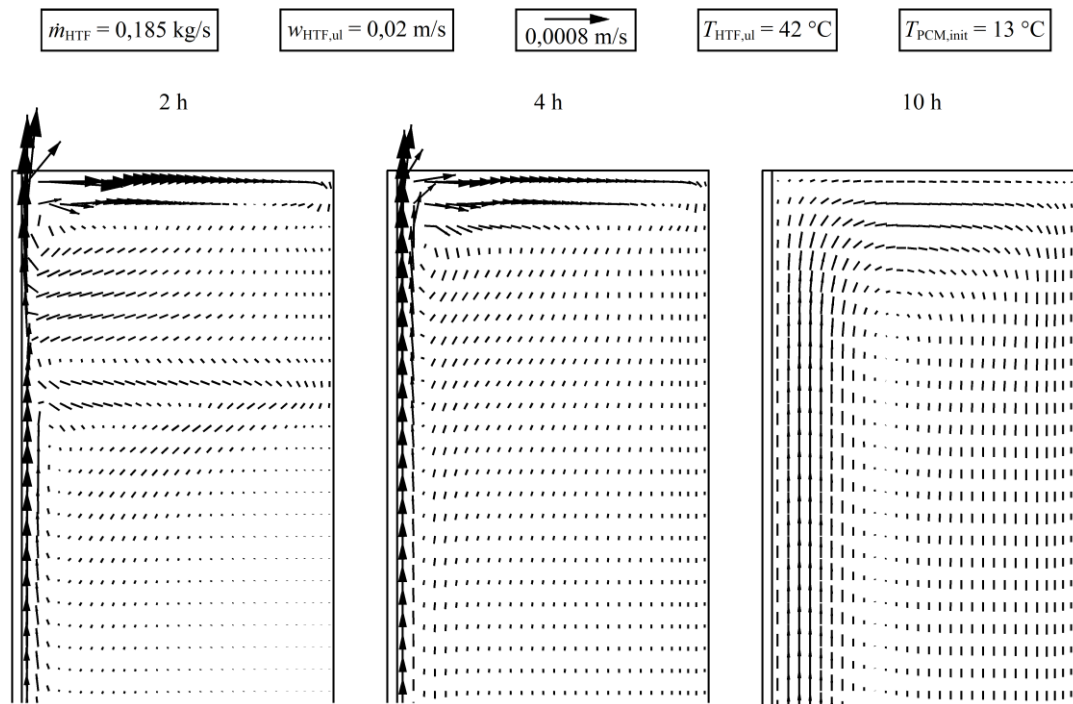
*Slika 7.6. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja dobivene eksperimentalno i numerički s i bez utjecaja slobodne konvekcije na poziciji  $T_6$*

Sa slika je vidljiva nepodudarnost rezultata numeričkog proračuna koji zanemaruje utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline s rezultatima eksperimentalnih mjerenja u kasnijim fazama procesa taljenja i u potpuno rastaljenom akumulatoru topline. Rezultati modela koji uključuje slobodnu konvekciju dobro se poklapaju s eksperimentalnim rezultatima tijekom cijelog procesa spremanja topline, što ukazuje na značajan utjecaj slobodne konvekcije tijekom procesa taljenja, koji se ne može zanemariti u svrhu pojednostavljenja matematičkog modela i ubrzavanja numeričkog proračuna.

Raspodjele temperatura i udjela kapljevite faze u središnjoj ravnini između lamela za proračunska vremena 2, 4, 6, 8 i 10 h, dobivene numeričkim proračunima s i bez utjecaja slobodne konvekcije, prikazane su na slici 7.7. Vektori brzina pri vrhu poddomene akumulatora topline, dobiveni numeričkim proračunom sa slobodnom konvekcijom, prikazani su na slici 7.8 za proračunska vremena 2, 4 i 10 h.



*Slika 7.7. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravni između lamela prilikom taljenja akumulatora topline, dobivenih numeričkim proračunima s i bez slobodne konvekcije u proračunskim vremenima 2, 4, 6, 8 i 10 h*



Slika 7.8. Vektori brzina akumulatora topline u središnjoj ravini između lamela na vrhu poddomene akumulatora topline prilikom taljenja u proračunskim vremenima 2, 4 i 10 h, dobiveni numeričkim proračunom sa slobodnom konvekcijom

Sa slike 7.7 se može uočiti da se procesi taljenja opisani dvama modelima znatno razlikuju. Na početku procesa, dok je akumulator topline u krutom stanju, toplina se izmijenjuje provođenjem pa oba modela daju podudarne rezultate (vidljivo i sa slika 7.5 i 7.6). Postizanjem temperature solidusa od 18 °C započinje proces taljenja, pri čemu akumulator topline počinje akumulirati latentnu toplinu, a u slučaju kad je slobodna konvekcija uključena u model, uz rub stijenke cijevi i lamela formira se kapljeviti sloj i slobodna konvekcija doprinosi izmjeni topline. Kako proces odmiče i povećava se udio kapljevite faze, gibanje kapljevitih čestica akumulatora topline pojačava se, što je vidljivo iz vektora brzina. Oni također pokazuju uzgonsko gibanje čestica; najprije uz cijev i pri vrhu spremnika, a potom u cijeloj poddomeni akumulatora topline. Zbog utjecaja slobodne konvekcije, vrijeme potrebno da se sav akumulator topline rastali znatno je kraće u numeričkom proračunu sa slobodnom konvekcijom, odnosno temperatura likvidusa od 25 °C postignuta je brže nego u numeričkom proračunu koji u obzir uzima samo izmjenu topline provođenjem topline i zanemaruje utjecaj slobodne konvekcije. Razlika između rezultata najmanje je vidljiva za proračunsko vrijeme od 2 h i povećava se kako proces odmiče. Nakon završetka taljenja, izmijenjuje se samo osjetna toplina; provođenjem topline i

slobodnom konvekcijom u numeričkom proračunu sa slobodnom konvekcijom, odnosno provođenjem topline u numeričkom proračunu bez slobodne konvekcije.

Iz rezultata numeričkog proračuna sa slobodnom konvekcijom može se opaziti razlika u obliku izotermi u području potpuno rastaljenog akumulatora topline i područja u kojem je u krutom stanju ili mijenja fazu. Također, nakon što se čestice akumulatora topline uz cijev potpuno rastale, uočava se intenzivno gibanje čestica rastaljenog akumulatora topline u radijalnom smjeru (također vidljivo iz prikazanih vektora brzina), što znatno pojačava izmjenu topline i rezultira gotovo trenutačnim završetkom taljenja okolnih čestica akumulatora topline. Sličnu pojavu u cijevnim latentnim spremnicima topline opazili su Fornarelli i sur. [83] te Seddegh i sur. [84]. Fronta taljenja postupno napreduje prema dnu spremnika, a nakon što se sav akumulator topline rastalio, čestice kapljeviteg akumulatora topline, vođene slobodnom konvekcijom, nastavljaju se gibati zbog međusobne razlike temperatura sve do postizanja toplinske ravnoteže.

U slučaju u kojem je zanemarena slobodna konvekcija, nije vidljiva promjena oblika izotermi ovisno o tome je li akumulator topline krutina, kapljevina ili u procesu taljenja, budući da uzgonsko gibanje akumulatora topline u kapljevitoj fazi nije uključeno u numerički proračun. Izmjena topline, a time i brzina taljenja, također je intenzivnija pri vrhu spremnika, no samo zbog pozicije ulaza fluida prijenosnika topline u spremnik, odnosno veće razlike temperatura između fluida i akumulatora topline. Intenzitet izmjene topline veći je uz cijev, a smanjuje se u radijalnom smjeru zbog male toplinske vodljivosti akumulatora topline, na što ukazuje blagi nagib izotermi u odnosu na pravac strujanja fluida prijenosnika topline.

Raspodjele udjela kapljevite faze pokazuju slična obilježja kao raspodjele temperatura u numeričkim proračunima s i bez slobodne konvekcije i analogne su s prethodnim opažanjima.

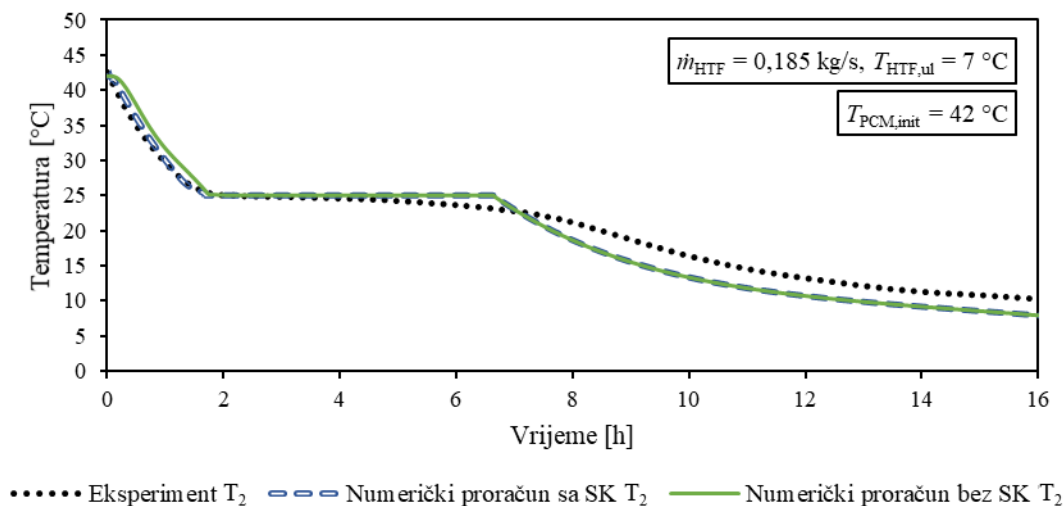
Iz prikazanih rezultata vidljivo je da je model koji uključuje slobodnu konvekciju u kapljevitoj fazi akumulatora topline prikladniji za opis procesa taljenja, gdje slobodna konvekcija ima značajan utjecaj na izmjenu topline, zbog čega je korišten u daljnjim numeričkim analizama taljenja u cijevnom latentnom spremniku topline s uzdužnim lamelama.

#### 7.2.2. Skrućivanje (korištenje topline)

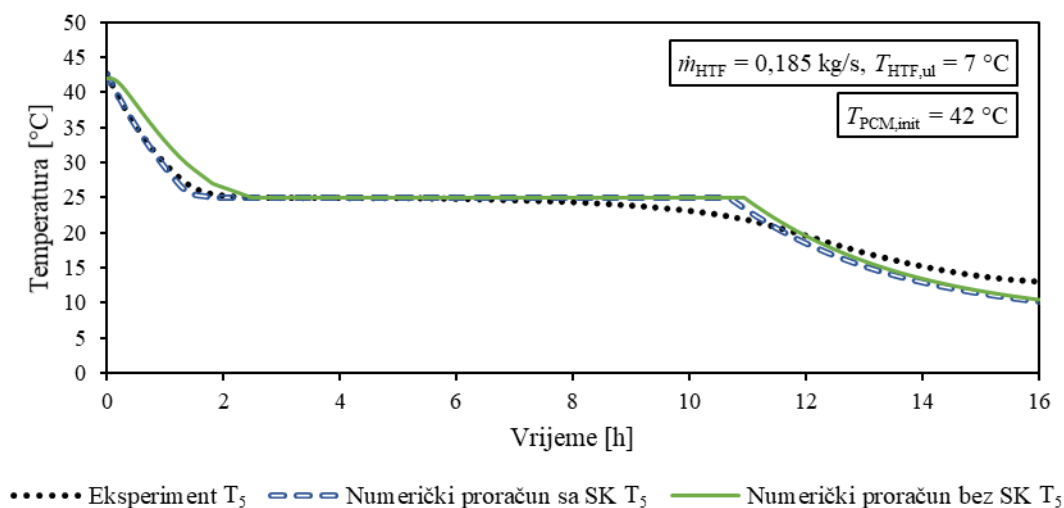
Vremenske promjene temperature akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene numeričkim rješavanjem dvaju modela, za poziciju  $T_2$  (aksijalna pozicija 0,2 m i radijalna



pozicija 0,055 m) te za poziciju T<sub>5</sub> (aksijalna pozicija 0,75 m i radijalna pozicija 0,055 m) uspoređene su s odgovarajućim vrijednostima iz eksperimentalnih mjerenja i prikazane na slikama 7.9 i 7.10.



*Slika 7.9. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene eksperimentalno i numerički s i bez utjecaja slobodne konvekcije na poziciji T<sub>2</sub>*

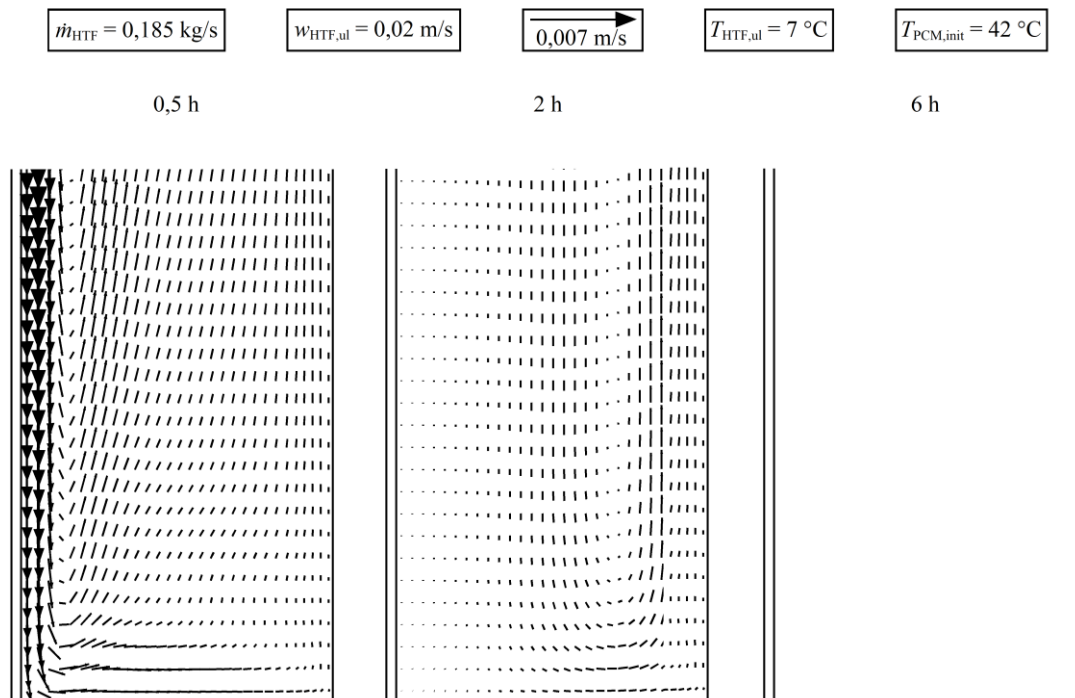


*Slika 7.10. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene eksperimentalno i numerički s i bez utjecaja slobodne konvekcije na poziciji T<sub>5</sub>*

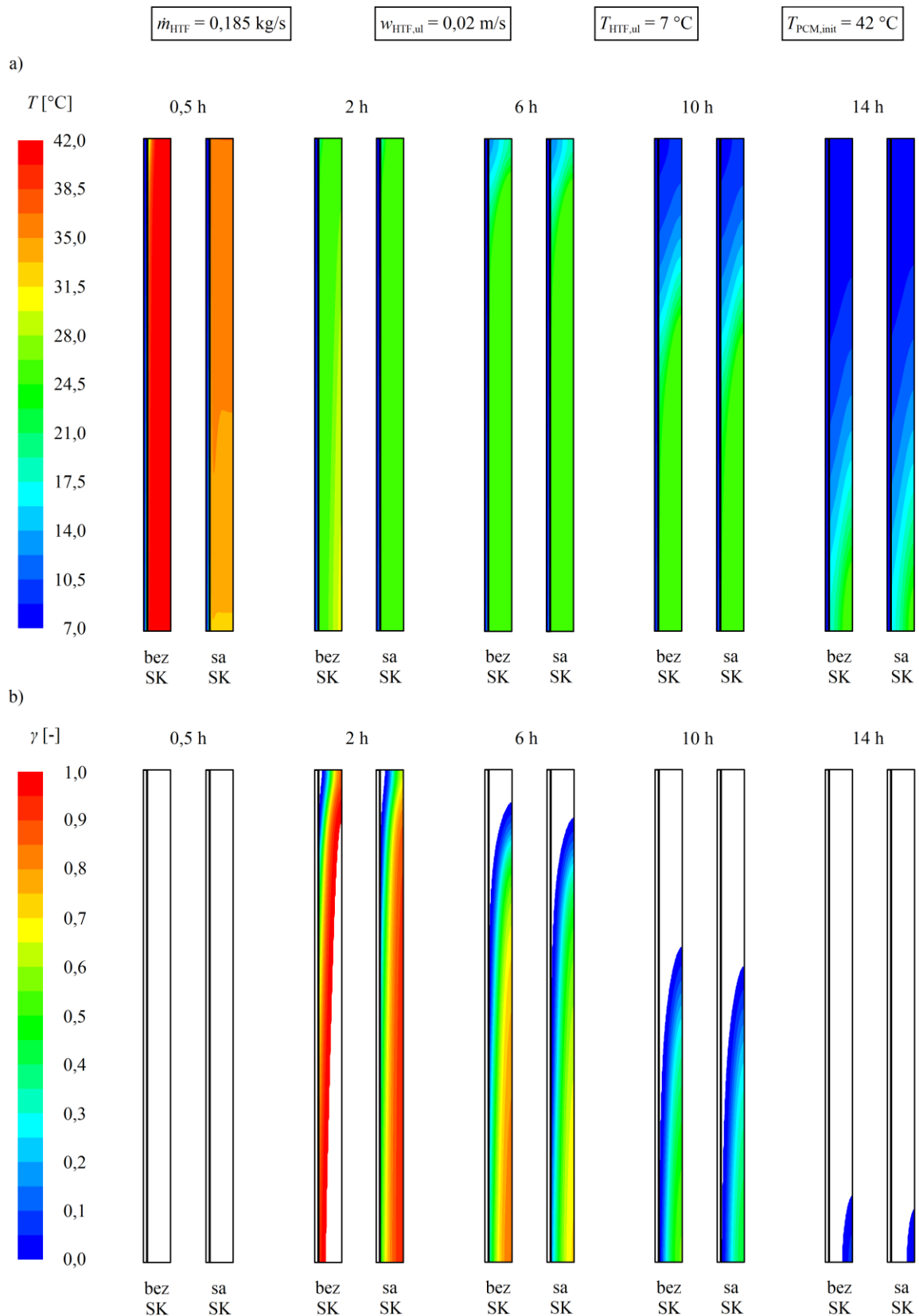
Sa slika se uočava sličnost rezultata dobivenih numeričkim rješavanjem dvaju modela te njihovo dobro poklapanje s rezultatima eksperimentalnih mjerenja, što ukazuje na mali utjecaj slobodne konvekcije u cjelokupnom procesu korištenja topline. Najveća nepodudarnost

prisutna je na početku procesa, dok je akumulator topline u potpuno kapljevitom stanju i u ranoj fazi skrućivanja, gdje je prisutno konvektivno gibanje čestica. Nakon što započne proces skrućivanja, utjecaj slobodne konvekcije smanjuje se i naposljetku nestaje, a promjene temperatura dobivene numeričkim proračunima s i bez slobodne konvekcije dobro se poklapaju međusobno i s eksperimentalnim rezultatima do kraja procesa.

Vektori brzina pri dnu poddomene akumulatora topline, dobiveni numeričkim rješavanjem modela koji uključuje slobodnu konvekciju, prikazani su na slici 7.11 za proračunska vremena 0,5, 2 i 6 h. Raspodjele temperatura i udjela kapljevite faze u središnjoj ravni između lamela za proračunska vremena 0,5, 2, 6, 10 i 14 h, dobivene numeričkim proračunima s i bez utjecaja slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline, prikazane su na slici 7.12.



*Slika 7.11. Vektori brzina akumulatora topline u središnjoj ravni između lamela na dnu poddomene akumulatora topline prilikom skrućivanja u proračunskim vremenima 0,5, 2 i 6 h, dobiveni numeričkim proračunom sa slobodnom konvekcijom*



*Slika 7.12. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom skrućivanja akumulatora topline, dobivenih numeričkim proračunima s i bez slobodne konvekcije u proračunskim vremenima 0,5, 2, 6, 10 i 14 h*

I iz ovih je prikaza najveća razlika između numeričkih rezultata dvaju modela vidljiva u početnoj fazi procesa, dok je akumulator topline potpuno rastaljen i predaje osjetnu toplinu. Usporedbom raspodjele temperatura za proračunsko vrijeme od 0,5 h, može se opaziti da hlađenjem kapljeviteg akumulatora topline dominira slobodna konvekcija; hladnije čestice akumulatora topline spuštaju se na dno spremnika (vidljivo iz vektora brzina), što rezultira intenzivnijom izmjenom topline na početku procesa korištenja topline, pogotovo oko cijevi i u donjem dijelu latentnog spremnika topline. Početna intenzivnija izmjena topline pri dnu spremnika vidljiva je i usporedbom slika 7.9 i 7.10; vremenske promjene temperatura dobivene numeričkim proračunima s i bez slobodne konvekcije vrlo se dobro poklapaju na poziciji  $T_2$ , dok je na poziciji  $T_5$ , smještenoj niže, razlika u promjenama temperatura vidljivija.

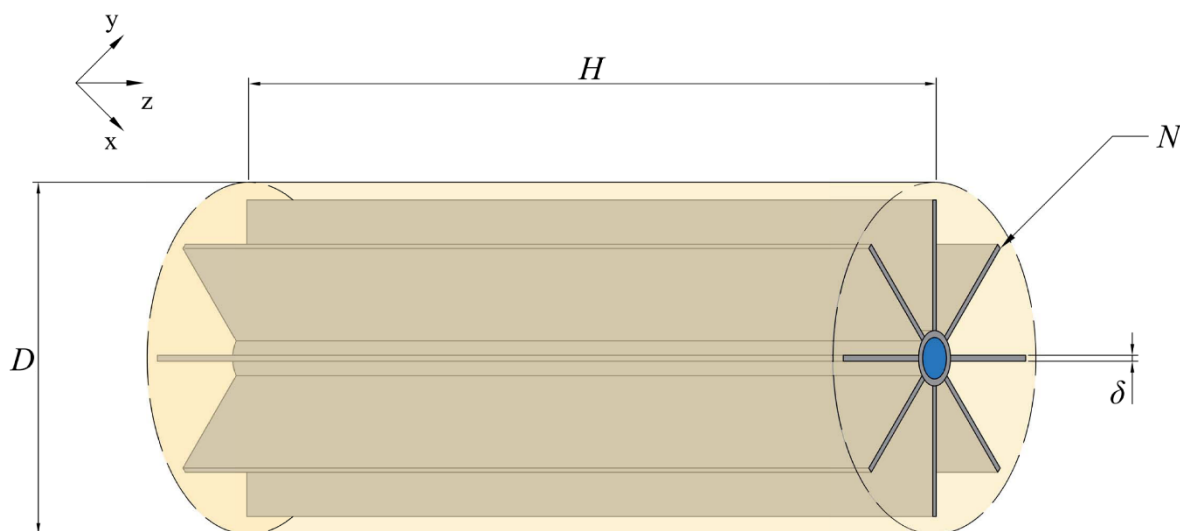
Kako proces skrućivanja odmiče, smanjuje se gibanje čestica akumulatora topline. Sukladno tome, raspodjele temperatura dobivene numeričkim proračunima s i bez slobodne konvekcije vrlo su slične nakon početka skrućivanja, odnosno nakon što se temperatura akumulatora topline smanji na  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  pa do kraja procesa korištenja topline. Nakon što je postignuta temperatura skrućivanja, započinje izotermna promjena faze čiji se napredak prati kroz promjenu udjela kapljevite faze. Razlika u udjelima kapljevite faze dobivenih dvama numeričkim proračunima postupno se smanjuje kako skrućivanje odmiče te oba numerička proračuna naposljetku rezultiraju vrlo sličnim raspodjelama kapljevite faze, što je vidljivo iz raspodjela u vremenima 6, 10 i 14 h. Proces skrućivanja završava u približno isto vrijeme (vidljivo iz mjernih pozicija na slikama 7.9 i 7.10), nakon čega se akumulatoru topline oduzima osjetna toplina i temperature akumulatora topline poklapaju se i u krutoj fazi.

Kao što je vidljivo iz usporedbi, rezultati dobiveni numeričkim proračunima s i bez utjecaja slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline vrlo su slični i dobro se slažu s rezultatima eksperimentalnih mjerenja gotovo u cijelosti trajanja procesa korištenja topline.

Vrijeme potrebno za provedbu jednog sata numeričkog proračuna koji zanemaruje utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline iznosi približno 8 h i gotovo je upola kraće od trajanja numeričkog proračuna koji u obzir uzima slobodnu konvekciju za isto proračunsko vrijeme. Zbog zanemarive pogreške i znatno kraćeg vremena trajanja proračuna, model koji zanemaruje utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline predstavlja prikladniju opciju za modeliranje procesa skrućivanja u latentnim spremnicima topline razmatrane geometrije i korišten je u daljnjim numeričkim analizama.

## 8. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA

Nakon provjere valjanosti matematičkog modela i numeričkog postupka, provedena je numerička analiza utjecaja geometrijskih parametara latentnog spremnika topline na izmjenu topline prilikom procesa spremanja, odnosno korištenja topline. Sukladno rezultatima prikazanim u prethodnom poglavlju, numerički proračuni taljenja akumulatora topline provedeni su tako da uključuju utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi, dok je njezin utjecaj u proračunima skrućivanja zanemaren. Numeričkim analizama istražen je utjecaj broja lamela ( $N$ ), omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi ( $H/D$ ) te debljine lamela ( $\delta$ ) na količinu akumulirane/predane topline i vrijeme potrebno za taljenje/skrućivanje akumulatora topline u latentnom spremniku topline. Shema razmatrane geometrije (cijev s opisanom kružnicom okolnog akumulatora topline), s označenim ispitivanim geometrijskim parametrima, prikazana je na slici 8.1.



*Slika 8.1. Shematski prikaz cijevi i pripadajućeg akumulatora topline s označenim geometrijskim parametrima ispitivanim u numeričkim analizama; broj lamela ( $N$ ), omjer visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi ( $H/D$ ) i debljina lamela ( $\delta$ )*

Numeričke analize provedene su s ulaznom temperaturom fluida prijenosnika topline  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  u analizama spremanja topline, odnosno  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  u analizama korištenja topline. Ulazna brzina fluida iznosila je  $0,02\text{ m/s}$  u oba procesa. Početna raspodjela temperatura u domeni bila je jednolika;  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  u slučaju spremanja topline, odnosno  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  u slučaju korištenja topline. Zbog različitih početnih razlika temperatura fluida prijenosnika topline i akumulatora topline u procesima

spremanja (29 °C), odnosno korištenja topline (35 °C), kapacitet latentnog spremnika topline za korištenje topline veći je od kapaciteta za spremanje topline.

Rezultati provedenih analiza uspoređeni su s referentnom konfiguracijom, koja odgovara opisanoj geometriji latentnog spremnika topline na kojem su provedena eksperimentalna istraživanja. U analizama spremanja topline, uspoređene su topline akumulirane u razdoblju od 8 h te vremena u kojima završava proces taljenja. U analizama korištenja topline, uspoređene su topline predane u razdoblju od 12 h te vremena u kojima završava proces skrućivanja. Vrijeme u kojem završava taljenje, odnosno skrućivanje predstavlja vrijeme od početka procesa do onog vremena u kojem prosječna vrijednost udjela kapljevite faze u poddomeni akumulatora topline dostigne 1 u slučaju taljenja, odnosno 0 u slučaju skrućivanja akumulatora topline.

Vrijednosti analiziranih geometrijskih parametara, količine akumulatora topline, topline akumulirane u 8 h ( $Q_{8h,t}$ ), odnosno predane u 12 h ( $Q_{12h,s}$ ) te vremena u kojem završava proces taljenja ( $t_t$ ), odnosno skrućivanja ( $t_s$ ) za referentnu konfiguraciju latentnog spremnika topline prikazane su u tablici 8.1. Količina akumulatora topline te akumulirana/predana toplina odnose se na područje oko jedne cijevi.

Prikazane su raspodjele temperatura i udjela kapljevite faze u karakterističnim ravninama pri spremanju i korištenju topline za različite vrijednosti ispitivanih utjecajnih parametara.

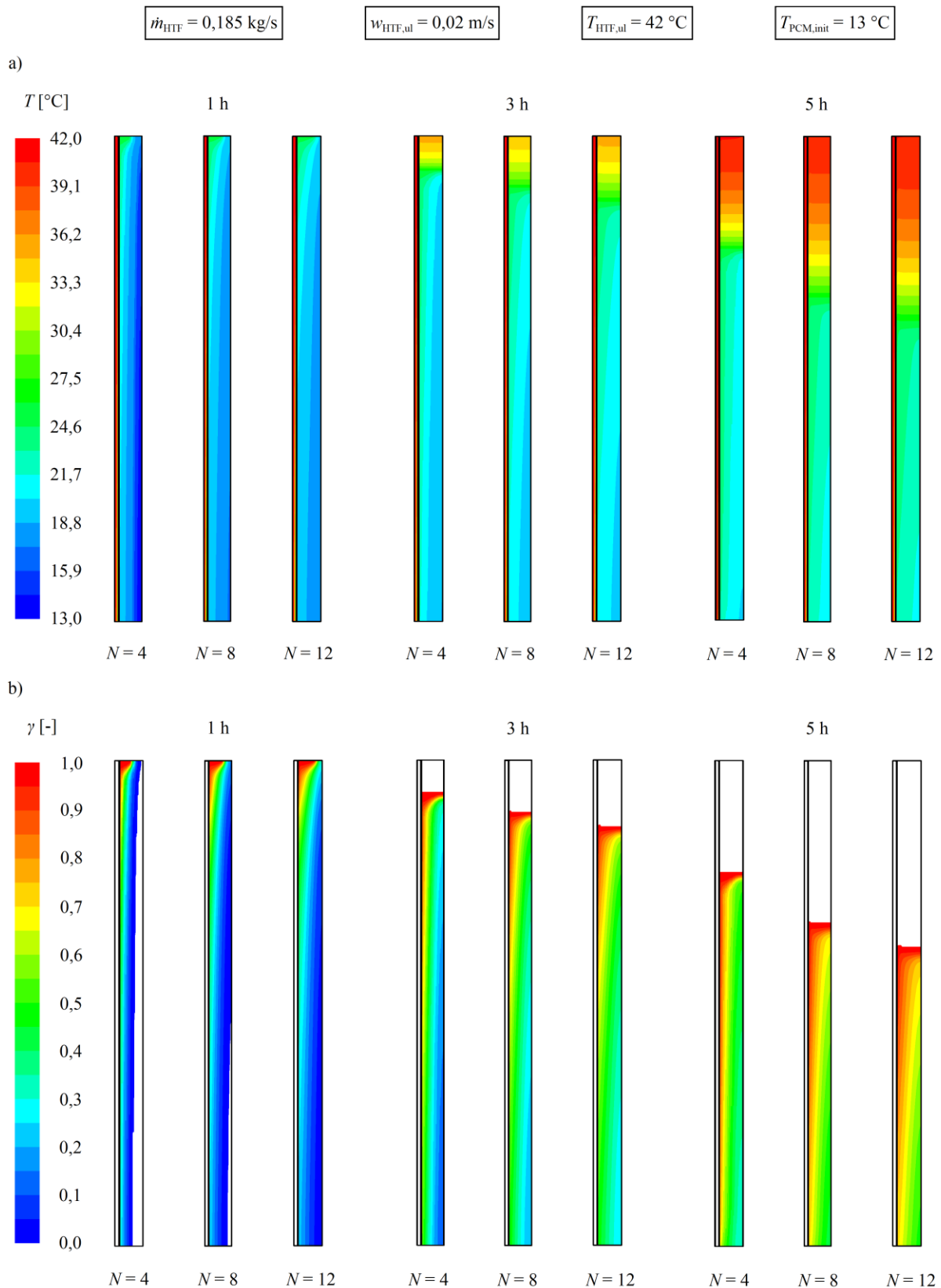
Tablica 8.1. Referentne vrijednosti analiziranih parametara u numeričkim analizama

$N$ [-]	$H/D$ [-]	$\delta$ [mm]	$m_{PCM}$ [kg]	$Q_{8h,t}$ [kJ]	$t_t$ [h]	$Q_{12h,s}$ [kJ]	$t_s$ [h]
8	8,3	2	29,41	6163,3	9,17	6297,8	14,48

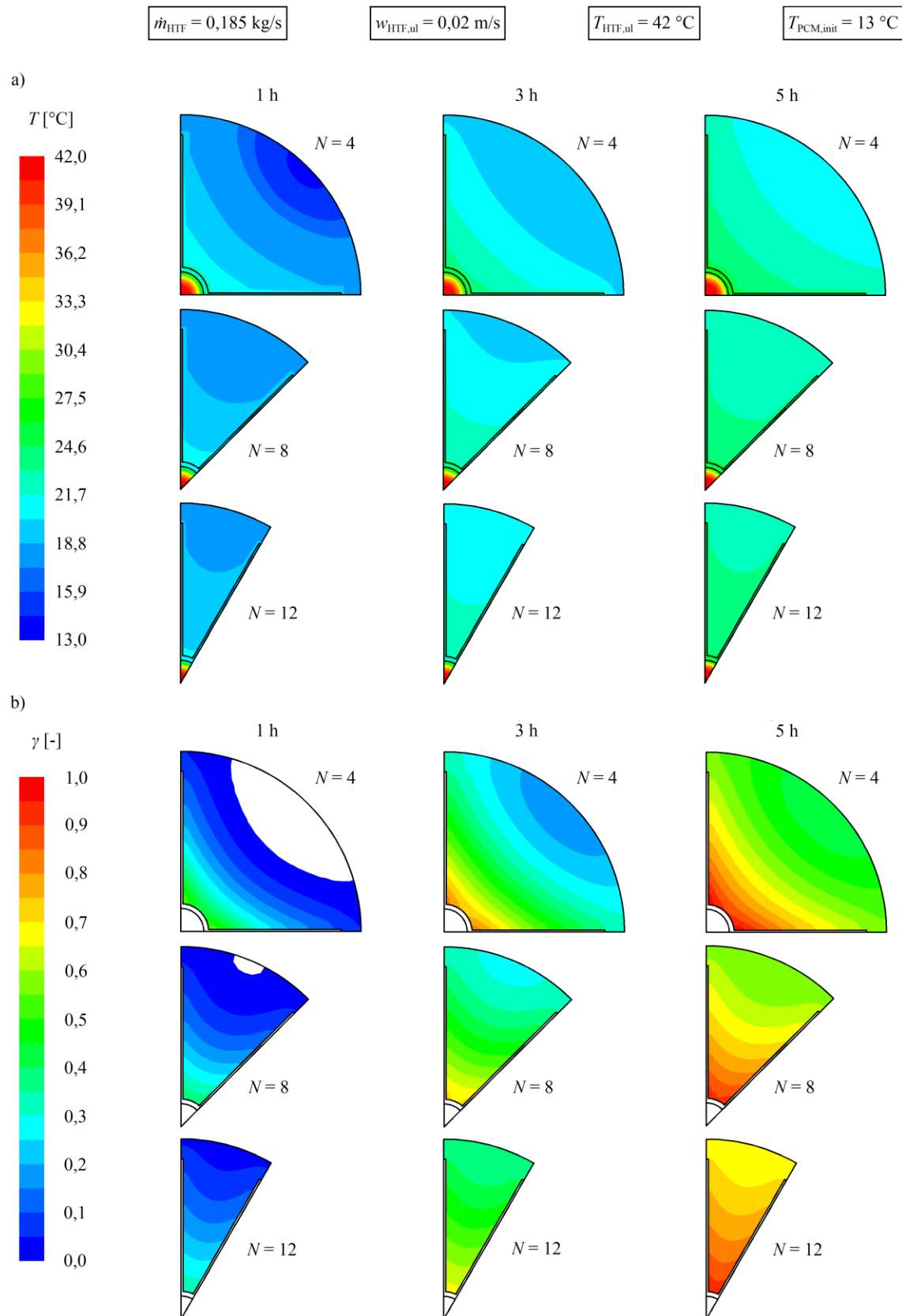
### 8.1. Analiza utjecaja broja lamela na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline

Kako bi se ispitaio utjecaj broja lamela na izmjenu topline u razmatranom latentnom spremniku topline, uspoređena je izmjena topline u konfiguracijama s 4, 8 i 12 lamela.

Za analizirane konfiguracije, raspodjele temperatura i udjela kapljevite faze u središnjoj ravini između lamela te u xy ravnini za  $z = 0,75$  m prilikom spremanja topline prikazane su na slikama 8.2, odnosno 8.3 za proračunska vremena 1, 3 i 5 h.



*Slika 8.2. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela*

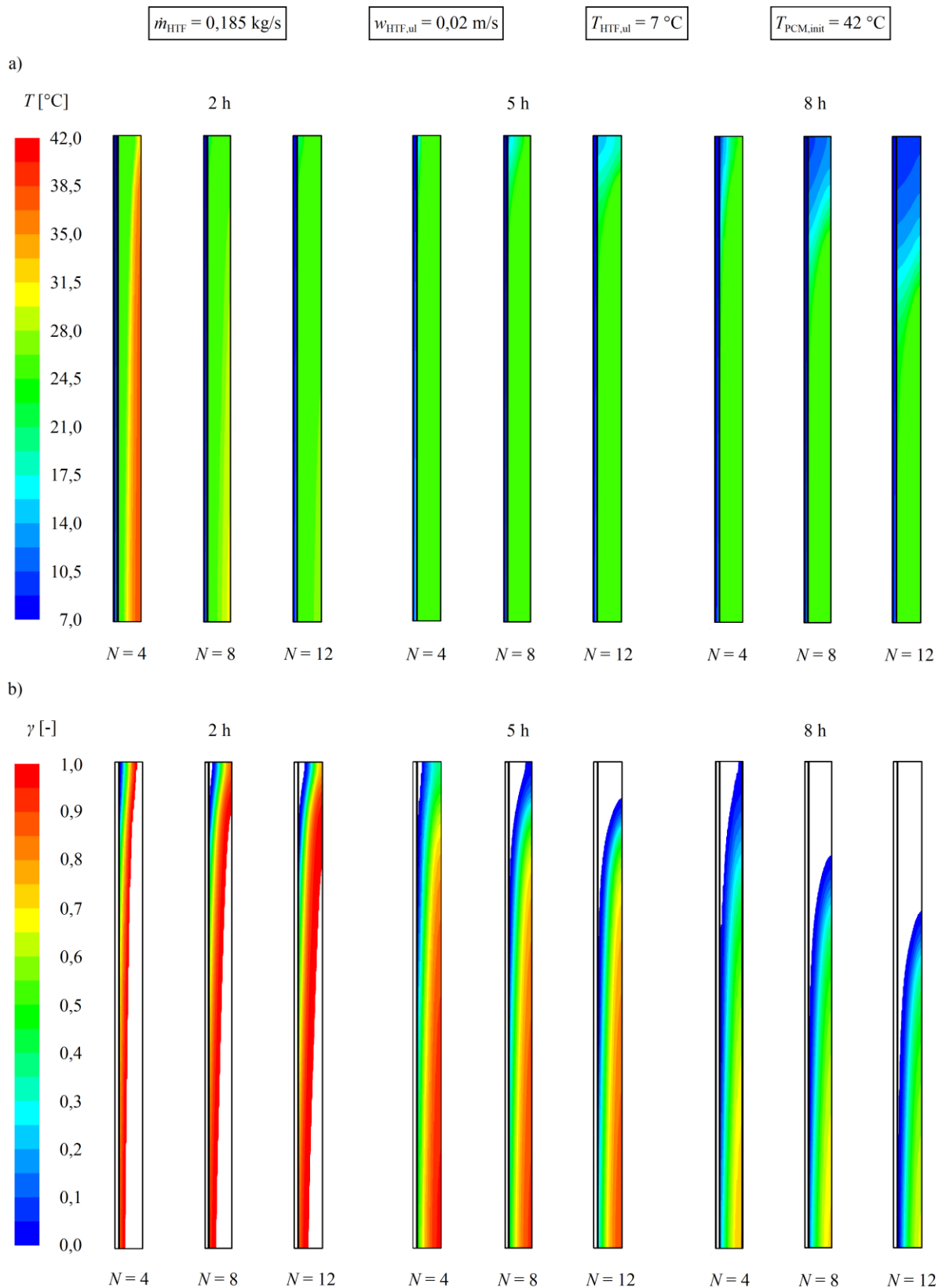


Slika 8.3. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini xy za  $z = 0,75 \text{ m}$  prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela

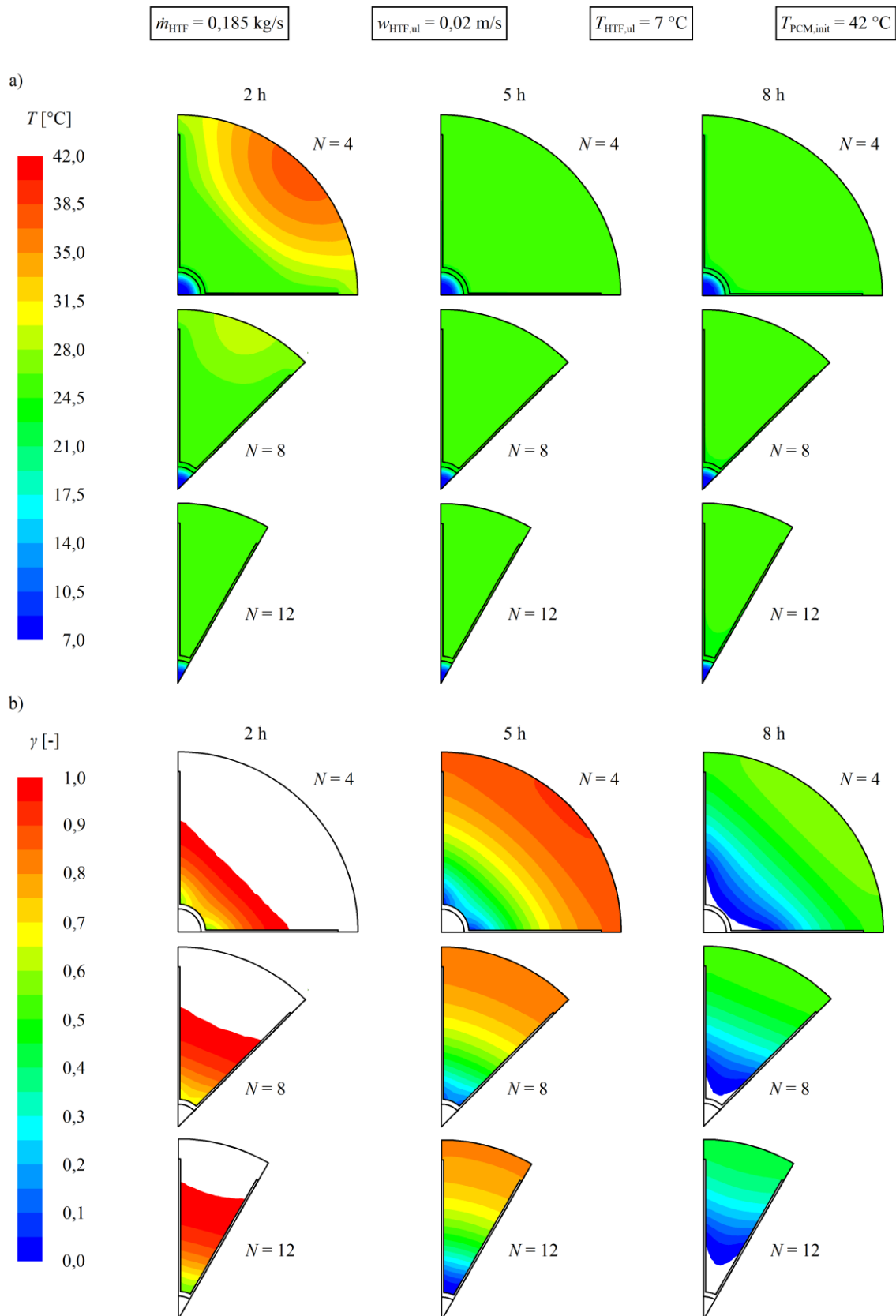


Sa slika se može uočiti da broj lamela znatno utječe na izmjenu topline prilikom spremanja topline u latentnom spremniku topline. Vidljivo je da povećanje broja lamela povoljno djeluje na izmjenu topline budući da se povećanjem broja lamela povećava površina izmjene topline. U skladu s tim, najintenzivnija izmjena topline prisutna je kod konfiguracije latentnog spremnika topline s 12 lamela. Vrijeme u kojem završava taljenje u takvoj izvedbi latentnog spremnika topline iznosi 8,68 h, što je za 5,3% manje u odnosu na referentnu konfiguraciju. Zbog većeg broja lamela, smanjena je količina akumulatora topline, za 2,2% u odnosu na referentni slučaj. Smanjena količina akumulatora topline u ovoj izvedbi ne utječe negativno na količinu akumulirane topline u promatranom razdoblju; u 8 h spremanja topline akumulirano je 6198,2 kJ, odnosno za 0,6% više nego u referentnom slučaju. S druge strane, u konfiguraciji latentnog spremnika topline s 4 lamele oko cijevi, akumulator topline potpuno se rastali u 11,23 h, što je za 22,4% duže od vremena potrebnog za taljenje akumulatora topline u referentnoj konfiguraciji. Zbog manjeg broja lamela, u ovoj je konfiguraciji prisutno za 2,2% više akumulatora topline u latentnom spremniku topline u usporedbi s referentnim slučajem. Međutim, zbog slabije izmjene topline, u 8 h spremanja topline akumulira se 5898,3 kJ topline, što je za 4,3% manje topline nego u referentnoj konfiguraciji.

Konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela razmatrane su i u slučaju procesa korištenja topline. Raspodjele temperatura i udjela kapljevite faze u središnjoj ravini između lamela te u xy ravnini za  $z = 0,75$  m prilikom korištenja topline za razmatrane konfiguracije prikazane su na slici 8.4, odnosno 8.5 za proračunska vremena 2, 5 i 8 h.



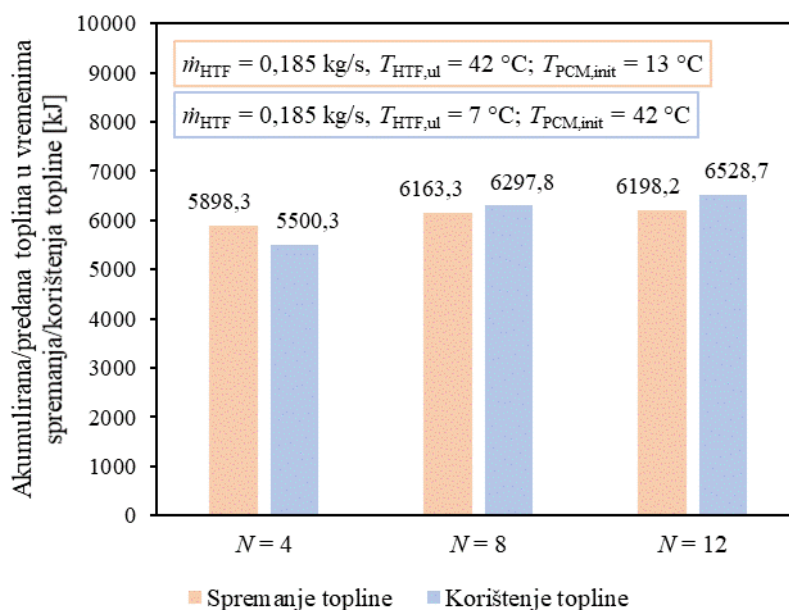
*Slika 8.4. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela*



Slika 8.5. Usporedba raspodjela temperatura i udjela kapljevite faze u ravnini  $xy$  za  $z = 0,75$   $m$  prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela

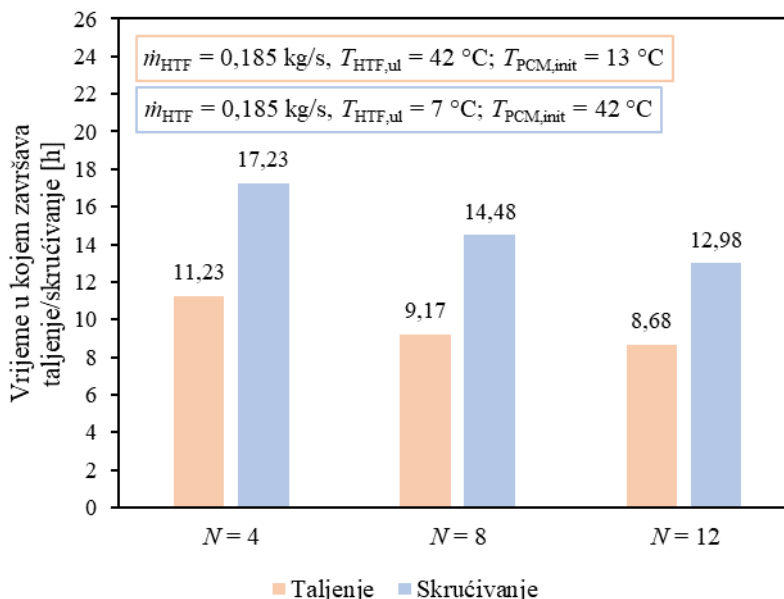
Povećanje broja lamela povoljno djeluje i na izmjenu topline pri korištenju topline. Za izvedbu latentnog spremnika topline s 12 lamela, akumulator topline potpuno se skruti za 12,98 h, što je za 10,3% kraće u odnosu na referentni slučaj. U 12 h korištenja topline, akumulator topline fluidu prijenosniku topline preda 6528,7 kJ topline, odnosno za 3,7% više nego u referentnoj konfiguraciji. Vidljivo je da smanjenje mase akumulatora topline u ovom slučaju ne utječe negativno na količinu predane topline. U izvedbi latentnog spremnika topline s 4 lamele, vrijeme u kojem je akumulator topline potpuno skrućen iznosi 17,23 h, što je za 18,9% duže nego vrijeme skrućivanja u referentnom slučaju. U ovoj izvedbi, količina akumulatora topline najveća je u odnosu na analizirane slučajeve, no u 12 h korištenja topline predano je 5500,3 kJ topline, što je za 12,7% manje nego u referentnoj konfiguraciji.

Za područje oko jedne cijevi, usporedbe akumuliranih toplina u vremenu spremanja topline od 8 h i predanih toplina u vremenu korištenja topline od 12 h za analizirane brojeve lamela prikazane su na slici 8.6.



*Slika 8.6. Usporedbe akumuliranih/predanih toplina za područje oko jedne cijevi u 8 h spremanja, odnosno 12 h korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima za analizirane brojeve lamela*

Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje, odnosno skrućivanje za analizirane brojeve lamela prikazane su na slici 8.7.



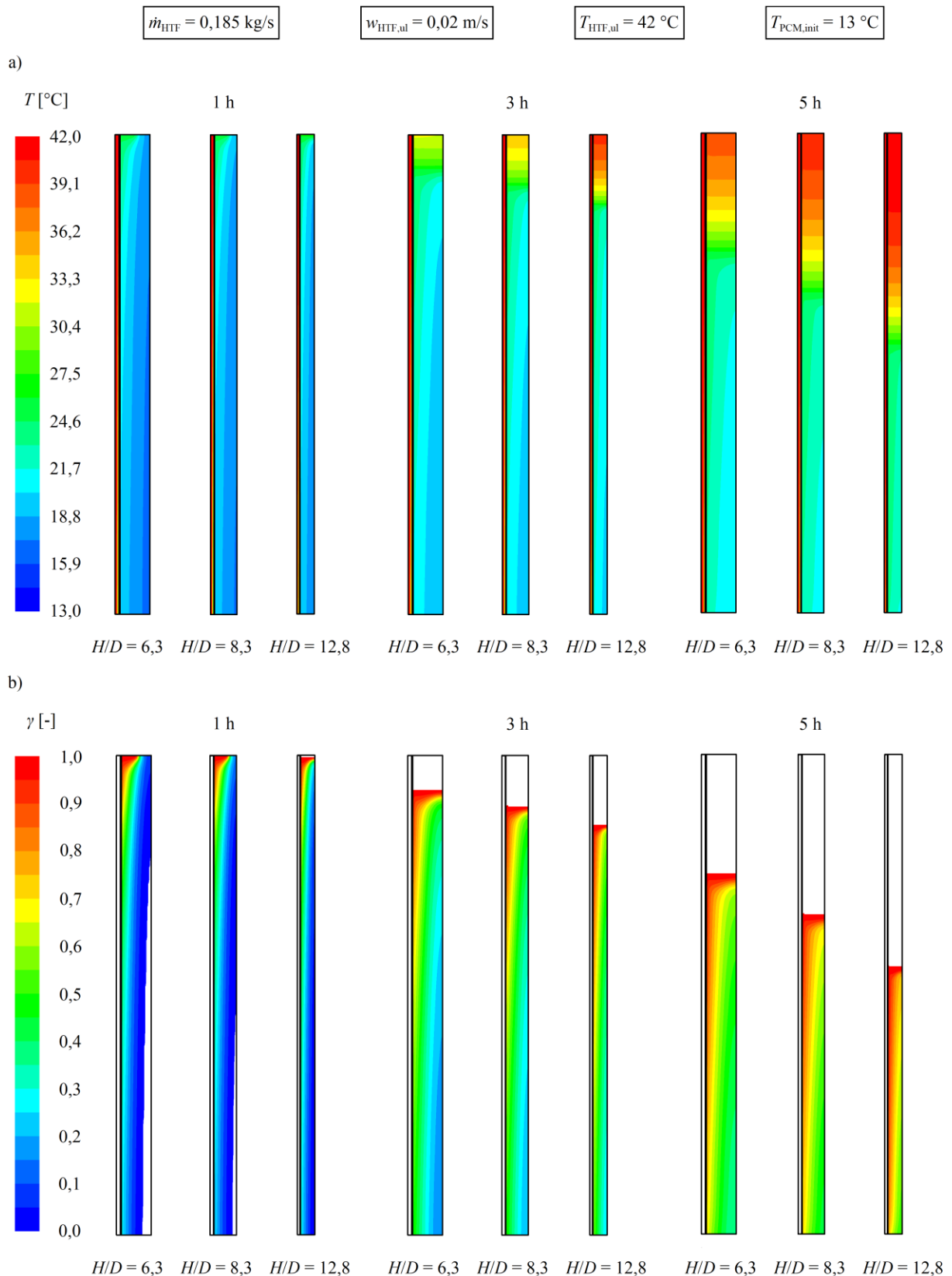
Slika 8.7. Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje/skrucivanje dobivenih numeričkim proračunima za analizirane brojeve lamela

Vidljivo je da broj lamela ima velik utjecaj na izmjenu topline unutar latentnog spremnika topline. Povećanjem broja lamela povećava se toplinski tok, a vrijeme taljenja, odnosno skrucivanja može se znatno smanjiti. Međutim, povećanjem broja lamela smanjuje se količina akumulatora topline, što može smanjiti količinu akumulirane, odnosno predane topline pa je odabir optimalnog broja lamela potrebno dodatno istražiti.

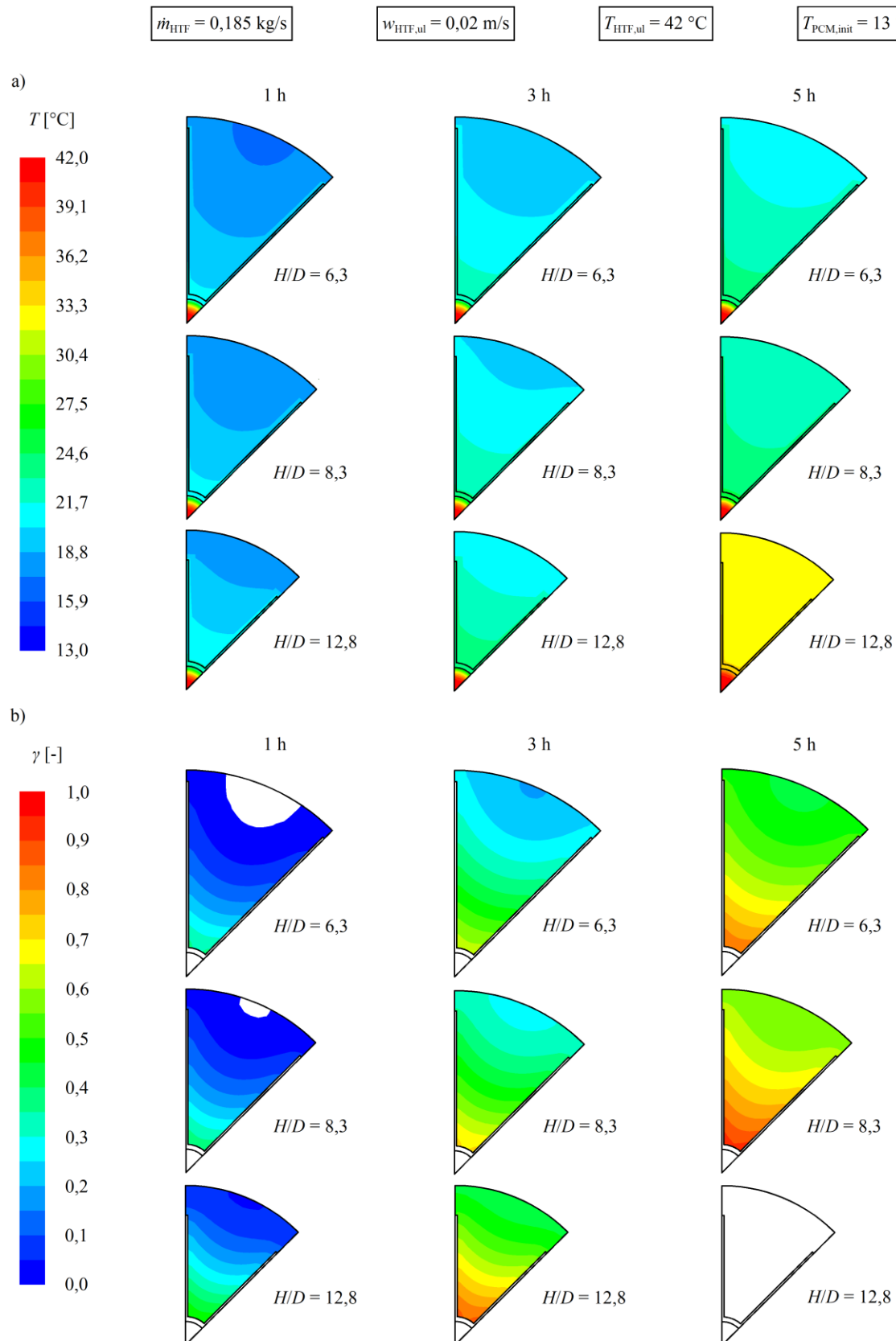
## 8.2. Analiza utjecaja omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline

Analizirani omjeri visine latentnog spremnika topline ( $H$ ) i promjera kružnice opisane oko cijevi ( $D$ ) odabrani su tako da se količina akumulatora topline u spremniku ne mijenja, a širina lamela mijenja se tako da njezina površina izmjene topline ostane konstantna. Utjecaj promjene omjera  $H/D$  na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline analiziran je usporedbom ovih omjera u vrijednosti 6,3, 8,3 i 12,8. Navedeni omjeri odgovaraju visinama latentnog spremnika topline od 1,25, 1,5 i 2 m, odnosno širinama lamela od 79,2, 66 i 49,5 mm.

Raspodjele temperatura i udjela kapljevitae faze u središnjoj ravini između lamela te u  $xy$  ravlini za  $z = 0,75$  m prilikom spremanja topline za različite vrijednosti omjera  $H/D$  prikazane su na slikama 8.8, odnosno 8.9 za proračunska vremena 1, 3 i 5 h.



Slika 8.8. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8

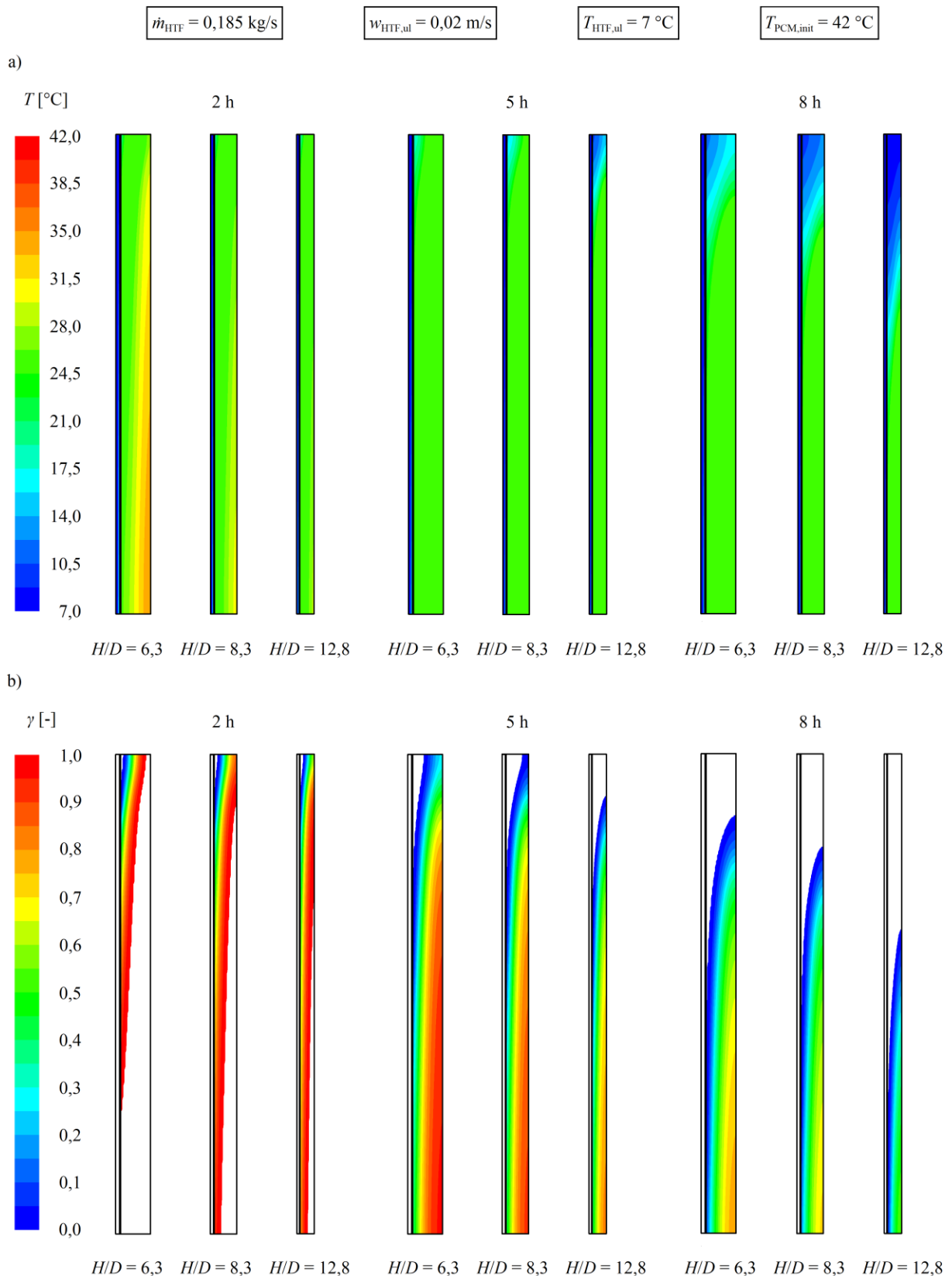


Slika 8.9. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini xy za  $z = 0,75 \text{ m}$  prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8

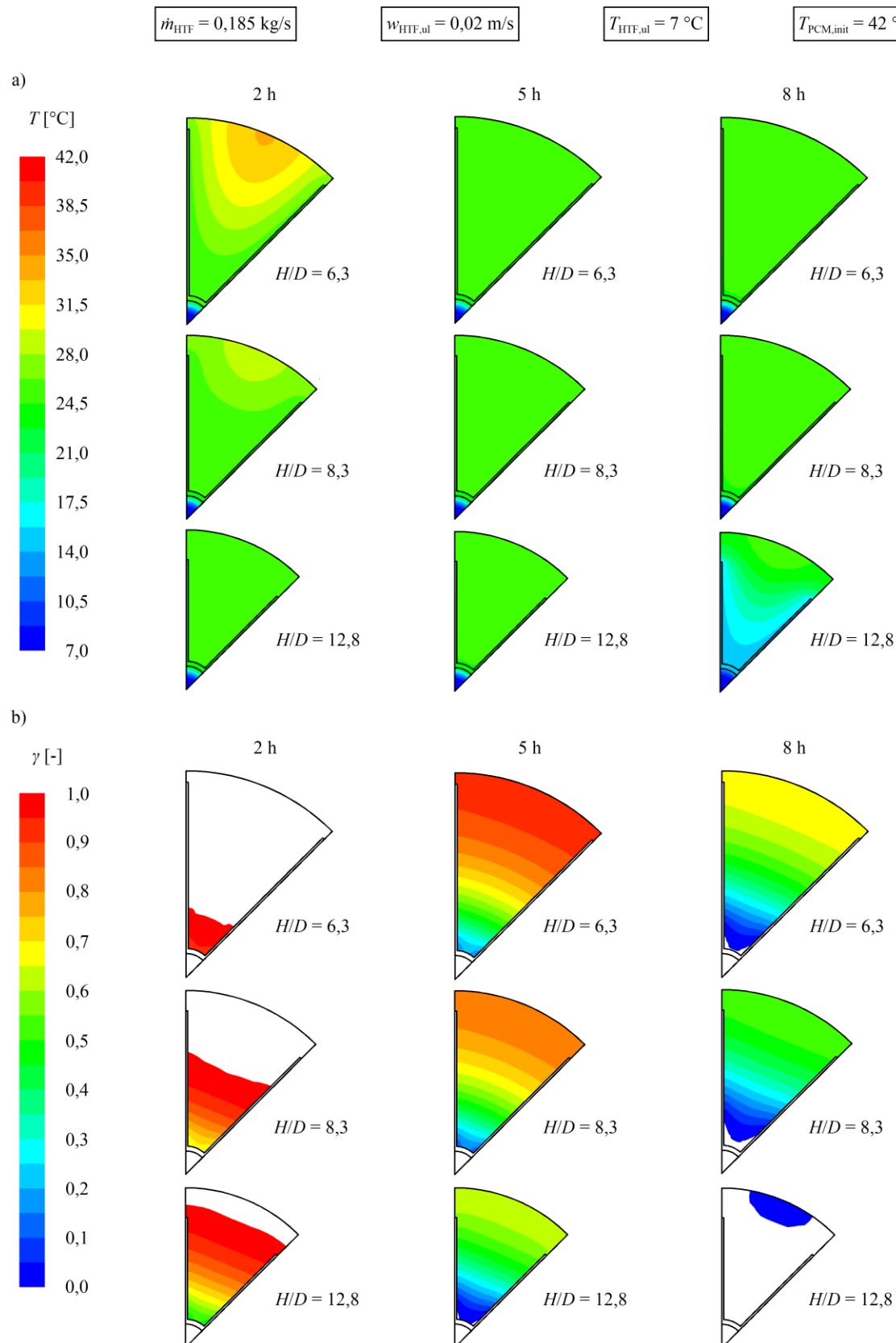
Sa slika je vidljivo da veće vrijednosti omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi rezultiraju intenzivnijom izmjenom topline pri taljenju akumulatora topline, odnosno procesu spremanja topline. Povećanjem ovog omjera povećava se duljina cijevi, što rezultira većom površinom izmjene topline, a istovremeno se smanjuje debljina sloja akumulatora topline, a time i njegov toplinski otpor. Međutim, povećanjem omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi smanjuje se širina lamela, što može negativno utjecati na prijenos topline u radijalnom smjeru. Kad vrijednost omjera  $H/D$  iznosi 12,8, odnosno za slučaj spremnika visine 2 m i širine lamela 49,5 mm, akumulator topline potpuno se rastali za 8,16 h od početka procesa, što je za 11% kraće u odnosu na referentnu konfiguraciju. U ovakvoj izvedbi latentnog spremnika topline, u 8 h spremanja topline akumulira se 6573,8 kJ topline, što je za 6,7% više nego u referentnoj konfiguraciji. Za vrijednost omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, odnosno visine spremnika 1,25 m i širine lamela 79,2 mm, vrijeme potrebno da se akumulator topline potpuno rastali iznosi 10,39 h, što je za 13,3% duže nego u referentnoj konfiguraciji. Količina topline koju latentni spremnik topline akumulira u 8 h spremanja topline iznosi 5198,6 kJ, što je za 15,7% manje u odnosu na referentnu konfiguraciju. Kao što je napomenuto, promjenom ovog parametra ne mijenja se masa akumulatora topline.

Konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8 analizirane su i u slučaju korištenja topline. Raspodjele temperatura i udjela kapljevite faze u središnjoj ravini između lamela te u  $xy$  ravnini za  $z = 0,75$  m prilikom procesa korištenja topline za analizirane konfiguracije prikazane su na slici 8.10, odnosno 8.11 za proračunska vremena 2, 5 i 8 h.





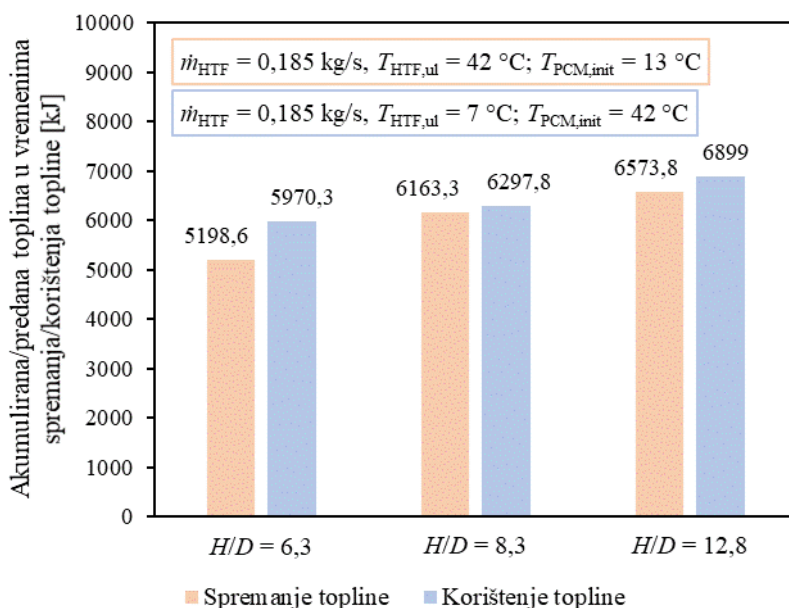
*Slika 8.10. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8*



Slika 8.11. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini  $xy$  za  $z = 0,75 \text{ m}$  prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8

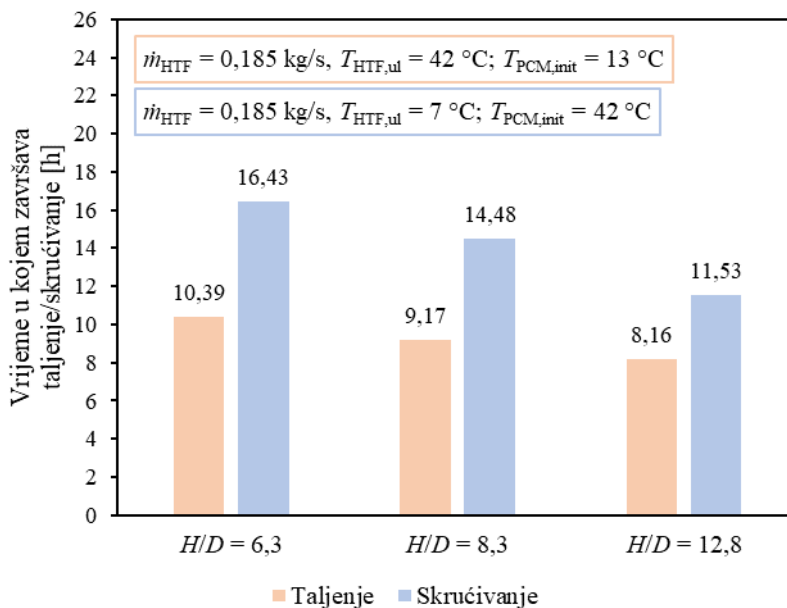
I u slučaju korištenja topline vidljivo je poboljšanje izmjene topline za veće vrijednosti omjera  $H/D$ . Za konfiguraciju latentnog spremnika topline u kojoj ovaj omjer iznosi 12,8, vrijeme potrebno za potpuno skrućivanje akumulatora topline iznosi 11,53 h, što je za 20,4% kraće u odnosu na vrijeme skrućivanja u referentnoj konfiguraciji. U istoj je konfiguraciji u 12 h korištenja topline predano 6899 kJ topline, odnosno za 9,5% više nego u referentnoj konfiguraciji. U izvedbi latentnog spremnika topline s omjerom visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, vrijeme u kojem završava skrućivanje akumulatora topline iznosi 16,43 h, što je za 13,5% duže u odnosu na vrijeme skrućivanja u referentnoj konfiguraciji. Smanjenjem ovog omjera skraćuje se cijev, što smanjuje površinu izmjene topline, i povećava se debljina sloja akumulatora topline, što povećava njegov toplinski otpor. U 12 h korištenja topline, latentni spremnik topline u kojem omjer  $H/D$  iznosi 6,3 preda 5970,3 kJ topline, odnosno za 5,2% manje nego u referentnom slučaju.

Za područje oko jedne cijevi, usporedbe akumuliranih toplina u vremenu spremanja topline od 8 h i predanih toplina u vremenu korištenja topline od 12 h za analizirane vrijednosti omjera visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi prikazane su na slici 8.12.



Slika 8.12. Usporedbe akumuliranih/predanih toplina za područje oko jedne cijevi u 8 h spremanja, odnosno 12 h korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima za analizirane omjere visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi

Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje, odnosno skrućivanje za različite vrijednosti omjera  $H/D$  prikazane su na slici 8.13.



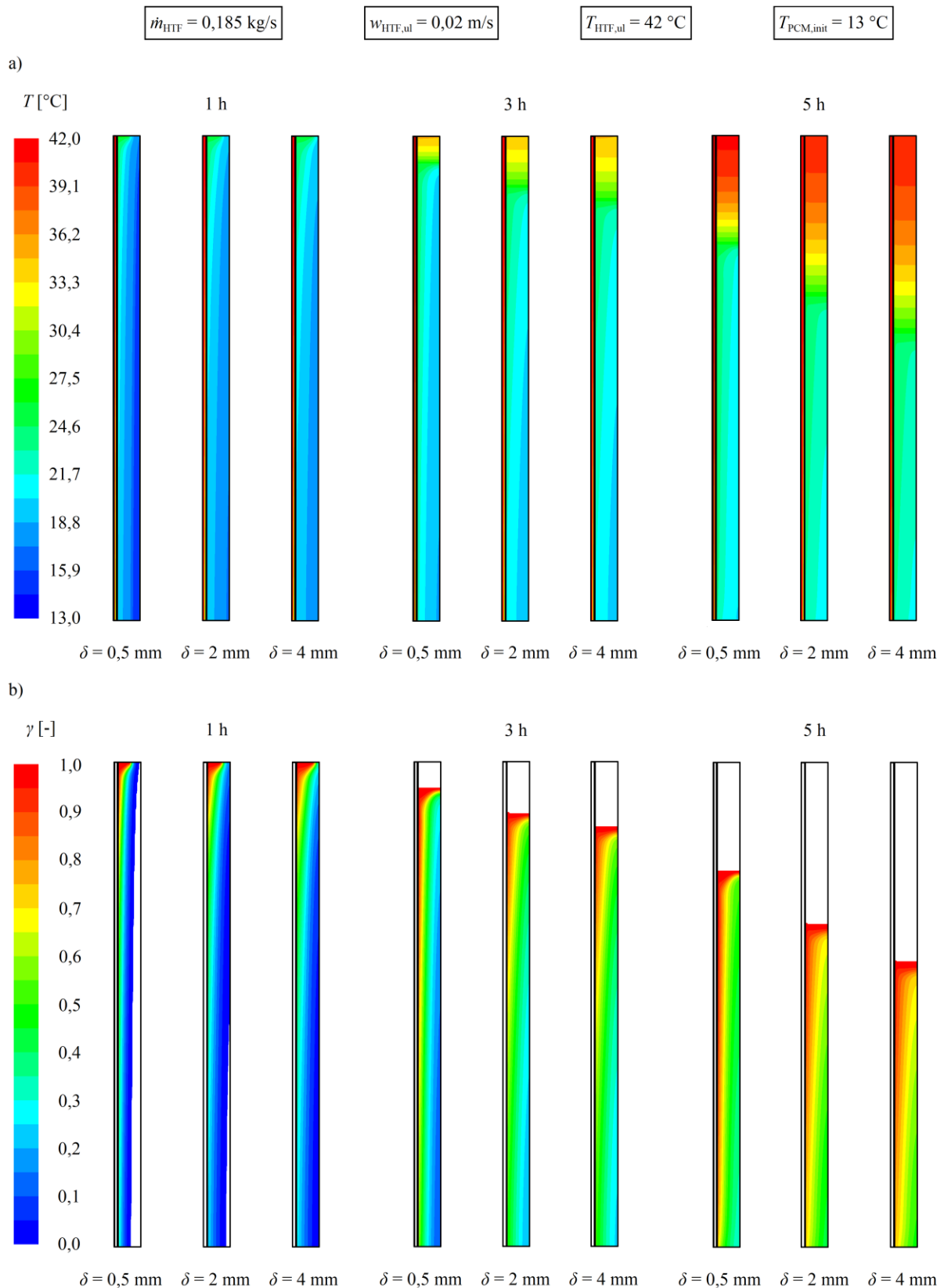
Slika 8.13. Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje/skrucivanje dobivenih numeričkim proračunima za analizirane omjere visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi

Iz provedene analize utjecaja omjera  $H/D$  na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline iz latentnog spremnika topline vidljivo je da se povećanjem ovog omjera skraćuje vrijeme potrebno za taljenje, odnosno skrucivanje, a istovremeno povećava količina akumulirane, odnosno predane topline budući da se promjenom omjera  $H/D$  ne mijenja količina akumulatora topline. Kao što je napomenuto, povećavanjem ovog omjera smanjuje se širina lamela što može nepovoljno utjecati na izmjenu topline u radijalnom smjeru pa je utjecaj ovog parametra potrebno daljnje ispitati kako bi se pronašla njegova najpovoljnija vrijednost.

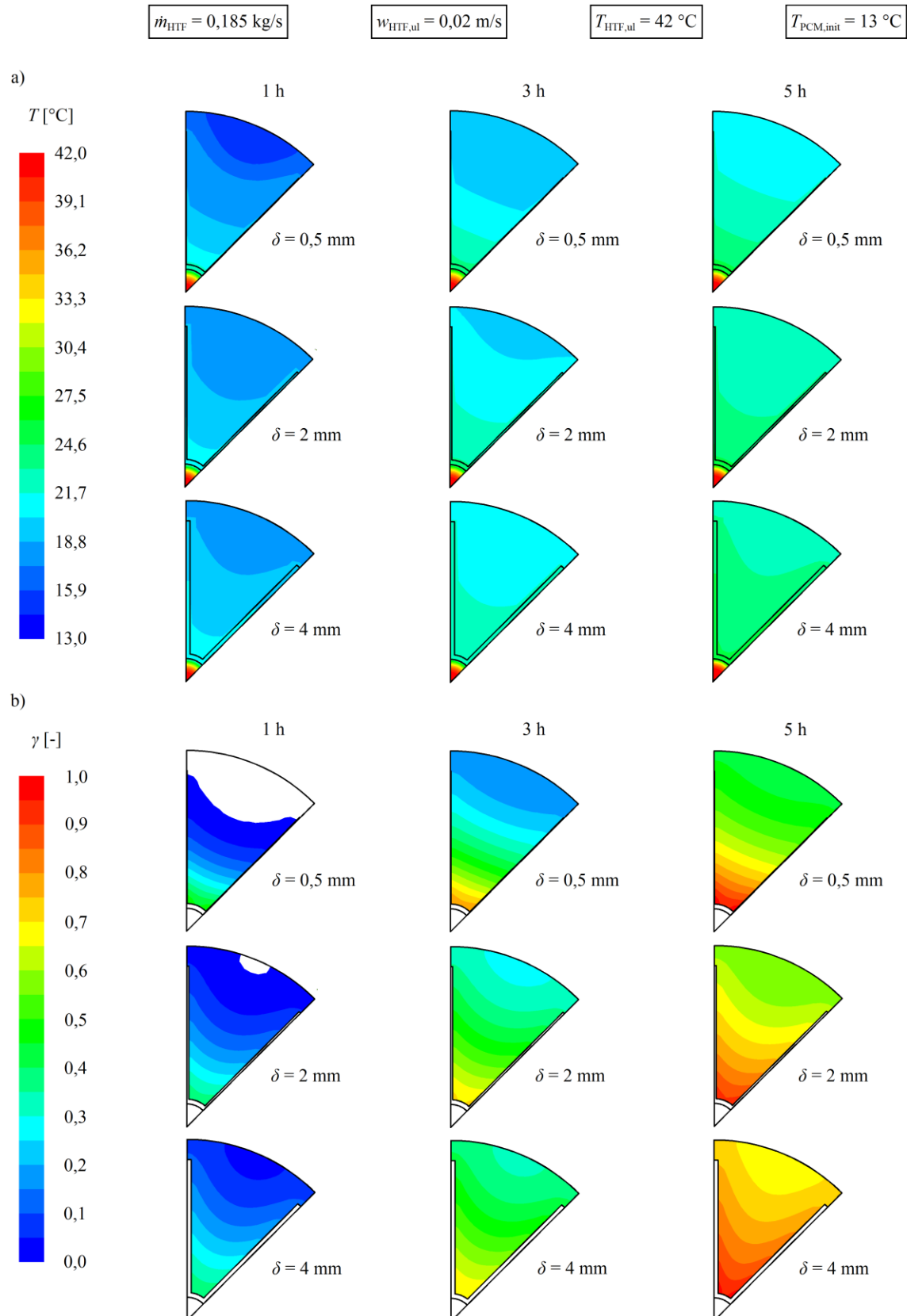
### 8.3. Analiza utjecaja debljine lamela na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline

Kako bi se ispitao utjecaj debljine lamela na izmjenu topline u razmatranom latentnom spremniku topline, uspoređena je izmjena topline pri spremanju i korištenju topline u izvedbama latentnog spremnika topline s debljinama lamela 0,5, 2 i 4 mm.

Raspodjele temperatura i udjela kapljevitae faze u središnjoj ravini između lamela te u  $xy$  ravni za  $z = 0,75$  m prilikom procesa spremanja topline za različite debljine lamela prikazane su na slikama 8.14, odnosno 8.15 za proračunska vremena 1, 3 i 5 h.



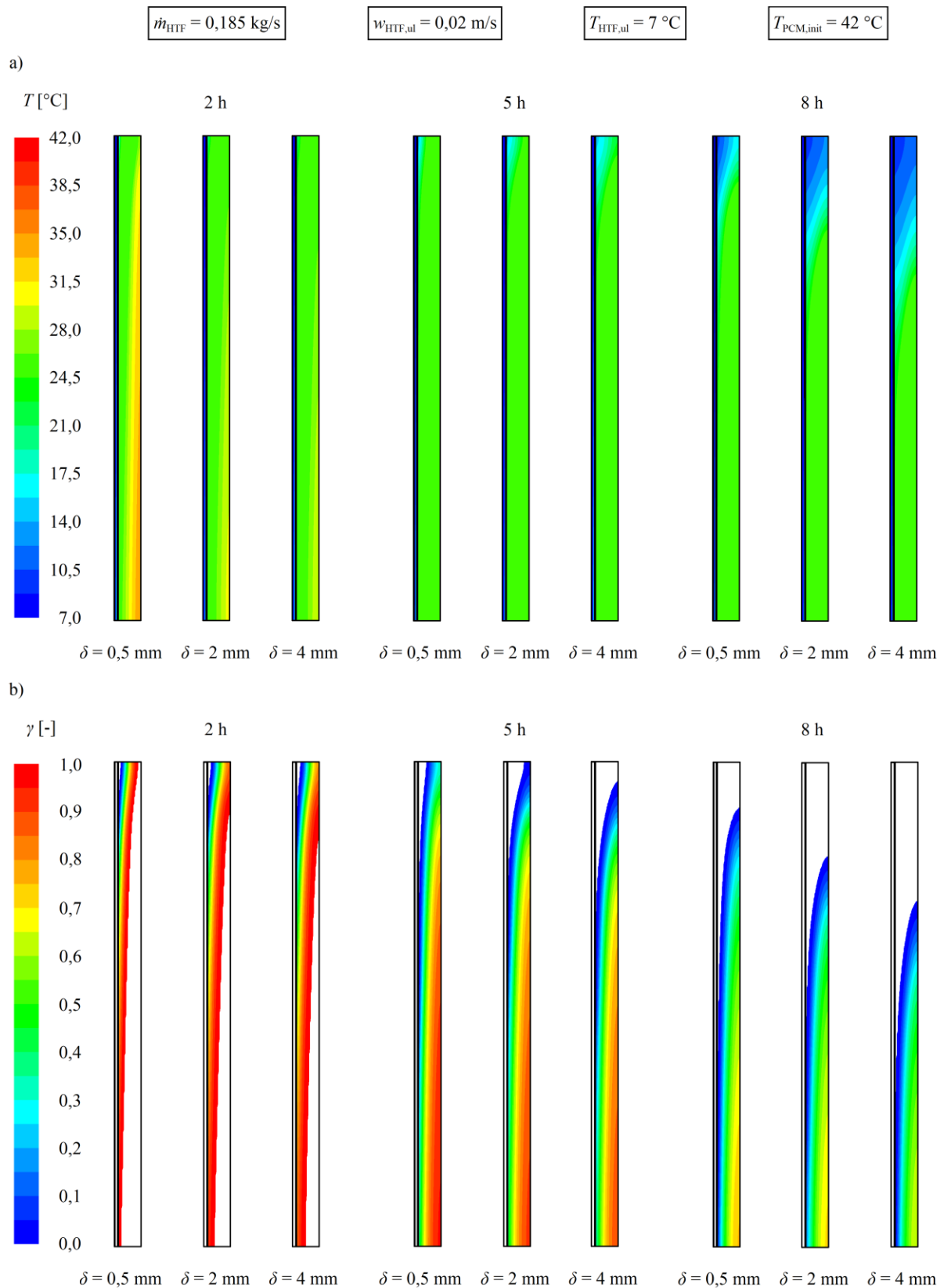
*Slika 8.14. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5, 2 i 4 mm*



Slika 8.15. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini  $xy$  za  $z = 0,75 \text{ m}$  prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5, 2 i 4 mm

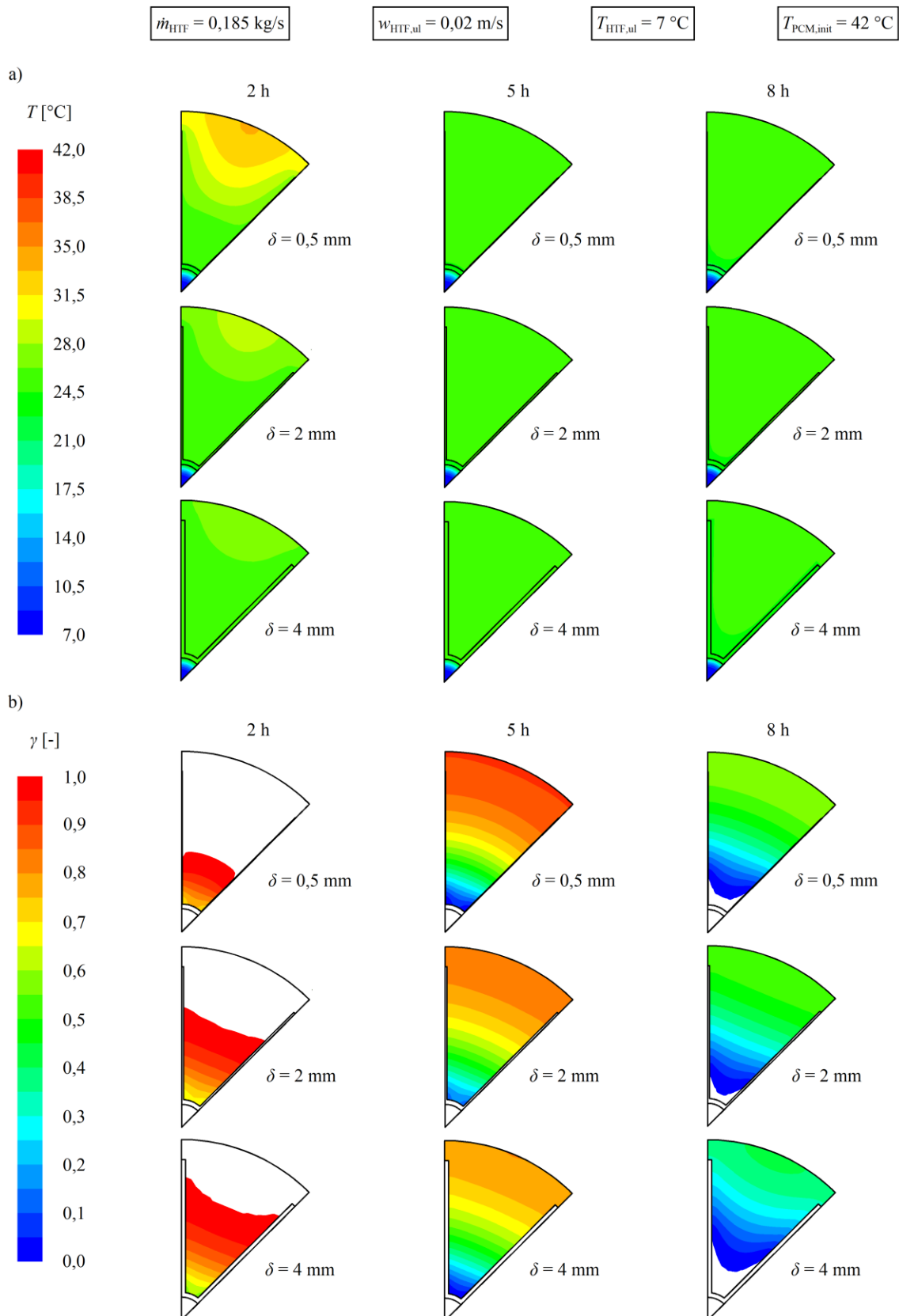
Sa slika se može uočiti povoljan utjecaj povećanja debljine lamela na izmjenu topline pri spremanju topline, što rezultira bržim taljenjem akumulatora topline u latentnom spremniku topline razmatrane geometrije. Povećanjem debljine lamela blago se povećava površina izmjene topline, a time i izmijenjeni toplinski tok između fluida prijenosnika topline i akumulatora topline. U skladu s tim, u konfiguraciji latentnog spremnika topline s lamelama debljine 4 mm, akumulator topline potpuno je rastaljen za 8,67 h od početka procesa spremanja topline, što je za 5,4% brže nego u slučaju referentne konfiguracije latentnog spremnika topline. Međutim, povećanjem debljine lamela količina akumulatora topline smanjena je za 4,5% u odnosu na količinu u referentnoj konfiguraciji. Kao posljedica toga, u 8 h spremanja topline akumulirano je 6059,7 kJ topline, odnosno za 1,7% manje nego u referentnom slučaju. U konfiguraciji latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5 mm vrijeme u kojem završava taljenje akumulatora topline iznosi 11,75 h, što je za 22% duže nego u referentnoj konfiguraciji. Iako je u ovoj izvedbi količina akumulatora topline za 3,3% veća u odnosu na količinu u referentnom latentnom spremniku topline, u 8 h spremanja topline u ovoj konfiguraciji akumulirano je 6055,9 kJ topline, odnosno za 1,7% manje u odnosu na referentni slučaj.

Konfiguracije latentnog spremnika topline s debljinama lamela 0,5, 2 i 4 mm razmatrane su i u slučaju korištenja topline. Raspodjele temperatura i udjela kapljevite faze u središnjoj ravnini između lamela te u xy ravnini za  $z = 0,75$  m prilikom korištenja topline za razmatrane konfiguracije prikazane su na slici 8.16, odnosno 8.17 za proračunska vremena 2, 5 i 8 h.



*Slika 8.16. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5, 2 i 4 mm*

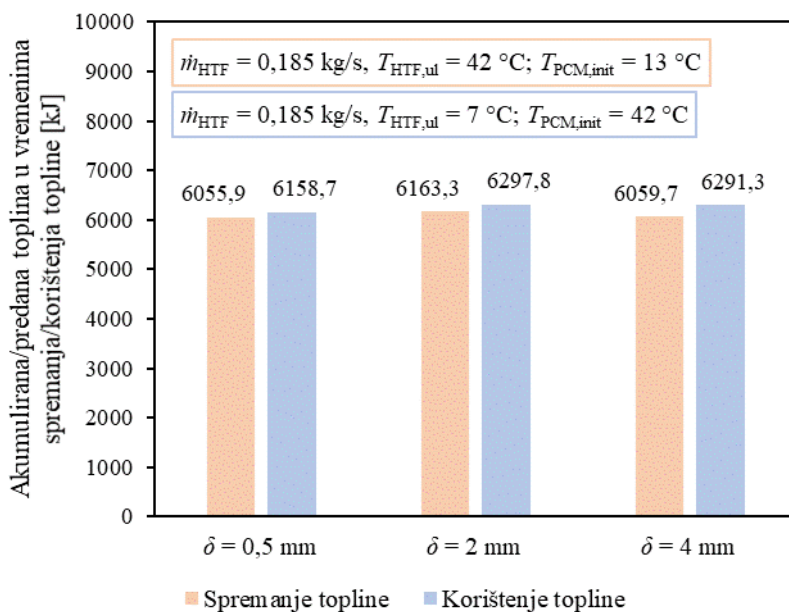




Slika 8.17. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini  $xy$  za  $z = 0,75 \text{ m}$  prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5, 2 i 4 mm

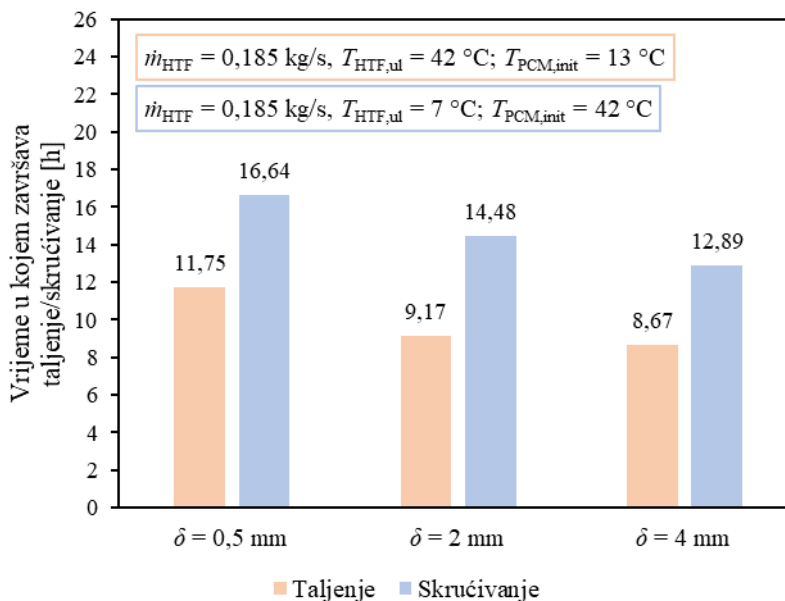
Na izmjenu topline tijekom procesa korištenja topline također povoljno utječe povećanje debljine lamela. Za izvedbu latentnog spremnika topline s lamelama debljine 4 mm, potpuno skrućivanje akumulatora topline postignuto je za 12,89 h, što je za 11% kraće u usporedbi s referentnom konfiguracijom. U razdoblju korištenja topline od 12 h, u ovoj konfiguraciji akumulator topline fluidu prijenosniku topline preda 6291,3 kJ topline, što je za 0,1% manje nego u referentnom slučaju. Blago smanjenje količine predane topline u izvedbi s debljim lamelama posljedica je smanjenja mase akumulatora topline. U konfiguraciji s lamelama debljine 0,5 mm, akumulator topline skruti se za 16,64 h od početka procesa korištenja topline, što je za 14,9% duže od vremena potrebnog za skrućivanje akumulatora topline u referentnoj konfiguraciji. U 12 h korištenja topline, u ovoj se izvedbi preda 6158,7 kJ topline, što je za 2,2% manje od referentnog iznosa.

Za područje oko jedne cijevi, usporedbe akumuliranih toplina u vremenu spremanja topline od 8 h i predanih toplina u vremenu korištenja topline od 12 h za analizirane debljine lamela prikazane su na slici 8.18.



*Slika 8.18. Usporedbe akumuliranih/predanih toplina za područje oko jedne cijevi u 8 h spremanja, odnosno 12 h korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima za analizirane debljine lamela*

Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje, odnosno skrućivanje za analizirane debljine lamela prikazane su na slici 8.19.



Slika 8.19. Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje/skrucivanje dobivenih numeričkim proračunima za analizirane debljine lamela

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da debljina lamela znatno utječe na vrijeme potrebno za potpuno taljenje/skrucivanje akumulatora topline, što je dijelom zbog povećanja površine izmjene topline, a dijelom zbog smanjenja količine akumulatora topline u latentnom spremniku topline. Također je vidljivo da smanjenje količine akumulatora topline u spremniku može rezultirati manjom količinom akumulirane, odnosno predane topline. Odabir optimalne debljine lamela ovisi o tome je li cilj osigurati brže vrijeme spremanja, odnosno korištenja topline, ili povećati količinu akumulirane, odnosno predane topline.

Provedenim analizama ispitan je utjecaj triju geometrijskih parametara latentnog spremnika topline na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline. Vidljivo je da se povećanjem broja i debljine lamela povećava toplinski tok, odnosno brzina akumuliranja/predaje topline, no zbog smanjene količine akumulatora topline, smanjuje se kapacitet latentnog spremnika topline za spremanje/korištenje topline. Slično, povećanjem omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi tako da se ne mijenja količina akumulatora topline povećava se dodirna površina akumulatora topline s cijevi i smanjuje se debljina sloja akumulatora topline, a time i njegov toplinski otpor, no smanjuje se širina lamela, što može nepovoljno utjecati na izmjenu topline u radijalnom smjeru. Odabir najpovoljnije vrijednosti pojedinog parametra ovisi o željenom cilju, a odabir najpovoljnijih vrijednosti triju parametara u odnosu na željeni cilj problem je koji se rješava optimizacijom.

## **9. OPTIMIZACIJA LATENTNOG SPREMNIKA TOPLINE S CILJEM POVEĆANJA NJEGOVE UČINKOVITOSTI**

Postupak optimizacije geometrijskih parametara razmatranih u numeričkoj analizi proveden je metodom odzivnih ploha. Ova se metoda često koristi u optimizaciji latentnih spremnika topline, a predstavlja skup statističkih i matematičkih tehnika koju su 1951. razvili Box i Wilson [85]. Općenito, potrebno je definirati rubne vrijednosti analiziranih parametara te jednu ili više funkcija cilja (odziv), nakon čega je potrebno izvršiti određen broj ispitivanja, koja mogu biti eksperimentalna ili numerička, za različite kombinacije vrijednosti varijabli te odrediti tražene odzive. Odzivi dobiveni provedenim ispitivanjima potom se aproksimiraju regresijskom polinomnom funkcijom koja može biti prvog, drugog ili višeg reda i može uključivati članove koji predstavljaju međusobne interakcije pojedinih parametara. Njezina valjanost može se ocijeniti koeficijentom višestruke determinacije  $R^2$ , čija je vrijednost između 0 i 1. Što je taj koeficijent bliže 1, funkcija bolje predstavlja odziv stvarnog problema. Regresijski polinom smatra se zadovoljavajućim ako je  $0,9 \leq R^2 \leq 1$ . Optimalne vrijednosti analiziranih parametara dobivaju se za maksimume, odnosno minimume dobivene regresijske funkcije, ovisno o tome je li funkcija s ciljem povećanja ili smanjenja određenog odziva.

Primjenom nekog od postupaka unutar metode odzivnih ploha, provodi se unaprijed definiran niz ispitivanja (analiziranih slučajeva) potrebnih za dobivanje odziva sustava, odnosno odgovarajuće regresijske funkcije. Ovi postupci razlikuju se po broju potrebnih ispitivanja te broju razina analiziranih parametara. Među njima, najmanji broj ispitivanja za dobivanje odziva sustava zahtijeva Box-Behnkenov postupak, zbog čega je korišten u optimizaciji razmatranog latentnog spremnika topline. Kod ovog postupka, potrebno je definirati tri razine za svaki analizirani parametar, koje predstavljaju njihove minimalne, referentne i maksimalne vrijednosti, i one definiraju prostor unutar kojega se traži optimalno rješenje pojedinog parametra. Pri analizi triju parametara, ispituje se 15 kombinacija analiziranih parametara (od čega 13 različitih), pri čemu niti jedan slučaj ne može sadržavati ekstreme svih parametara.

### **9.1. Odabir razina analiziranih parametara i definiranje funkcija cilja**

Postupak optimizacije proveden je za tri geometrijska parametra latentnog spremnika topline; broj lamela ( $N$ ), omjer visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi

( $H/D$ ) te debljinu lamela ( $\delta$ ). Odabir raspona varijabli odabran je tako da u svakoj kombinaciji omogućuje potpuno taljenje akumulatora topline unutar vremena od 8 h te potpuno skrućivanje unutar vremena od 12 h. U obzir su još uzeta izvedbena i tehnička ograničenja geometrijskih parametara. Gornja granica omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi usvojena je tako da visina spremnika ne prelazi 2,5 m, odnosno da se optimirani spremnik može ugraditi u prostor standardne visine. Također, donja granica debljine lamela postavljena je na 2 mm budući da bi proizvodnja i ugradnja tanjih lamela bila znatno složenija.

Broj lamela, omjer visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi te debljina lamela u regresijskoj se polinomnoj funkciji zamjenjuju varijablama  $x_1$ ,  $x_2$ , odnosno  $x_3$ . Navedenim izvedbenim ograničenjima te spoznajama dobivenima numeričkom analizom definiran je raspon ispitivanih varijabli;  $8 \leq x_1 \leq 16$ ,  $13 \leq x_2 \leq 18$ ,  $2 \text{ mm} \leq x_3 \leq 4 \text{ mm}$ . Navedene rubne vrijednosti varijabli  $x_1$ ,  $x_2$  i  $x_3$  predstavljaju minimalne (-1), odnosno maksimalne vrijednosti (1) analiziranih varijabli. Kao referentne vrijednosti (0) u postupku optimizacije usvajaju se one vrijednosti varijabli koje su jednako udaljene od oba ekstrema. Referentni broj lamela iznosi 12, za omjer visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi referentna vrijednost iznosi 15,5, a referentna debljina lamela iznosi 3 mm.

Iz rezultata provedenih numeričkih proračuna dobivaju se vrijednosti odabranih funkcija cilja (odziva). Optimalne vrijednosti analiziranih geometrijskih parametara određene su u odnosu na sljedeće ciljeve:

- Srednji latentni toplinski tok, definiran omjerom latentne topline  $Q_L$  i vremena u kojem se odvija promjena agregatnog stanja akumulatora topline  $t_L$ , odnosno:

$$\dot{Q}_L = \frac{Q_L}{t_L} \quad (9.1)$$

Pri tome  $Q_L$  predstavlja umnožak mase akumulatora topline  $m_{\text{PCM}}$  [kg] oko jedne cijevi i specifične latentne topline  $L$  [J/kg], a vrijeme promjene agregatnog stanja akumulatora topline  $t_L$  ono je vrijeme u kojem je prosječna vrijednost udjela kapljevite faze unutar akumulatora topline u latentnom spremniku topline između 0 i 1 ( $0 < \gamma < 1$ ).

- Iskoristivost topline latentnog spremnika topline, koja je prema [86] definirana kao:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (9.2)$$

Pri tome  $Q$  predstavlja ukupnu akumuliranu/predanu toplinu u 8 h spremanja topline, odnosno u 12 h korištenja topline.  $Q_{\max}$  definira se kao maksimalno moguća ukupna (osjetna i latentna) količina topline koja se može akumulirati/predati unutar spremnika u zadanim vremenima spremanja/korištenja topline, odnosno:

$$Q_{\max} = m_{\text{PCM}} \cdot [\pm c_{\text{PCM}} \cdot (T_{\text{HTF,ul}} - T_{\text{PCM,init}}) + L] \quad (9.3)$$

Rezultati optimizacije prikazani su posebno za procese spremanja i korištenja topline kako bi se uočile različitosti ovih dvaju procesa, a potom je razmatran cjelokupni ciklus spremanja i korištenja topline. Budući da se oba procesa odvijaju unutar istoga latentnog spremnika topline, rezultati dobiveni za cjelokupni ciklus predstavljaju stvarne optimume analiziranih parametara. Odzivi korišteni pri optimizaciji cjelokupnog ciklusa spremanja i korištenja topline predstavljaju srednje vrijednosti definiranih funkcija cilja dobivenih prilikom odvojenih razmatranja procesa taljenja ( $t$ ), odnosno skrućivanja ( $s$ ) akumulatora topline, što znači da se procesima taljenja (spremanja topline) i skrućivanja (korištenja topline) pridodaje jednaka važnost. Numerički proračuni vršeni su s ulaznom temperaturom fluida prijenosnika topline 42 °C u analizama spremanja, odnosno 7 °C u analizama korištenja topline. U oba procesa ulazna brzina fluida iznosila je 0,02 m/s. U početnom trenutku raspodjela temperatura u domeni bila je jednolika i iznosila je 13 °C za slučaj spremanja, odnosno 42 °C za slučaj korištenja topline.

Regresijski polinomi te optimalne vrijednosti analiziranih varijabli dobivaju se unosom vrste postupka, analiziranih parametara te odgovarajućih odziva unutar računalnog programa za statističku obradu Minitab.

Vrijednosti funkcija cilja odnose se na područje jedne cijevi s lamelama i pripadajućeg dijela akumulatora topline. Njihove vrijednosti te kodirane ( $X_i$ ) i nekodirane ( $x_i$ ) minimalne, referentne i maksimalne vrijednosti analiziranih parametara dane su u tablici 9.1.

*Tablica 9.1. Minimalne, referentne i maksimalne vrijednosti analiziranih parametara te odzivi definiranih funkcija cilja za ispitane slučajeve dobiveni za područje oko jedne cijevi*

Slučaj	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$x_1$ [-]	$x_2$ [-]	$x_3$ [mm]	$\dot{Q}_{L,t}$ [W]	$\dot{Q}_{L,s}$ [W]	$\varepsilon_t$ [-]	$\varepsilon_s$ [-]
1	0	-1	-1	12	13	2	177,9	123,2	0,9898	0,9872
2	0	-1	1	12	13	4	178,7	124,1	0,9939	0,9914
3	0	1	-1	12	18	2	198,9	136,4	0,9978	0,9959
4	0	1	1	12	18	4	198,4	136,6	0,9984	0,9974
5	-1	0	-1	8	15,5	2	183,2	123,6	0,9919	0,9871
6	-1	0	1	8	15,5	4	184,3	125,4	0,9945	0,9909
7	1	0	-1	16	15,5	2	190,8	133,0	0,9966	0,9951
8	1	0	1	16	15,5	4	189,8	131,4	0,9975	0,9968
9	-1	-1	0	8	13	3	172,7	118,1	0,9858	0,9816
10	-1	1	0	8	18	3	195,1	133,1	0,9971	0,9938
11	1	-1	0	16	13	3	178,9	125,5	0,9937	0,9924
12	1	1	0	16	18	3	200,0	139,7	0,9987	0,9979
13	0	0	0	12	15,5	3	190,0	131,8	0,9964	0,9947
14	0	0	0	12	15,5	3	190,0	131,8	0,9964	0,9947
15	0	0	0	12	15,5	3	190,0	131,8	0,9964	0,9947

## 9.2. Optimizacija latentnog spremnika topline s obzirom na definirane funkcija cilja

9.2.1. Optimizacija latentnog spremnika topline s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka

Optimizacijska funkcija s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka za odziv ima srednju vrijednost srednjih latentnih toplinskih tokova dobivenih numeričkim proračunima procesa spremanja i korištenja topline. Razmatrana funkcija može se zapisati na sljedeći način:

$$f_1(x_1, x_2, x_3) = \dot{Q}_L \quad (9.4)$$

Kvadratna regresijska funkcija s interakcijama između varijabli za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka za ciklus spremanja i korištenja topline ima sljedeći oblik:

$$f_1(x_1, x_2, x_3) = 93,9 + 18,66 \cdot x_1 + 26,87 \cdot x_2 + 33,01 \cdot x_3 - 0,5154 \cdot x_1^2 - 0,393 \cdot x_2^2 - 3,28 \cdot x_3^2 - 0,092 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,616 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,359 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (9.5)$$

Koeficijent višestruke determinacije iznosi:

$$R^2 = 0,9976 \quad (9.6)$$

Budući da je vrijednost  $R^2$  unutar preporučenog intervala točnosti  $0,9 \leq R^2 \leq 1$ , može se zaključiti da dobiveni regresijski polinom s velikom točnošću predstavlja stvarni odziv funkcije cilja s obzirom na mijenjanje vrijednosti triju varijabli.

Za ovu funkciju cilja optimalne vrijednosti analiziranih parametara prikazane su u tablici 9.2.

*Tablica 9.2. Optimalne vrijednosti analiziranih parametara za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka*

<b>Analizirani parametar</b>	<b>Spremanje topline</b>	<b>Korištenje topline</b>	<b>Spremanje i korištenje topline</b>
Broj lamela ( $x_1$ ) [-]	14	15	15
Omjer visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi ( $x_2$ ) [-]	18	18	18
Debljina lamela ( $x_3$ ) [mm]	2,48	2,71	2,65

Iz dobivenih rezultata optimizacije vidljivo je da se maksimalno povećanje srednjeg latentnog toplinskog toka prilikom spremanja topline ostvaruje kad broj lamela iznosi 14. Lamele poboljšavaju i ujednačuju izmjenu topline u latentnom spremniku topline, pogotovo u radijalnom smjeru, čime se premošćuje mala toplinska vodljivost akumulatora topline. Pri razmatranju korištenja topline, vidljivo je da je maksimalna vrijednost srednjeg latentnog



toplinskog toka postignuta uz 15 lamela. Veći broj lamela prilikom procesa korištenja topline potreban je za učinkovitu izmjenu topline budući da se kroz gotovo cijeli proces ona odvija samo provođenjem, a utjecaj slobodne konvekcije postupno se smanjuje kako skrućivanje akumulatora topline odmiče te ona naposljetku nestaje. U funkciji s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka u kojoj se spremanju i korištenju topline daje jednaka važnost, optimalan broj lamela iznosi 15. Povećanje broja lamela smanjuje količinu akumulatora topline u latentnom spremniku topline i neće rezultirati maksimalnom vrijednošću srednjeg latentnog toplinskog toka pri taljenju. Međutim, povećanjem broja lamela značajnije se poboljšava izmjena topline prilikom skrućivanja pa stoga izvedba s 15 lamela predstavlja povoljnije rješenje kad se razmatra cjelokupni ciklus spremanja i korištenja topline.

Najveće povećanje srednjeg latentnog toplinskog toka pri spremanju i korištenju topline te u slučaju razmatranja cjelokupnog ciklusa spremanja i korištenja topline s jednakim važnostima ostvaruje se kad vrijednost omjera visine spremnika i promjera opisane kružnice oko cijevi iznosi 18, što je njezina maksimalna razmatrana vrijednost. Povećanje vrijednosti ovog omjera povoljno je za izmjenu topline budući da se smanjuje debljina sloja akumulatora topline, a time i toplinski otpor provođenju topline. Isto tako, povećanjem ovog omjera smanjuje se širina lamela, što nema značajniji nepovoljan utjecaj na izmjenu topline. Količina akumulatora topline unutar latentnog spremnika topline promjenom ovog omjera ostaje nepromijenjena. Zbog zadanog ograničenja visine latentnog spremnika topline od 2,5 m, odnosno vrijednosti omjera 18, utjecaj daljnjeg povećanja vrijednosti ovog omjera nije ispitan.

Optimalna vrijednost debljine lamela u razmatranju procesa spremanja topline iznosi 2,48 mm. Povećanje debljine lamela blago povećava površinu izmjene topline te tako povoljno djeluje na povećanje srednjeg latentnog toplinskog toka prilikom taljenja. Za istu funkciju cilja prilikom procesa korištenja topline, optimalna vrijednost ovog parametra iznosi 2,71 mm. Za postizanje maksimalne vrijednosti srednjeg latentnog toplinskog toka pri skrućivanju, potrebna je veća površina izmjene topline nego u slučaju taljenja pa debljina lamela mora biti veća. Analogno povećanju broja lamela, povećanje debljine lamela nije u potpunosti povoljno jer osim povećanja površine izmjene topline utječe i na smanjenje količine akumulatora topline. Stoga je pri zajedničkom razmatranju taljenja i skrućivanja dobivena optimalna vrijednost debljine lamele od 2,65 mm, što predstavlja najbolje rješenje s obzirom na povećanje srednjeg latentnog toplinskog toka za promatrani ciklus spremanja i korištenja topline.

### 9.2.2. Optimizacija latentnog spremnika topline s ciljem povećanja iskoristivosti topline

Optimizacijska funkcija s ciljem povećanja iskoristivosti topline za odziv ima srednju vrijednost iskoristivosti topline prilikom spremanja i korištenja topline te ima oblik:

$$f_2(x_1, x_2, x_3) = \varepsilon \quad (9.7)$$

Kvadratna regresijska funkcija s interakcijama između varijabli za funkciju s ciljem povećanja iskoristivosti topline za ciklus spremanja i korištenja topline ima sljedeći oblik:

$$f_2(x_1, x_2, x_3) = 0,8412 + 0,005811 \cdot x_1 + 0,01147 \cdot x_2 + 0,00832 \cdot x_3 - 0,000092 \cdot x_1^2 - 0,00023 \cdot x_2^2 - 0,00024 \cdot x_3^2 - 0,000162 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,00012 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,000276 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (9.8)$$

Koeficijent višestruke determinacije iznosi:

$$R^2 = 0,994 \quad (9.9)$$

I ovdje je vrijednost koeficijenta višestruke determinacije unutar preporučenog intervala točnosti pa se može zaključiti da polinom s velikom točnošću povezuje nezavisne varijable s odzivom, odnosno funkcijom cilja.

Za ovu funkciju cilja optimalne vrijednosti analiziranih parametara prikazane su u tablici 9.3.

*Tablica 9.3. Optimalne vrijednosti analiziranih parametara za funkciju s ciljem povećanja iskoristivosti topline*

<b>Analizirani parametar</b>	<b>Spremanje topline</b>	<b>Korištenje topline</b>	<b>Spremanje i korištenje topline</b>
Broj lamela ( $x_1$ ) [-]	13	14	13
Omjer visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi ( $x_2$ ) [-]	18	18	18
Debljina lamela ( $x_3$ ) [mm]	3,41	3,78	3,66

Za postizanje najveće iskoristivosti topline u slučaju taljenja akumulatora topline, optimalna vrijednost broja lamela iznosi 13. Povećanjem broja lamela povećava se površina izmjene topline, čime se omogućava brže spremanje topline. Međutim, spremljena toplina ovisi i o količini akumulatora topline u latentnom spremniku topline, koja se smanjuje povećanjem broja lamela. Prilikom procesa korištenja topline, iskoristivost topline latentnog spremnika topline najveća je ako broj lamela iznosi 14. Veći optimalni broj lamela u slučaju skrućivanja potreban je s obzirom na slabiju izmjenu topline u usporedbi s taljenjem, što rezultira i manjom količinom predane topline. Uz veći broj lamela povećava se toplinski tok, a time i količina predane topline te iskoristivost topline kod skrućivanja. Optimalan broj lamela u slučaju promatranja cjelokupnog ciklusa spremanja i korištenja topline iznosi 13. Može se zaključiti da bi povećanje broja lamela s 13 na 14 oslabilo utjecaj slobodne konvekcije prilikom taljenja te smanjilo kapacitet spremnika za spremanje topline više nego što bi smanjenje broja lamela na 13 nepovoljno utjecalo na iskoristivost topline prilikom skrućivanja, stoga 13 lamela predstavlja optimalnu vrijednost ovog parametra za cjelokupni ciklus spremanja i korištenja topline.

Količina akumulatora topline ne mijenja se promjenom omjera visine i promjera kružnice opisane oko cijevi pa nepromjenjiva ostaje i maksimalno moguća količina topline koja se može akumulirati, odnosno predati. Stoga količina topline koja se u zadanom vremenu može akumulirati/predati ovisi o izmijenjenom toplinskom toku, koji se povećava za veće vrijednosti ovog omjera. Povećanjem ovog omjera smanjuje se debljina sloja akumulatora topline oko cijevi, a time i toplinski otpor. Povećanjem visine spremnika veći je i intenzitet slobodne konvekcije prilikom taljenja, što također doprinosi izmjeni topline. Smanjena širina lamele ni u ovom razmatranju nema značajniji nepovoljan utjecaj na odziv. Budući da je u procesu optimizacije ovaj parametar ograničen visinom spremnika od 2,5 m, njegova optimalna vrijednost dobivena je upravo za najveću moguću visinu, odnosno omjer 18 pri razmatranjima spremanja, odnosno korištenja topline te cjelokupnog ciklusa spremanja i korištenja topline.

Maksimum iskoristivosti topline prilikom spremanja topline ostvaruje se uz debljinu lamela od 3,41 mm. Blago povećanje površine izmjene topline povećanjem debljine lamela povećava brzinu spremanja topline, ali smanjuje maksimalnu količinu topline koju je moguće pohraniti u spremnik. Najpovoljnija iskoristivost topline u procesu korištenja topline ostvaruje se uz debljinu lamela 3,78 mm. Zbog slabije izmjene topline i izostanka značajnijeg utjecaja slobodne konvekcije, deblje lamele povoljnije utječu na izmjenu topline, a time i na količinu predane topline te iskoristivost topline. Naposljetku, optimalna debljina lamele za funkciju cilja koja razmatra iskoristivost topline u cjelokupnom ciklusu spremanja i korištenja topline iznosi 3,66

mm i predstavlja kompromis između optimuma dobivenih kad se procesi spremanja i korištenja topline razmatraju odvojeno.

### 9.2.3. Optimizacija latentnog spremnika topline s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz istovremeno povećanje iskoristivosti topline

Optimizacijska funkcija s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz istovremeno povećanje iskoristivosti topline u ciklusu spremanja i korištenja topline uz tri varijable ima sljedeći oblik:

$$f_3(x_1, x_2, x_3) = g_{f1} \cdot \frac{f_1(x_1, x_2, x_3)}{f_{1,ref}(x_1, x_2, x_3)} + g_{f2} \cdot \frac{f_2(x_1, x_2, x_3)}{f_{2,ref}(x_1, x_2, x_3)} \quad (9.10)$$

Pri tome  $g_{f1}$  i  $g_{f2}$  predstavljaju bezdimenzijske faktore važnosti koji se pridodaju funkciji srednjeg latentnog toplinskog toka ( $f_1$ ), odnosno iskoristivosti topline ( $f_2$ ). Oni određuju težinu određenog cilja i mogu imati vrijednost između 0 i 1, pri čemu njihov zbroj uvijek iznosi 1. Kao što je vidljivo iz izraza (9.10), svaki faktor važnosti množi se s omjerom vrijednosti razmatrane funkcije cilja za trenutnu konfiguraciju i njezine vrijednosti za referentnu konfiguraciju (slučaj 000). U ovom optimizacijskom postupku, funkcijama srednjeg latentnog toplinskog toka i iskoristivosti topline pridodaje se jednaka važnost, odnosno  $g_{f1} = g_{f2} = 0,5$ .

Kvadratna regresijska funkcija s interakcijama između varijabli za ovaj slučaj ima oblik:

$$f_3(x_1, x_2, x_3) = 0,5036 + 0,01902 \cdot x_1 + 0,02896 \cdot x_2 + 0,03268 \cdot x_3 - 0,000491 \cdot x_1^2 - 0,000455 \cdot x_2^2 - 0,00295 \cdot x_3^2 - 0,000161 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,000592 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,000449 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (9.11)$$

Koeficijent  $R^2$  unutar je preporučenog intervala točnosti  $0,9 \leq R^2 \leq 1$  i iznosi:

$$R^2 = 0,9976 \quad (9.12)$$

Za ovu funkciju cilja optimalne vrijednosti analiziranih parametara prikazane su u tablici 9.4.

Tablica 9.4. Optimalne vrijednosti analiziranih parametara za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz povećanje iskoristivosti topline s jednakim faktorima važnosti

Analizirani parametar	Spremanje topline	Korištenje topline	Spremanje i korištenje topline
Broj lamela ( $x_1$ ) [-]	14	15	15
Omjer visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi ( $x_2$ ) [-]	18	18	18
Debljina lamela ( $x_3$ ) [mm]	2,51	2,73	2,67

Za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz istovremeno povećanje iskoristivosti topline s jednakim faktorima važnosti, optimalna vrijednost broja lamela pri spremanju topline iznosi 14. Kad se razmatra ista funkcija cilja za proces korištenja topline, optimalni broj lamela iznosi 15. Zbog slabije izmjene topline, optimum broja lamela pri skrućivanju uvijek je veći u usporedbi s onim prilikom taljenja, što je vidljivo iz prethodno prikazanog pojedinačnog razmatranja navedenih funkcija cilja. Funkcija koja u obzir uzima cjelokupni ciklus spremanja i korištenja topline svoj maksimum postiže također uz 15 lamela.

Optimum omjera visine i promjera kružnice opisane oko cijevi prilikom razmatranja procesa spremanja, odnosno korištenja topline te ciklusa spremanja i korištenja topline iznosi 18, kao i kad se funkcije s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka i iskoristivosti topline razmatraju pojedinačno. Toplinski tok povećava se zbog smanjenja toplinskog otpora na strani akumulatora topline budući da je njegova debljina manja, što povećava količinu akumulirane, odnosno predane topline. Također, povećanjem ovog omjera ne smanjuje se količina akumulatora topline budući da se njegovim povećanjem smanjuje širina lamela.

Optimalna debljina lamele za funkciju s ciljem povećanje srednjeg latentnog toplinskog toka uz istovremeno povećanje iskoristivosti topline pri procesu spremanja topline iznosi 2,51 mm i između je optimuma odvojeno razmatranih funkcija. Slično je i s dobivenom optimalnom debljinom lamele pri procesu korištenja topline, koja je, sukladno svim prije razmatranim slučajevima, veća od optimalne debljine kad se razmatra samo spremanje topline i iznosi 2,73 mm. Kad se promatraju cjelokupni ciklus spremanja i korištenja topline, optimum iznosi 2,67 mm i nalazi se između optimalnih debljina dobivenih posebno za taljenje, odnosno skrućivanje.

### 9.3. Usporedba kriterija ocjene učinkovitosti optimalne konfiguracije i latentnog spremnika topline na kojem su provedena eksperimentalna istraživanja

Naposljetku, konfiguracija latentnog spremnika topline dobivena optimizacijom s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz istovremeno povećanje iskoristivosti topline s jednakim faktorima važnosti uspoređena je s konfiguracijom latentnog spremnika topline na kojem su provedena eksperimentalna istraživanja. Kao kriteriji ocjene učinkovitosti, uspoređena su vremena u kojima završavaju taljenje ( $t_t$ ) i skrućivanje ( $t_s$ ), vremena trajanja procesa promjene agregatnog stanja ( $t_{L,t}$  i  $t_{L,s}$ ), topline akumulirane u 8 h ( $Q_{8h,t}$ ), odnosno predane u 12 h ( $Q_{12h,s}$ ), latentne topline ( $Q_L$ ), srednji latentni toplinski tokovi pri taljenju ( $\dot{Q}_{L,t}$ ) i skrućivanju ( $\dot{Q}_{L,s}$ ) te iskoristivosti topline u procesima spremanja ( $\varepsilon_t$ ), odnosno korištenja topline ( $\varepsilon_s$ ) za obje konfiguracije. Usporedba je prikazana u tablici 9.5.

Tablica 9.5. Usporedba kriterija ocjene učinkovitosti dobivenih za područje oko jedne cijevi eksperimentalnog latentnog spremnika topline i optimalne konfiguracije za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz povećanje iskoristivosti topline s jednakim faktorima važnosti

Analizirani parametar	Eksperimentalni latentni spremnik topline	Optimalna konfiguracija latentnog spremnika topline
$t_t$ [h]	9,17	6,31
$t_s$ [h]	14,48	9,21
$t_{L,t}$ [h]	9,16	6,3
$t_{L,s}$ [h]	14,47	9,08
$Q_{8h,t}$ [kJ]	6162,3	6098,3
$Q_{12h,s}$ [kJ]	6297,8	7041,3
$Q_L$ [kJ]	4999,7	4551,7
$\dot{Q}_{L,t}$ [W]	151,6	200,8
$\dot{Q}_{L,s}$ [W]	96,1	139,2
$\varepsilon_t$ [-]	0,9191	0,9988
$\varepsilon_s$ [-]	0,8922	0,9979

Usporedbom s eksperimentalnim latentnim spremnikom topline, vidljivo je značajno poboljšanje ispitivanih kriterija ocjene učinkovitosti u optimalnoj konfiguraciji dobivenoj za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz povećanje iskoristivosti topline s jednakim faktorima važnosti za cjelokupni ciklus spremanja i korištenja topline. Vrijeme u kojem završava taljenje u procesu spremanja topline za optimalnu konfiguraciju iznosi 6,31 h i u odnosu na eksperimentalni latentni spremnik topline kraće je za 31,2%. Vrijeme u kojem završava skrućivanje u procesu korištenja topline za optimalnu konfiguraciju iznosi 9,21 h, i za 36,4% je kraće nego u slučaju eksperimentalnog latentnog spremnika topline. Vrijeme trajanja procesa taljenja u optimalnoj konfiguraciji iznosi 6,3 h i u usporedbi s eksperimentalnom konfiguracijom, kraće je za 31,2%. Proces skrućivanja u optimalnoj konfiguraciji traje 9,08 h, što je za 37,2% kraće u odnosu na eksperimentalnu konfiguraciju.

U razdoblju od 8 h, latentni spremnik topline optimalne konfiguracije akumulira 6098,3 kJ, što je za 1% manje nego u eksperimentalnoj konfiguraciji. Zbog većeg broja lamela i njihove veće debljine, smanjena je količina akumulatora topline, što rezultira blagim smanjenjem akumulirane topline u istom vremenu. Smanjena količina akumulatora topline ne utječe negativno na proces korištenja topline, gdje je za 12 h procesa u latentnom spremniku topline optimalne konfiguracije predano 7041,3 kJ topline, što je za 11,8% više nego u slučaju eksperimentalnog latentnog spremnika topline. Negativan utjecaj smanjenja količine akumulatora topline vidljiv je i u količini latentne topline koju je moguće akumulirati/predati; u optimalnoj konfiguraciji latentnog spremnika topline ona iznosi 4551,7 kJ i za 9% je manja u odnosu na eksperimentalni latentni spremnik topline.

Srednji latentni toplinski tok prilikom taljenja akumulatora topline u optimalnoj konfiguraciji iznosi 200,8 W, što je za 32,4% više nego u eksperimentalnoj konfiguraciji. Srednji latentni toplinski tok prilikom skrućivanja za optimalnu konfiguraciju iznosi 139,2 W, odnosno za 44,8% više nego u latentnom spremniku topline na kojem su provedena eksperimentalna istraživanja. Iskoristivost topline latentnog spremnika topline prilikom taljenja za optimalnu konfiguraciju iznosi 0,9988, odnosno za 8,7% više nego u eksperimentalnom latentnom spremniku topline. Iskoristivost topline u slučaju skrućivanja za optimalnu konfiguraciju iznosi 0,9979, što je za 11,8% više nego u slučaju eksperimentalnog latentnog spremnika topline.

U ovom je poglavlju prikazan primjer postupka optimizacije za odabrane parametre i funkcije cilja. Na sličan način mogu se provesti optimizacijski procesi za druge skupove parametara te druge funkcije cilja.

## 10. ZAKLJUČAK

U radu su eksperimentalno i numerički analizirani procesi spremanja i korištenja topline iz latentnog spremnika topline u svrhu povećanja njegove učinkovitosti. Proces spremanja i korištenja topline nestacionaran je fizikalni problem, koji uključuje strujanje fluida prijenosnika topline i njegovu izmjenu topline prisilnom konvekcijom sa stijenkom, provođenje topline kroz stijenkku te izmjenu topline između stijenke i akumulatora topline koji pritom mijenja agregatno stanje. U kapljevitoj fazi akumulatora topline prisutna je slobodna konvekcija, koja doprinosi izmjeni topline.

U sklopu eksperimentalnog dijela istraživanja, konstruiran je latentni spremnik topline konfiguracije snopa cijevi u plaštu s uzdužnim lamelama na vanjskoj strani svake cijevi te povezan s pripadajućom mjernom opremom. Latentni spremnik topline kao akumulator topline koristi parafin RT 25, smješten oko cijevi, a kao fluid prijenosnik topline vodu, koja struji kroz cijevi. Na karakteristične pozicije u spremniku na strani parafina, kao i na ulazu i izlazu vode, postavljeni su termoparovi te povezani sa sustavom za prikupljanje i pohranu podataka, čime je omogućeno mjerenje vremenskih promjena temperatura akumulatora topline i fluida prijenosnika topline. Izvršen je niz mjerenja pri taljenju i skrućivanju parafina za različite pogonske uvjete. Eksperimentalnom analizom utvrđeno je da ulazna temperatura fluida prijenosnika topline ima značajan, a protok fluida manji utjecaj na izmjenu topline.

Osim za produbljavanje spoznaja o fizikalnim procesima spremanja i korištenja topline u latentnim spremnicima topline, rezultati eksperimentalnih istraživanja korišteni su i za provjeru valjanosti matematičkog modela i numeričkog postupka. Za najmanji segment fizikalnog problema u kojem su sadržane sve fizikalne pojave unutar latentnog spremnika topline, definirana je domena numeričkog proračuna za koju je postavljen odgovarajući matematički model strujanja i izmjene topline, definiran jednadžbama očuvanja te početnim i rubnim uvjetima. Model koristi entalpijsku metodu za modeliranje prijelaza topline pri promjeni agregatnog stanja te Boussinesqovu aproksimaciju za modeliranje slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline. Opisani fizikalni problem riješen je numerički, primjenom numeričke metode kontrolnih volumena korištenjem programskog paketa za numeričko rješavanje Ansys Fluent. Postojeći numerički postupak nadograđen je nizom napisanih korisničkih funkcija kako bi se opisala izmjena topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline prema definiranom matematičkom modelu. Provjera valjanosti



matematičkog modela i numeričkog postupka izvršena je usporedbama vremenskih promjena temperatura prilikom taljenja i skrućivanja akumulatora topline s rezultatima eksperimentalnih istraživanja, koje su pokazale dobro poklapanje.

Istražen je i utjecaj slobodne konvekcije prilikom taljenja, odnosno skrućivanja akumulatora topline usporedbom rezultata numeričkih proračuna s i bez utjecaja slobodne konvekcije. Uočeno je da slobodna konvekcija znatno utječe na proces izmjene topline prilikom taljenja, a mnogo manje na proces izmjene topline pri skrućivanju. Zbog sličnosti rezultata i upola kraćeg vremena potrebnog za proračun, numerički proračuni procesa skrućivanja vršeni su bez uzimanja u obzir slobodne konvekcije.

Usljedila je numerička analiza utjecaja geometrijskih parametara latentnog spremnika topline na izmjenu topline pri spremanju i korištenju topline. Ispitan je utjecaj broja lamela, omjera visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi te debljine lamela na količinu akumulirane/predane topline te vrijeme potrebno za potpuno taljenje, odnosno skrućivanje akumulatora topline. Uočeno je da se povećanjem broja i debljine lamela skraćuje vrijeme taljenja/skrućivanja, no smanjuje se količina akumulatora topline što može rezultirati manjom količinom akumulirane/predane topline.

U svrhu odabira najpovoljnijih vrijednosti ispitivanih parametara, proveden je postupak optimizacije metodom odzivnih ploha s obzirom na tri definirane funkcije cilja; povećanje srednjeg latentnog toplinskog toka, povećanje iskoristivosti topline latentnog spremnika topline i njihovu kombinaciju. U svakoj funkciji cilja procesi spremanja i korištenja topline razmatrani su odvojeno i kao cjelokupni ciklus spremanja i korištenja topline, a optimalne vrijednosti cjelokupnog ciklusa usvojene su kao optimumi. Naposljetku, konfiguracija latentnog spremnika topline dobivena kombiniranom funkcijom cilja uspoređena je s eksperimentalnim latentnim spremnikom topline prema nizu kriterija ocjene učinkovitosti te je uočeno značajno poboljšanje.

U nastavku istraživanja planira se primjena eksperimentom provjerenog matematičkog modela i numeričkog postupka na druge konfiguracije latentnih spremnika topline i druge oblike lamela te nastavak istraživanja postupaka optimizacije geometrijskih parametara latentnog spremnika topline u svrhu povećanja njegove učinkovitosti.

## Literatura

- [1] Trp, A.: *Termodinamička analiza akumulacije topline u latentnom spremniku*, doktorska disertacija, 2002.
- [2] N'Tsoukpoe, K.E.; Liu, H.; Le Pierrès, N.; Luo, L.: *A review on long-term sorption solar energy storage*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2385-2396, 2009.
- [3] Jegadheeswaran, S.; Pohekar, S.D.: *Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (9), 2225-2244, 2009.
- [4] Lamberg, P.: *Approximate analytical model for two-phase solidification problem in a finned phase-change material storage*, Applied Energy, 77, 131-152, 2004.
- [5] Dutil, Y.; Rousse, D.R.; Salah, N.B.; Lassue, S.; Zalewski, L.: *A review on phase-change materials: mathematical modeling and simulations*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 112-130, 2011.
- [6] Voller, V.R.; Cross, M.; Markatos, M.C: *An enthalpy method for convection/diffusion phase change*, International Journal of Numerical Methods in Engineering, 24, 271-284, 1987.
- [7] Voller, V.R.; Prakash, C.: *A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 30, 1709-1719, 1987.
- [8] Lacroix, M.: *Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit*, Solar Energy, 50, 357-367, 1993.
- [9] Jian-you, L.: *Numerical and experimental investigation for heat transfer in triplex concentric tube with phase change material for thermal energy storage*, Solar Energy, 82, 977-985, 2008.
- [10] Trp, A.: *An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell-and-tube latent thermal energy storage unit*, Solar Energy, 79, 648-660., 2005.
- [11] Trp, A.; Lenic, K.; Frankovic, B.: *Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit*, Applied Thermal Engineering, 26, 1830-1839, 2006.
- [12] Abhat, A.: *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*, Solar Energy, 30 (4), 313-332, 1983.
- [13] Salunkhe, P.B.; Krishna, D.J.: *Investigations on latent heat storage materials for solar water and space heating applications*, Journal of Energy Storage, 12, 243-260, 2017.
- [14] Riffat, S.; Mempo, B.; Fang, W.: *Phase change material developments: a review*, International Journal of Ambient Energy, 36 (3), 102-115, 2013.

- [15] Abdulateef, A.M.; Mat, S.; Abdulateef, J.; Sopian, K.; Al-Abidi, A.A.: *Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (1), 1620-1635, 2018.
- [16] Khan, Z.; Khan, Z.; Ghafoor, A.: *A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility*, Energy Conversion and Management, 115, 132-158, 2016.
- [17] Vyshak, N.; Jilani, G.: *Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system*, Energy Conversion and Management, 48, 2161-2168, 2007.
- [18] Agyenim, F.; Hewitt, N.; Eames, P.; Smyth, M.: *A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (2), 615-628, 2010.
- [19] Al-Abidi, A.A.; Mat, S.; Sopian, K.; Sulaiman, M.Y.; Lim, C.H.; Abdulrahman, T.H.: *Review of thermal energy storage for air conditioning system*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (8), 5802-5819, 2012.
- [20] Kalapala, L; Devanuri, J.K.: *Influence of operational and design parameters on the performance of a PCM based heat exchanger for thermal energy storage – A review*, Journal of Energy Storage, 20, 497-519, 2018.
- [21] Esen, M; Durmuş, A; Durmuş, A: *Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials*, Solar Energy, 62 (1), 19-28, 1998.
- [22] Ismail, K.A.R.; Melo, C.A.: *Convection-based model for a PCM vertical storage unit*, International Journal of Energy Research, 22, 1249-1265, 1998.
- [23] Seddegh, S.; Wang, X.; Joybari, M.M.; Haghghat, F.: *Investigation of the effect of geometric and operating parameters on thermal behavior of vertical shell-and tube latent heat energy storage systems*, Energy, 137, 69-82, 2017.
- [24] Seddegh, S.; Wang, X.; Henderson, A.D.: *A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials*, Applied Thermal Engineering, 93, 348-358, 2016.
- [25] Kousha, N.; Hosseini, M.J.; Aligoodarz, M.R.; Pakrouh, R.; Bahrampoury, R.: *Effect of inclination angle on the performance of a shell and tube heat storage unit – an experimental study*, Applied Thermal Engineering, 112, 1497-1509, 2017.
- [26] Regin, A.F.; Solanki, S.C.; Saini, J.S.: *Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 2438-2458, 2008.
- [27] Abokersh, M.H.; Osman, M; El-Baz, O.; El-Morsi, M.; Sharaf, O.: *Review of the phase change material (PCM) usage for solar domestic water heating systems (SDWHS)*, International Journal of Energy Research, 42, 329-357, 2018.
- [28] Tao, Y.B.; He, Y-L.: *A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 245-259, 2018.

- [29] Akgün, M.; Aydın, O.; Kaygusuz, K.: *Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM*, Energy Conversion and Management, 48 (2), 669-678, 2007.
- [30] Rathod, M.K.; Banerjee, J.: *Experimental Investigations on Latent Heat Storage Unit using Paraffin Wax as Phase Change Material*, Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion, 27 (1), 40-55, 2014.
- [31] Korti, A.I.N.; Tlemsani, F.Z.: *Experimental investigation of latent heat storage in a coil in PCM storage unit*, Journal of Energy Storage, 5, 177-186, 2016.
- [32] Agarwal, A., Sarviya, R.M., *An experimental investigation of shell and tube latent heat storage for solar dryer using paraffin wax as heat storage material*, Engineering Science and Technology, an International Journal, 19 (1), 619-631, 2016.
- [33] Liu, M; Saman, W; Bruno, F.: *Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2118-2132, 2012.
- [34] Gasia, J.; Diriken, J; Bourke, M.; Van Bael, J.; Cabeza, L.F.: *Comparative study of the thermal performance of four different shell-and-tube heat exchangers used as latent heat thermal energy storage systems*, Renewable Energy, 114 (B), 934-944, 2017.
- [35] Rathod, M.K.; Banerjee, J.: *Thermal performance enhancement of shell and tube Latent Heat Storage Unit using longitudinal fins*, Applied Thermal Engineering, 75, 1084-1092, 2015.
- [36] Khan, Z.; Khan, Z.A.: *Experimental investigations of charging/melting cycles of paraffin in a novel shell and tube with longitudinal fins based heat storage design solution for domestic and industrial applications*, Applied Energy, 206, 1158-1168, 2017.
- [37] Mahdi, M.S.; Hasan, A.F.; Mahood, H.B.; Campbell, A.N.; Khadom, A.A.; Karim, A.M.A.; Sharif, A.O.: *Numerical study and experimental validation of the effects of orientation and configuration on melting in a latent heat thermal storage unit*, Journal of Energy Storage, 23, 456-468, 2019.
- [38] Al-Abidi, A.A.; Mat, S.; Sopian, K.; Sulaiman, M.Y.; Mohammad, A.T.: *Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 61, 684-695, 2013.
- [39] Solomon, G.R.; Velraj, R.: *Analysis of the heat transfer mechanisms during energy storage in a phase change material filled vertical finned cylindrical unit for free cooling application*, Energy Conversion and Management, 75, 466-473, 2013.
- [40] Ismail, K.A.; Alves, C.L.; Modesto, M.S.: *Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder*, Applied Thermal Engineering, 21, 53-77, 2001.

- [41] Velraj, R.; Seeniraj, R.V.; Hafner, B.; Faber, C; Schwarzer, K.: *Experimental analysis and numerical modeling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit*, Solar Energy, 60 (5), 281-290, 1997.
- [42] Erek, A.; Ilken, Z; Acar, M.A.: *Experimental and numerical investigation of thermal energy storage with a finned tube*, International Journal of Energy Research, 29, 283-301, 2005.
- [43] Yang, X.; Lu, Z.; Bai, Q.; Zhang, Q.; Jin, L.; Yan, J.: *Thermal performance of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit: Role of annular fins*”, Applied Energy, 202, 558-570, 2017.
- [44] Stritih, U.: *An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM storage*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 2841-2847, 2004.
- [45] Agyenim, F.; Eames, P.; Smyth, M.: *A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins*, Solar Energy, 83, 1509-1520, 2009.
- [46] Caron-Soupart, A.; Fourmigué J-F.; Marty P.; Couturier, R.: *Performance analysis of thermal energy storage systems using phase change material*, Applied Thermal Engineering, 98, 1286-1296, 2016.
- [47] Liu, Z.; Sun, X.; Ma, C.: *Experimental investigations on the characteristics of melting processes of stearic acid in an annulus and its thermal conductivity enhancement by fins*, Energy Conversion and Management, 46, 959-969, 2005.
- [48] Mehta, D.S.; Vaghela, B.; Rathod, M.K.; Banerjee, J.: *Thermal performance augmentation in latent heat storage unit using spiral fin: An experimental analysis*, Journal of Energy Storage, 31, 101776, 2020.
- [49] Mettawee, E.S.; Assassa, G.M.R.: *Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system*, Solar Energy, 81, 839-845, 2007.
- [50] Velraj, R.; Seeniraj, R.V.; Hafner, B.; Faber, C.; Schwarzer, K.: *Heat transfer enhancement in a latent heat storage system*, Solar Energy, 65 (3), 171-180, 1999.
- [51] Wang, C.; Lin, T.; Li, N.; Zheng, H.: *Heat transfer enhancement of phase change composite material: copper foam/paraffin*, Renewable Energy, 96, 960-965, 2016.
- [52] Bose, P; Amirtham, V.A.: *A review on thermal conductivity enhancement of paraffin wax as latent heat energy storage material*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65, 81-100, 2016.
- [53] Wang, J.; Ouyang, Y.; Chen, G.: *Experimental study on charging processes of a cylindrical heat storage capsule employing multiple-phase change materials*, International Journal of Energy Research, 25, 439-447, 2001.
- [54] Aldoss, T.K.; Rahman, M.M.: *Comparison between the single-PCM and multi-PCM thermal energy storage design*, Energy Conversion and Management, 83, 79-87, 2014.

- [55] Zhang, C.; Sun, Q.; Chen, Y.: *Solidification behaviors and parametric optimization of finned shell-tube ice storage units*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 146, 118836, 2020.
- [56] Yu, C.; Zhang, X.; Chen, X.; Zhang, C.; Chen, Y.: *Melting performance enhancement of a latent heat storage unit using gradient fins*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 150, 119330, 2020.
- [57] Lohrasbi, S.; Bandpy, M.G.; Ganji, D.D.: *Response surface method optimization of V-shaped fin assisted latent heat thermal energy storage system during discharging process*, Alexandria Engineering Journal, 55, 2065-2076, 2016.
- [58] Lohrasbi, S.; Bandpy, M.G.; Ganji, D.D.: *Multi-objective RSM optimization of fin assisted latent heat thermal energy storage system based on solidification process of phase change material in presence of copper nanoparticles*, Applied Thermal Engineering, 118, 430-447, 2017.
- [59] Lohrasbi, S.; Bandpy, M.G.; Ganji, D.D.: *Thermal penetration depth enhancement in latent heat thermal energy storage system in the presence of heat pipe based on both charging and discharging processes*, Energy Conversion and Management, 148, 646-667, 2017.
- [60] Sheikholeslami, M., Lohrasbi, S., Ganji, D.D.: *Response surface method optimization of innovative fin structure for expediting discharging process in latent heat thermal energy storage system containing nano-enhanced phase change material*, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 67, 115-125, 2016.
- [61] Yu, C.; Wu, S.; Huang, Y.; Yao, F.; Liu, X.: *Charging performance optimization of a latent heat storage unit with fractal tree-like fins*, Journal of Energy Storage, 30, 101498, 2020.
- [62] Deng, Z.; Li, J.; Zhang, X.; Yao, F.; Shen, C.: *Melting intensification in a horizontal latent heat storage (LHS) system using a paraffin / fractal metal matrices composite*, Journal of Energy Storage, 32, 101857, 2020.
- [63] Lin, W.; Ma, Z.; Ren, H.; Gschwander, S.; Wang, S.: *Multi-objective optimisation of thermal energy storage using phase change materials for solar air systems*, Renewable Energy, 130, 1116-1129, 2019.
- [64] Holman, J.P.: *Experimental Methods for Engineers, 8th Edition*, McGraw-Hill, New York, 2012.
- [65] Taylor, J.R.: *Introduction To Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements, 2nd edition*, University Science Books, Sausalito, 1997.
- [66] ...: *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008.
- [67] *Parr 6775 Digital Thermometer, Operating Instructions Manual*, Parr Instrument Company, 2008.
- [68] *Multical 403 data sheet*, Kamstrup 2014.

- [69] *Paraffin RT 25 data sheet*, Rubitherm GmbH, 2018.
- [70] Ligett, J.A.: *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [71] Lenić, K.: *Numerička analiza utjecaja neravnomjernih rubnih temperatura na slobodnu konvekciju u zatvorenom zračnom prostoru*, magistarski rad, 2001.
- [72] Brent, A.D.; Voller, V.R.; Reid K.J.: *Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal*, Numerical Heat Transfer, 13 (3), 297-318, 1988.
- [73] Versteeg, H.K.; Malalasekera, W.: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Longman Scientific and Technical, Essex, 1995.
- [74] Leonard, B.P.: *Simple High-accuracy Resolution Program for Convective Modelling of Discontinuities*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 8, 1291-1318, 1988.
- [75] Patankar, S.V.; Spalding, D.B.: *A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 15, 1787-1806, 1972.
- [76] *Ansys Fluent Meshing User's Guide*, Release 15.0, studeni 2013.
- [77] *Ansys Fluent Theory Guide*, Release 15.0, studeni 2013.
- [78] Bošnjaković, F.: *Nauka o toplini II*, Tehnička knjiga Zagreb, 1976.
- [79] Glažar, V.: *Optimizacija geometrije kompaktnih izmjenjivača topline*, doktorska disertacija, 2011.
- [80] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York, 1998.
- [81] Chiu, N.W.; Martin, V.: *Submerged finned heat exchanger latent heat storage design and its experimental verification*, Applied Energy, 93, 507-516, 2012.
- [82] Gong, Z.X.; Mujumdar, A.S.: *Finite-element analysis of cyclic heat transfer in a shell-and-tube latent heat energy storage exchanger*, Applied Thermal Engineering, 17 (6), 583-591, 1997.
- [83] Fornarelli, F.; Camporeale, S.; Fortunato, B.; Torresi, M.; Oresta, P.; Magliocchetti, L.; Miliozzi, A.; Santo, G.: *CFD analysis of melting process in a shell-and-tube latent heat storage for concentrated solar power plants*, Applied Energy, 164, 711-722, 2016.
- [84] Seddegh, S.; Mostafavi Tehrani, S.S.; Wang, X.; Cao, F.; Taylor, R.A.: *Comparison of heat transfer between cylindrical and conical vertical shell-and-tube latent heat thermal energy storage systems*, Applied Thermal Engineering, 130, 1349-1362, 2018.
- [85] Box, G.E.P.; Wilson, K.B.: *On the Experimental Attainment of Optimum Conditions (with discussion)*, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 13 (1), 1-45.
- [86] Rezaei, E.; Barbato, M; Ortona, A.; Haussener, S.: *Design and optimization of a high-temperature latent heat storage unit*, Applied Energy, 261, 114330, 2020.

## Popis oznaka

### Latinični simboli:

$A$	površina granice kontrolnog volumena, $m^2$
$a$	diskretizacijski koeficijent
$b$	izvorni član
$C_{mor}$	morfološka konstanta, $kg/m^3s$
$c$	specifični toplinski kapacitet, $J/kgK$
$D$	difuzijska vodljivost, $kg/s$ promjer kružnice opisane oko cijevi, korak između cijevi, $m$
$F$	konvektivni maseni fluks, $kg/s$
$g$	faktor važnosti gravitacijsko ubrzanje, $m/s^2$
$H$	specifična entalpija, $J/kg$ visina latentnog spremnika, $m$
$h$	visina, $m$
$m$	masa, $kg$
$\dot{m}$	maseni protok, $kg/s$
$N$	broj lamela
$n$	normala
$p$	tlak, $Pa$
$p^*$	pretpostavljeno polje tlaka, $Pa$ tlak umanjen za hidrostatsku komponentu, $Pa$
$p'$	polje korekcije tlaka, $Pa$
$p^{new}$	poboljšano polje tlaka, $Pa$
$Q$	toplina, $J$
$\dot{Q}$	toplinski tok, toplinski učin, $W$
$\dot{q}$	gustoća toplinskog toka, $W/m^2$
$R^2$	koeficijent višestruke determinacije
$S$	izvorni član



$S_u$	neovisni dio izvornog člana
$S_p$	zavisni dio izvornog člana
$T$	termodinamička temperatura, K
$t$	vrijeme, s
$u$	apsolutna mjerna nesigurnost
$w$	brzina, m/s
$\vec{w}$	vektor brzine, m/s
$w^*$	pretpostavljena brzina, m/s
$w^{\text{new}}$	poboljšana brzina, m/s
$w^{(n-1)}$	brzina iz prethodne iteracije, m/s
$X$	kodirana varijabla Box-Behnkenova postupka
$x$	nekodirana varijabla Box-Behnkenova postupka prostorna koordinata, m
$y$	prostorna koordinata, m
$z$	prostorna koordinata, m

**Grčki simboli:**

$\alpha_p$	podrelaksacijski faktor tlaka
$\alpha_w$	podrelaksacijski faktor brzina
$\beta$	koeficijent toplinskog istezanja, 1/K
$\Gamma$	difuzijski koeficijent, kg/ms
$\gamma$	udio kapljevite faze
$\delta$	relativna mjerna nesigurnost udaljenost između čvorova kontrolnih volumena, m debljina lamela, mm
$\Delta t$	vremenski korak, s
$\Delta V$	kontrolni volumen, m <sup>3</sup>
$\varepsilon$	proračunski parametar iskoristivost topline
$\eta$	dinamička viskoznost, Pa·s
$\lambda$	koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK
$\bar{\lambda}$	prosječni koeficijent toplinske vodljivosti poprečno na slojeve, W/mK
$\rho$	gustoća, kg/m <sup>3</sup>
$\rho^0$	gustoća iz prethodnog vremenskog koraka, kg/m <sup>3</sup>
$\phi$	fizikalno svojstvo
$\phi^0$	fizikalno svojstvo iz prethodnog vremenskog koraka
$\bar{\psi}$	prosječna vrijednost neposredno mjerene veličine
$\psi$	procijenjena vrijednost neposredno mjerene veličine
$\Omega$	posredno mjerena veličina
$\omega$	procijenjena vrijednost posredno mjerene veličine

## Popis indeksa:

A	mjerna nesigurnost tipa A
B	mjerna nesigurnost tipa B
<i>E, W, N, S, T, B, WW, SS, TT</i>	oznake susjednih čvorova
<i>e, w, n, s, t, b</i>	granice kontrolnog volumena
f1	funkcija cilja $f_1$
f2	funkcija cilja $f_2$
HTF	fluid prijenosnik topline
I-1, I, I+1, J-1, J, J+1, K-1, K, K+1	čvorovi u kojima se računaju vrijednosti skalara
i-1, i, i+1, j-1, j, i+1, k-1, k, k+1	čvorovi u kojima se računaju vrijednosti brzina
init	početna vrijednost
iz	izlaz
L	latentno
l	likvidus
m	maseni protok
max	maksimalno
n	normala
	slučajna pogreška
nb	susjedni čvorovi
P	centralni čvor
PCM	akumulator topline
Q	toplina
s	skrućivanje
	solidus
	sustavna pogreška
st	stijenka
T	temperatura
t	taljenje
ul	ulaz
x	smjer osi x
y	smjer osi y
z	smjer osi z
0	referentna vrijednost

## Popis slika

<i>Slika 1.1. Cijevne konfiguracije latentnih spremnika topline, a) akumulator topline oko cijevi, b) akumulator topline u cijevi, c) snop cijevi u plaštu s akumulatorom topline oko cijevi [20]</i>	4
<i>Slika 1.2. Latentni spremnik topline s akumulatorom topline u kapsulama [28]</i>	6
<i>Slika 1.3. Cijevni latentni spremnik topline s uzdužnim lamelama oko cijevi [35]</i>	9
<i>Slika 1.4. Cijevni latentni spremnik topline s radijalnim lamelama oko cijevi [43]</i>	9
<i>Slika 1.5. Cijevni latentnog spremnika topline sa spiralnim lamelama oko cijevi [48]</i>	11
<i>Slika 1.6. Primjer dodavanja dobro provodljivih elemenata u akumulator topline u svrhu poboljšanja njegove toplinske vodljivosti, a) metalni prstenovi [50], b) bakrena pjena [28]</i>	12
<i>Slika 1.7. Shematski prikaz latentnog spremnika topline s više različitih akumulatora topline [28]</i>	13
<i>Slika 1.8. Latentni spremnici topline analizirani u postupku optimizacije, a) s uzdužnim lamelama u obliku slova V [57-59], b) s lamelama u obliku snježne pahulje [60], c) s metalnom matricom fraktalne geometrije [62]</i>	15
<i>Slika 2.1. Latentni spremnik topline cijevne konfiguracije s lamelama, a) razmatrani latentni spremnik topline, b) konfiguracija cijevi i lamela unutar spremnika</i>	18
<i>Slika 3.1. Konstruirani latentni spremnik topline korišten u eksperimentalnim istraživanjima</i>	19
<i>Slika 3.2. Dijelovi ispitne linije, a) latentni spremnik topline i sustav za prikupljanje podataka, b) regulacija ulazne temperature i protoka vode</i>	20
<i>Slika 3.3. Sustav za prikupljanje podataka, a) akvizicijska jedinica NI cDAQ-9174, b) modul za termoparove NI 9214</i>	21
<i>Slika 3.4. Sučelje korisničke aplikacije razvijene u računalnom programu LabView</i>	22
<i>Slika 3.5. Shematski prikaz dijela koda korisničke aplikacije razvijene u računalnom programu LabView</i>	23
<i>Slika 3.6. Ispitivane cijevi unutar latentnog spremnika topline i pozicije termoparova oko njih</i>	29
<i>Slika 3.7. Pozicije i nomenklatura termoparova na strani akumulatora topline oko jedne cijevi latentnog spremnika topline, a) tlocrt, b) uzdužni presjek cijevi i okolnog akumulatora topline</i>	30
<i>Slika 3.8. Postavljanje mjernih osjetnika u latentni spremnik topline, a) termoparovi u gumenoj cijevi, b) termoparovi učvršćeni plastičnim vezicama na pozicijama oko cijevi</i>	31

<i>Slika 3.9. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji <math>T_3</math> dobivene eksperimentalnim mjerenjima na različitim cijevima .....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 3.10. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji <math>T_6</math> dobivene eksperimentalnim mjerenjima na različitim cijevima .....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 3.11. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja oko središnje cijevi B dobivene eksperimentalnim mjerenjima u definiranom mjernom polju .....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 3.12. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja na poziciji <math>T_2</math> dobivene eksperimentalnim mjerenjima na različitim cijevima.....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 3.13. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja na poziciji <math>T_6</math> dobivene eksperimentalnim mjerenjima na različitim cijevima.....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 3.14. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja oko središnje cijevi B dobivene eksperimentalnim mjerenjima u definiranom mjernom polju .....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 4.1. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji <math>T_2</math> za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 4.2. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji <math>T_6</math> za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 4.3. Vremenske promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 4.4. Vremenske promjene akumuliranih toplina prilikom spremanja topline dobivene rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline.....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 4.5. Usporedba srednjih toplinskih učina spremanja topline dobivenih rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 4.6. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji <math>T_2</math> za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 4.7. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji <math>T_5</math> za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>43</i>

<i>Slika 4.8. Vremenske promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline.....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 4.9. Vremenske promjene predanih toplina prilikom korištenja topline dobivene rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 4.10. Usporedba srednjih toplinskih učina korištenja topline dobivenih rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite ulazne temperature fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 4.11. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>6</sub> za različite masene protoke fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>47</i>
<i>Slika 4.12. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>9</sub> za različite masene protoke fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 4.13. Vremenske promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom spremanja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima za različite masene protoke fluida prijenosnika topline.....</i>	<i>49</i>
<i>Slika 4.14. Vremenske promjene akumuliranih toplina prilikom spremanja topline dobivene rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite masene protoke fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>50</i>
<i>Slika 4.15. Usporedba srednjih toplinskih učina spremanja topline dobivenih rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite masene protoke fluida prijenosnika topline.....</i>	<i>51</i>
<i>Slika 4.16. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>2</sub> za različite masene protoke fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 4.17. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima na mjernoj poziciji T<sub>8</sub> za različite masene protoke fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 4.18. Vremenske promjene izlaznih temperatura fluida prijenosnika topline prilikom korištenja topline dobivene eksperimentalnim mjerenjima za različite masene protoke fluida prijenosnika topline.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 4.19. Vremenske promjene predanih toplina prilikom korištenja topline dobivene rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite masene protoke fluida prijenosnika topline .....</i>	<i>54</i>

<i>Slika 4.20. Usporedba srednjih toplinskih učina korištenja topline dobivenih rezultatima eksperimentalnih mjerenja za različite masene protoke fluida prijenosnika topline.....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 5.1. Odabir domene numeričkog proračuna, a) poprečni presjek latentnog spremnika topline s opisanim kružnicama oko cijevi, b) poprečni presjek izdvojene cijevi s označenom domenom u xy ravnini, c) trodimenzijski prikaz domene numeričkog proračuna .....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 5.2. Shematski prikaz domene numeričkog proračuna s označenim rubnim uvjetima ...</i>	<i>67</i>
<i>Slika 6.1. Kontrolni volumen i čvorovi trodimenzijske mreže .....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 6.2. Dijagram toka nestacionarnog SIMPLE algoritma .....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 6.3. Strukturirana numerička mreža s 268500 kontrolnih volumena.....</i>	<i>77</i>
<i>Slika 6.4. Raspodjela vrijednosti faktora iskrivljenosti za generiranu mrežu od 268500 kontrolnih volumena.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 6.5. Analizirane mreže različitih gustoća za razmatrani problem, a) 159000 kontrolnih volumena, c) 268500 kontrolnih volumena, c) 385000 kontrolnih volumena.....</i>	<i>80</i>
<i>Slika 6.6. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji <math>T_5</math> dobivene numeričkim proračunima za različite gustoće mreže.....</i>	<i>81</i>
<i>Slika 6.7. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja na poziciji <math>T_5</math> dobivene numeričkim proračunima za različite vremenske korake.....</i>	<i>82</i>
<i>Slika 7.1. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja dobivene eksperimentalno i numerički na poziciji <math>T_2</math> .....</i>	<i>85</i>
<i>Slika 7.2. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja dobivene eksperimentalno i numerički na poziciji <math>T_6</math>.....</i>	<i>85</i>
<i>Slika 7.3. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene eksperimentalno i numerički na poziciji <math>T_2</math>.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 7.4. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene eksperimentalno i numerički na poziciji <math>T_5</math>.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 7.5. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja dobivene eksperimentalno i numerički s i bez utjecaja slobodne konvekcije na poziciji <math>T_2</math> .....</i>	<i>88</i>
<i>Slika 7.6. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom taljenja dobivene eksperimentalno i numerički s i bez utjecaja slobodne konvekcije na poziciji <math>T_6</math>.....</i>	<i>89</i>
<i>Slika 7.7. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom taljenja akumulatora topline, dobivenih numeričkim proračunima s i bez slobodne konvekcije u proračunskim vremenima 2, 4, 6, 8 i 10 h .....</i>	<i>90</i>

<i>Slika 7.8. Vektori brzina akumulatora topline u središnjoj ravini između lamela na vrhu poddomene akumulatora topline prilikom taljenja u proračunskim vremenima 2, 4 i 10 h, dobiveni numeričkim proračunom sa slobodnom konvekcijom .....</i>	<i>91</i>
<i>Slika 7.9. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene eksperimentalno i numerički s i bez utjecaja slobodne konvekcije na poziciji <math>T_2</math>...</i>	<i>93</i>
<i>Slika 7.10. Vremenske promjene temperatura akumulatora topline prilikom skrućivanja dobivene eksperimentalno i numerički s i bez utjecaja slobodne konvekcije na poziciji <math>T_5</math>...</i>	<i>93</i>
<i>Slika 7.11. Vektori brzina akumulatora topline u središnjoj ravini između lamela na dnu poddomene akumulatora topline prilikom skrućivanja u proračunskim vremenima 0,5, 2 i 6 h, dobiveni numeričkim proračunom sa slobodnom konvekcijom .....</i>	<i>94</i>
<i>Slika 7.12. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom skrućivanja akumulatora topline, dobivenih numeričkim proračunima s i bez slobodne konvekcije u proračunskim vremenima 0,5, 2, 6, 10 i 14 h.....</i>	<i>95</i>
<i>Slika 8.1. Shematski prikaz cijevi i pripadajućeg akumulatora topline s označenim geometrijskim parametrima ispitivanim u numeričkim analizama; broj lamela (N), omjer visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi (H/D) i debljina lamela (<math>\delta</math>) .....</i>	<i>97</i>
<i>Slika 8.2. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela.....</i>	<i>99</i>
<i>Slika 8.3. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini xy za <math>z = 0,75</math> m prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela.....</i>	<i>100</i>
<i>Slika 8.4. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela.....</i>	<i>102</i>
<i>Slika 8.5. Usporedba raspodjela temperatura i udjela kapljevite faze u ravnini xy za <math>z = 0,75</math> m prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s 4, 8 i 12 lamela .....</i>	<i>103</i>
<i>Slika 8.6. Usporedbe akumuliranih/predanih toplina za područje oko jedne cijevi u 8 h spremanja, odnosno 12 h korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima za analizirane brojeve lamela .....</i>	<i>104</i>
<i>Slika 8.7. Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje/skrućivanje dobivenih numeričkim proračunima za analizirane brojeve lamela .....</i>	<i>105</i>



<i>Slika 8.8. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8 .....</i>	<i>106</i>
<i>Slika 8.9. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini xy za z = 0,75 m prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8 .....</i>	<i>107</i>
<i>Slika 8.10. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8 .....</i>	<i>109</i>
<i>Slika 8.11. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini xy za z = 0,75 m prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s omjerima visine spremnika i promjera kružnice opisane oko cijevi 6,3, 8,3 i 12,8 .....</i>	<i>110</i>
<i>Slika 8.12. Usporedbe akumuliranih/predanih toplina za područje oko jedne cijevi u 8 h spremanja, odnosno 12 h korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima za analizirane omjere visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi .....</i>	<i>111</i>
<i>Slika 8.13. Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje/skrucivanje dobivenih numeričkim proračunima za analizirane omjere visine latentnog spremnika topline i promjera kružnice opisane oko cijevi .....</i>	<i>112</i>
<i>Slika 8.14. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5, 2 i 4 mm .....</i>	<i>113</i>
<i>Slika 8.15. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini xy za z = 0,75 m prilikom spremanja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 1, 3 i 5 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5, 2 i 4 mm .....</i>	<i>114</i>
<i>Slika 8.16. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u središnjoj ravnini između lamela prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5, 2 i 4 mm .....</i>	<i>116</i>

<i>Slika 8.17. Usporedba raspodjela temperatura (a) i udjela kapljevite faze (b) u ravnini xy za z = 0,75 m prilikom korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima u proračunskim vremenima 2, 5 i 8 h za konfiguracije latentnog spremnika topline s lamelama debljine 0,5, 2 i 4 mm .....</i>	<i>117</i>
<i>Slika 8.18. Usporedbe akumuliranih/predanih toplina za područje oko jedne cijevi u 8 h spremanja, odnosno 12 h korištenja topline dobivenih numeričkim proračunima za analizirane debljine lamela .....</i>	<i>118</i>
<i>Slika 8.19. Usporedbe vremena u kojima završavaju taljenje/skrucivanje dobivenih numeričkim proračunima za analizirane debljine lamela .....</i>	<i>119</i>

## **Popis tablica**

<i>Tablica 3.1. Izmjerene temperature prilikom umjeravanja termoparova .....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 3.2. Fizikalna svojstva parafina RT 25 [69] .....</i>	<i>28</i>
<i>Tablica 3.3. Aksijalne i radijalne pozicije termoparova na strani akumulatora topline oko jedne cijevi prilikom eksperimentalnih istraživanja na latentnom spremniku topline.....</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 7.1. Svojstva akumulatora topline, fluida prijenosnika topline i stijenke (cijevi i lamela) korištena u numeričkim proračunima .....</i>	<i>84</i>
<i>Tablica 8.1. Referentne vrijednosti analiziranih parametara u numeričkim analizama .....</i>	<i>98</i>
<i>Tablica 9.1. Minimalne, referentne i maksimalne vrijednosti analiziranih parametara te odzivi definiranih funkcija cilja za ispitane slučajeve dobiveni za područje oko jedne cijevi .....</i>	<i>123</i>
<i>Tablica 9.2. Optimalne vrijednosti analiziranih parametara za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka .....</i>	<i>124</i>
<i>Tablica 9.3. Optimalne vrijednosti analiziranih parametara za funkciju s ciljem povećanja iskoristivosti topline .....</i>	<i>126</i>
<i>Tablica 9.4. Optimalne vrijednosti analiziranih parametara za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz povećanje iskoristivosti topline s jednakim faktorima važnosti.....</i>	<i>129</i>
<i>Tablica 9.5. Usporedba kriterija ocjene učinkovitosti dobivenih za područje oko jedne cijevi eksperimentalnog latentnog spremnika topline i optimalne konfiguracije za funkciju s ciljem povećanja srednjeg latentnog toplinskog toka uz povećanje iskoristivosti topline s jednakim faktorima važnosti .....</i>	<i>130</i>

## PODACI O AUTORU

Mateo Kirinčić rođen je 27. rujna 1991. u Rijeci. Osnovnu školu završio je 2006., a klasičnu gimnaziju 2010., nakon čega upisuje studij strojarstva na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Zvanje sveučilišnog prvostupnika inženjera strojarstva stječe 2013., a zvanje magistra inženjera strojarstva 2015., obranom diplomskog rada pod nazivom *Termodinamička analiza cijevnog izmjenjivača topline*. Iste godine upisuje poslijediplomski sveučilišni (doktorski) studij iz tehničkih znanosti, polje strojarstvo, modul termoenergetika.

Od 1. travnja 2016. radi kao asistent na Zavodu za termodinamiku i energetiku na Tehničkom fakultetu. Sudjeluje u nastavi iz kolegija *Termodinamika I*, *Termodinamika II*, *Numeričko modeliranje u termodinamici*, *Termodinamika BG* te *Termodinamika i energetika* na sveučilišnim studijima i *Toplina* na stručnim studijima. Suradnik je na znanstvenim projektima istraživačke potpore Sveučilišta u Rijeci *Istraživanje i razvoj komponenata obnovljivih izvora energije* (2016.-2017.) i *Akumulacija i izmjena toplinske energije u sustavima obnovljivih izvora energije* (2019.-2021.) te na znanstvenom projektu Hrvatske zaklade za znanost *Povećanje energetske učinkovitosti izmjenjivača topline (HEXENER)* (2017.-2021.).

Od ožujka do srpnja 2019. boravio je na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani u sklopu znanstvenog usavršavanja, a iste godine pohađao je naprednu jesensku školu toplinskih mjerenja *METTI 7: Advanced Autumn School in Thermal Measurements & Inverse Techniques* na Porquerollesu u Francuskoj.

Bio je član organizacijskog i uređivačkog odbora četvrtog izdanja konferencije za doktorande *My First Conference*, održane 24. rujna 2020. na Tehničkom fakultetu u Rijeci.

Aktivno se služi engleskim jezikom u govoru i pismu.

Autor je triju znanstvenih članaka, od kojih su dva objavljena u časopisima koji pripadaju prvom kvartilu (Q1), a jedan u časopisu koji pripada drugom kvartilu (Q2), pet kongresnih priopćenja prezentiranih na međunarodnim skupovima te četiriju priopćenja prezentiranih na ostalim skupovima.

## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA AUTORA

1. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica; Lenić, Kristian: *Influence of natural convection during melting and solidification of paraffin in a longitudinally finned shell-and-tube latent thermal energy storage on the applicability of developed numerical models*, Renewable Energy, 179, 1329-1344, 2021.
2. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica; Lenić, Kristian: *Numerical evaluation of the latent heat thermal energy storage performance enhancement by installing longitudinal fins*, Journal of Energy Storage, 42, 103085, 2021.
3. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica; Lenić, Kristian; Torbarina, Fran: *Latent thermal energy storage charging and discharging: a numerical study*, Book of Abstracts of the ENERSTOCK 2021, 15th International Virtual Conference on Energy Storage, Ljubljana, Slovenia, 82-83, 9.-11.6.2021.
4. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica: *Numerical analysis of the influence of baffles on heat transfer and pressure drop in a shell-and-tube heat exchanger*, Book of Abstracts of the 4th annual conference for doctoral students of engineering and technology My First Conference, University of Rijeka, Faculty of Engineering, Rijeka, Croatia, 17, 24.9.2020.
5. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica; Lenić, Kristian; Torbarina, Fran: *Experimental analysis of latent thermal energy storage charging and discharging*, Proceedings of the ISES EuroSun 2020 Conference – 13th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, Athens, Greece, 678-686, 1.-3.9.2020.
6. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica; Lenić, Kristian; Wolf, Igor: *Experimental Investigation on Melting of Paraffin in Latent Thermal Energy Storage*, Proceedings of the 14th International Renewable Energy Storage Conference 2020 (IRES 2020), Duesseldorf, Germany, 193-198, 25.-26.5.2021.
7. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica; Lenić, Kristian: *Optimization of a small size shell and tube heat exchanger using response surface methodology*, Book of Abstracts of the 3rd annual conference for doctoral students of engineering and technology My First Conference, University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering, Rijeka, Croatia, 8, 12.9.2019.
8. Kirinčić, Mateo; Lenić, Kristian: *Numerical analysis of heat and mass transfer in an indirect evaporative heat exchanger*, Book of Abstracts of the 2nd annual conference for doctoral students of engineering and technology My First Conference, University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka, Croatia, 14, 27.9.2018.

9. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica: *Numerical Analysis of the Influence of Natural Convection on Melting and Solidification of Paraffin*, Book of Extended Abstracts of the 1st annual conference for doctoral students of engineering and technology My First Conference, University of Rijeka, Faculty of Engineering, Rijeka, Croatia, 25-26, 28.9.2017.
10. Glažar, Vladimir; Trp, Anica; Lenić, Kristian; Kirinčić, Mateo: *Experimental Analysis of Air-Water Heat Exchanger with Microchannel Coil Exposed to Different Working Parameters*, Proceedings of the ISES EuroSun 2018 Conference – 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, Rapperswill, Switzerland, 345-356, 10.-13.9.2018.
11. Kirinčić, Mateo; Trp, Anica; Lenić, Kristian: *Numerical investigation and experimental validation of heat transfer in a small size shell and tube heat exchanger*, Engineering Review, 37 (2), 122-133, 2017.
12. Kirinčić, Mateo; Lenić, Kristian; Trp, Anica: *Energy and exergy analysis of a shell-and-tube heat exchanger*, Proceedings of the International Congress Energy and the Environment 2016, 25th Scientific Conference on Energy and the Environment, Opatija, Croatia, 537-546, 26.-28.10.2016.